

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**DESEMPENHO DE TRATOR AGRÍCOLA EM DUAS
PROFUNDIDADES DE ESCARIFICAÇÃO E DOIS TEORES
DE ÁGUA NO SOLO**

Ariel Muncio Compagnon

Engenheiro Agrícola

JABOTICABAL - SÃO PAULO - BRASIL

Julho de 2012

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**DESEMPENHO DE TRATOR AGRÍCOLA EM DUAS
PROFUNDIDADES DE ESCARIFICAÇÃO E DOIS TEORES
DE ÁGUA NO SOLO**

Ariel Muncio Compagnon

Orientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

JABOTICABAL - SÃO PAULO - BRASIL

Julho de 2012

Compagnon, Ariel Muncio
C736d Desempenho de trator agrícola em duas profundidades de
escarificação e dois teores de água no solo / Ariel Muncio
Compagnon. -- Jaboticabal, 2012
xii, 51 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2012
Orientador: Carlos Eduardo Angeli Furlani
Banca examinadora: Rouverson Pereira da Silva, Rubens
Siqueira
Bibliografia

1. Desempenho operacional. 2. Densidade. 3. Resistência
mecânica do solo à penetração. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.372

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da
Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de
Jaboticabal.

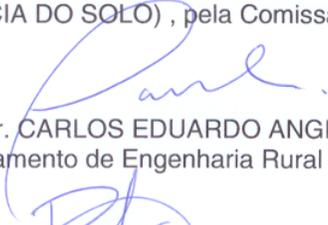
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

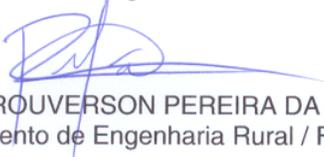
TÍTULO: DESEMPENHO DE TRATOR AGRÍCOLA EM DUAS PROFUNDIDADES DE ESCARIFICAÇÃO E DOIS TEORES DE ÁGUA NO SOLO

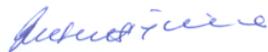
AUTOR: ARIEL MUNCIO COMPAGNON

ORIENTADOR: Prof. Dr. CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI
Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. ROUVERSON PEREIRA DA SILVA
Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. RUBENS SIQUEIRA
Área de Engenharia Agrícola / Instituto Agrônômico do Paraná / Londrina/PR

Data da realização: 23 de julho de 2012.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ARIEL MUNCIO COMPAGNON – nascido em Planaltina do Paraná, Paraná, no dia 17 de janeiro de 1986, filho de Nelson Muncio Compagnon e Sebastiana Tossi Compagnon. Coursou o Ensino Fundamental e Médio na Escola Municipal Frei Enedino Caetano e no Colégio Estadual Marechal Arthur da Costa e Silva, em Planaltina do Paraná, tendo finalizado o Ensino Médio no ano de 2003. Ingressou no Ensino Superior no ano de 2004 no curso de Engenharia Agrícola, na Universidade Estadual de Maringá - Câmpus do Arenito, em Cidade Gaúcha, Paraná, concluindo-o no ano de 2008. Durante a faculdade, desenvolveu trabalhos de monitoria e pesquisa com projetos de iniciação científica, além de estágio em usina do setor sucroenergético. Em abril de 2009, iniciou carreira profissional como bolsista do Programa “Universidade Sem Fronteiras” no Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR), em Londrina, atuando no projeto “Teste e validação de colhedora de amoreira e de plantas oleaginosas para a agricultura familiar”, permanecendo até julho de 2010, quando se desligou para iniciar pós-graduação. Em agosto de 2010, iniciou, o curso de Mestrado em Agronomia, no programa de Ciência do Solo, pela Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” – Câmpus de Jaboticabal, São Paulo, desenvolvendo suas pesquisas e estudos no Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola (LAMMA). Em julho de 2012, submeteu-se à banca examinadora para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

"Nunca deixe ninguém te dizer que não pode fazer alguma coisa. Se você tem um sonho, tem que correr atrás dele. As pessoas não conseguem vencer, e dizem que você também não vai vencer. Se quer alguma coisa, corre atrás".

À PROCURA DA FELICIDADE

Aos meus pais Nelson e Sebastiana

DEDICO

Aos meus pais Nelson e Sebastiana

Aos meus irmãos Samuel e Nanci

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À DEUS, por ter me dado a graça de viver e por me proporcionar saúde, inteligência e me dar força por toda minha caminhada.

Aos meus queridos pais, Nelson e Sebastiana, que sempre batalharam com muito esforço e sacrifício para que eu pudesse concluir meus estudos. Que DEUS continue sempre protegendo e abençoando vocês.

Aos meus irmãos Samuel e Nanci, que sempre me incentivaram.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP), de Jaboticabal.

Ao programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo).

Ao pesquisador, Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani, que aceitou ter me orientado sem sequer ter me conhecido antes, e pelas sugestões e correções durante a realização deste trabalho.

Ao pesquisador, Prof. Dr. Rouverson Pereira da Silva, pelos ensinamentos em sala de aula e pela nossa grande amizade fora dela.

Ao pesquisador, Dr. Rubens Siqueira, pela sua amizade e por todos os conselhos dados durante minha passagem pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR).

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa durante todo o mestrado.

Aos moradores, ex-moradores e agregados da República Pau da Goiaba (Caio Yamauchi, Guilherme Alves, João Paulo, Kauê Oshiro, Leonardo Mattoso, Raphael Gonçalves, Roberto Marchi, Rodrigo Muniz, Rodolpho Cavalcanti, Rogério Medeiros, Victor Carvalho e Wesley Castiglioni) e a Dona Quitéria, pela convivência durante esse período.

Aos amigos integrantes do Laboratório de Máquinas e Mecanização Agrícola (LAMMA) – Carlos Chioderoli, Cristiano Zerbato, Érica Tricai, Evaldo Ferezin, Fábio Cavichioli, Leomar Lima, Marcelo Cassia, Marcelo Boamorte, Melina Cais, Murilo Voltarelli, Rafael Bertonha, Rafael de Azevedo e Vicente Filho. O meu muito obrigado pela convivência, amizade e ajuda na coleta dos dados.

Aos amigos do IAPAR – Alexandre, Audilei, José Arnaldo, Zé do “Brejo”, Paulinho e Ronaldo, pelos ensinamentos.

Aos funcionários da Associação Brasileira de Engenharia Agrícola (SBEA) – Alexandre Flório, Murilo Panosso e Patrícia Santaguita, e aos assistentes do LAMMA - Aparecido Alves, Sebastião Filho e Valdecir Aparício.

Ao Departamento de Engenharia Rural da FCAV, aos seus professores e funcionários, que de alguma forma colaboraram com minha formação e realização deste trabalho e a todos aqueles que, embora não tenha citado os nomes, contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho.

Agradecimento especial à Ariane Oshiro, pelo tempo que passamos juntos, por todas nossas conversas, e pelo seu carinho e atenção comigo. Te adoro muito.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
I INTRODUÇÃO	1
II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
1 Tipos de preparo de solo.....	3
2 Escarificador	4
2.1 Demanda Operacional	5
2.2 Teor de água do solo e profundidade de trabalho	7
3 Compactação do solo.....	7
4 Resistência mecânica do solo à penetração	8
5 Controle estatístico de processo	10
III MATERIAL E MÉTODOS	12
1 Caracterização e localização da área experimental	12
2 Delineamento experimental.....	13
3 Equipamentos utilizados	14
3.1 Trator	14
3.2 Escarificador	15
3.3 Desempenho operacional do conjunto trator-escarificador	16
3.3.1 Aquisição de dados.....	16
3.3.2 Velocidade de deslocamento	16
3.3.3 Consumo de combustível	17
3.3.3.1 Consumo horário	18
3.3.3.2 Consumo por volume de solo trabalhado	19
3.3.3.3 Consumo operacional.....	19
3.3.4 Capacidade de campo operacional	20
3.3.5 Força e potência na barra de tração.....	20
3.3.6 Patinagem dos rodados dianteiros e traseiros.....	21

3.4 Teor de água do solo	22
3.5 Densidade do solo	22
3.6 Resistência mecânica do solo à penetração	24
4 Análise estatística dos dados	25
4.1 Análise de variância	25
4.2 Controle estatístico de processo	26
IV RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
1 Análise de variância	29
1.1 Desempenho operacional do conjunto trator-escarificador	29
1.2 Densidade do solo	33
1.3 Resistência mecânica do solo à penetração	35
2 Controle estatístico de processo	38
V CONCLUSÕES	43
VI REFERÊNCIAS	44

LISTA DE TABELAS

	Página
1. Análise granulométrica simples de um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico A moderado, textura argilosa, da área experimental, em Jaboticabal, SP.	12
2. Análise de variância e teste de médias para velocidade de trabalho; consumo horário de combustível, por volume de solo trabalhado e operacional; capacidade de campo operacional; força e potência na barra de tração; e patinagem traseira e dianteira.	30
3. Desdobramento da interação entre os fatores teor de água do solo e profundidade de trabalho para a variável velocidade de trabalho.	31
4. Análise de variância e teste de médias para densidade do solo.	34
5. Análise de variância e teste de médias para índice de cone.	36
6. Desdobramento da interação entre os fatores teor de água do solo e profundidade de trabalho para a variável índice de cone antes da escarificação.	37

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Croqui da área experimental e distribuição das parcelas no campo.	13
2. Trator Valtra BM 125i.	14
3. Escarificador de sete hastes (a) e detalhe da regulagem da profundidade de trabalho por anéis (b).	15
4. <i>Micrologger</i> CR23X.	16
5. Radar Dick John, alinhado com ângulo de 45° em relação ao solo.	17
6. Medidor de fluxo de combustível Oval M – III, modelo LSF41.	18
7. Célula de carga Shimizu TF 400.	21
8. Coleta de amostras de densidade do solo.	23
9. Penetrômetro eletrônico acoplado a um quadriciclo.	24
10. Modelo de carta de controle subgrupo de amplitude móvel.	27
11. Cartas de controle para velocidade de trabalho.	39
12. Cartas de controle para consumo de combustível horário.	40
13. Cartas de controle para força de tração.	41
14. Cartas de controle para potência na barra de tração.	42

DESEMPENHO DE TRATOR AGRÍCOLA EM DUAS PROFUNDIDADES DE ESCARIFICAÇÃO E DOIS TEORES DE ÁGUA NO SOLO

RESUMO – O dimensionamento do conjunto trator-equipamento está relacionado ao desempenho operacional do mesmo ao executar determinado trabalho, portanto, conhecer a demanda energética da operação agrícola é importante para planejar a produção. O trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho e o comportamento operacional do conjunto trator-escarificador, a densidade do solo e a resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) em função do teor de água do solo e da profundidade de trabalho, em um LATOSSOLO VERMELHO. Foi utilizado um DIC em esquema fatorial 2x2 com 5 repetições. Os tratamentos foram: TAS: teor de água do solo (26,2% e 21,9%) e P: profundidade de escarificação (0,20 e 0,30 m). Os dados foram submetidos à ANOVA e ao controle estatístico de processo (CEP). As variáveis analisadas foram: velocidade de trabalho; consumo de combustível: horário, por volume de solo trabalhado e operacional; capacidade de campo operacional (Cco); força e potência na barra de tração; patinagem dos rodados traseiros e dianteiros; densidade e RMSP. A velocidade de trabalho foi afetada pela interação TAS x P. As variáveis relacionadas ao consumo de combustível e a patinagem dos rodados dianteiros foram influenciadas pelo TAS e P. A força e a potência na barra de tração aumentaram com a profundidade, enquanto que a Cco aumentou no menor TAS. A densidade não foi alterada pelos tratamentos. As variáveis de desempenho apresentaram comportamento instável em relação ao CEP.

PALAVRAS-CHAVE: consumo de combustível, densidade do solo, força de tração, mecanização agrícola, preparo do solo, RMSP.

PERFORMANCE OF FARM TRACTOR AT TWO CHISELING DEPTHS AND TWO LEVELS OF SOIL WATER CONTENT

SUMMARY – The scaling of the tractor-equipment is related to operational performance to execute certain work, therefore, knowing the energy demand of the agricultural operation is important to plan the production. The work aimed to assess operating performance and the behavior of the tractor-chisel set, soil density and soil mechanical resistance to penetration (RMSP) depending on the soil water content and the working depth, in a Oxysol. Was used a DIC in factorial 2x2 with 5 repetitions. The treatments were: TAS: soil water content (26.2% and 21.9%) and P: chiseling depth (0.20 and 0.30 m). The data were submitted to ANOVA and statistical process control (SPC). The variables analyzed were: working speed; fuel consumption: hourly, per volume of soil worked and operational; operating field capacity (Cco); force and power in traction bar; front and rear axles of slipping; density and RMSP. The speed of work was affected by interaction TAS x P. The variables related to the fuel consumption and the slipping of front axles were influenced by TAS and P. The force and power in traction bar increased with depth, while the Cco has increased in the lowest TAS. The density was not altered by the treatments. The performance variables showed unstable behavior in relation to the CEP.

KEYWORDS: agricultural mechanization, bulk density, fuel consumption, RMSP, soil tillage, traction force.

I INTRODUÇÃO

O crescente aumento da população mundial e a conseqüente escassez de terras férteis e produtivas têm obrigado a agricultura a se modernizar cada vez mais, com a criação de novas tecnologias e sistemas de produção que permitam obter maiores produtividades, ou seja, produzir muito mais em muito menos espaço. Com isso, faz-se necessário o uso da mecanização das atividades agrícolas.

A seleção de um sistema de preparo do solo é difícil, pois leva em consideração variações do tipo de solo, teor de água, cobertura vegetal, cultura a ser implantada, dentre outras variáveis. Com a crescente preocupação em preservar os recursos naturais, principalmente o solo, torna-se necessário minimizar a mobilização do mesmo e manter quantidades razoáveis de resíduos vegetais sobre a superfície.

Com isso, surgem novas tecnologias, como o uso de escarificadores, que, comparado ao preparo convencional do solo, promove menor desagregação do solo e mantém maiores quantidades de resíduos vegetais na superfície.

A seleção do sistema de preparo de solo correto também leva em consideração a demanda por energia, ou seja, com a correta adequação do trator e equipamento, obtém-se redução na demanda energética de máquinas agrícolas. A avaliação energética pode ser realizada com base na medição do consumo de combustível, que é o principal indicador técnico de referência na avaliação da eficiência de utilização dos tratores agrícolas. O consumo de combustível dos tratores leva em consideração fatores como exigência de tração, lastragem e velocidade de deslocamento.

Alguns autores citam a necessidade de maior quantidade de pesquisas para avaliar o desempenho em tração sob condições de campo e, com isso, fornecer informações suficientes para que o desempenho seja estimado. Outros autores citam que o teor de água do solo e profundidade de trabalho são variáveis que influem nas operações de preparo de solo e que o conhecimento e domínios destas tecnologias podem levar à redução dos custos de produção das culturas.

Em contrapartida, o aumento da mecanização traz uma série de outros inconvenientes, fatores que se agravam com o intenso tráfego de maquinário pesado e

a incorreta utilização de equipamentos, como a compactação do solo, que é um processo de densificação na qual há um aumento da resistência mecânica do solo à penetração, e esse processo reduz o crescimento e o desenvolvimento radicular, resultando em um menor estande de plantas, baixa qualidade do vegetal e consequente queda na produção.

Mas, antes que a compactação seja solucionada, ela precisa ser diagnosticada, uma vez que os equipamentos utilizados para a descompactação do solo devem ser regulados de acordo com a profundidade em que se encontra a camada compactada. Uma regulação feita sem o conhecimento desse parâmetro pode ocasionar em gasto desnecessário de energia e ainda ineficiência da operação, o que representa o não retorno do investimento.

Equipamentos e metodologias surgiram para que as camadas compactadas fossem identificadas, estudadas e sanadas, como por exemplo, a macroporosidade, densidade, velocidade de infiltração da água e resistência mecânica do solo à penetração (RMSP). Esta última apresenta correlação direta com o crescimento das raízes das plantas e, além disto, é mensurada por meio de penetrômetros, equipamentos que permitem determinar a RMSP de forma rápida e fácil, além da confiabilidade nos resultados.

Partindo-se da hipótese de que o teor de água do solo e a profundidade de trabalho afetarão o desempenho e o comportamento da operação de escarificação, e que esta reduzirá a densidade e a resistência mecânica do solo à penetração, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho e o comportamento operacional do conjunto trator-escarificador, a densidade do solo e a resistência mecânica do solo à penetração em função do teor de água do solo e da profundidade de trabalho.

II REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1 Tipos de preparo de solo

O preparo do solo é uma operação agrícola na qual se procura alterar seu estado físico, químico e biológico, de forma a proporcionar melhores condições para o máximo desenvolvimento das plantas cultivadas.

O preparo convencional do solo pode ser definido como o revolvimento de camadas superficiais para reduzir a compactação, incorporar corretivos e fertilizantes, aumentar os espaços porosos e, com isso, elevar a permeabilidade e o armazenamento de ar e água. O revolvimento do solo promove o corte e o enterrio das plantas daninhas e auxilia no controle de pragas e patógenos do solo e, além disso, esse processo facilita o crescimento das raízes das plantas (SANTIAGO & ROSSETTO, 2007). Esse revolvimento é realizado, basicamente, com aração e gradagens. O arado efetua o corte, elevação, inversão e queda, com um efeito de esboroamento de fatias de solo denominadas de leivas. A grade complementa esse trabalho, diminuindo o tamanho dos torrões na superfície, além de nivelar o terreno. Entretanto, tal prática pode acarretar sérios problemas com o passar dos anos, principalmente se não for feita com critério (GABRIEL FILHO et al., 2000).

O sistema de preparo conservacionista (também chamado de reduzido) é aquele que, além de produzir um leito de semeadura adequado, mantém consideráveis quantidades de resíduos na superfície do solo, protegendo-o contra o impacto direto das gotas de chuva (CASTRO FILHO et al., 1991). Para realizar o preparo reduzido do solo em áreas de lavouras mecanizadas, são utilizados equipamentos de hastes (escarificadores). Para CARVALHO FILHO et al. (2007), o preparo do solo com o escarificador atende à condição de manejo conservacionista por proporcionar agregados de maior tamanho e por manter elevada quantidade de resíduos na superfície do solo.

O preparo localizado do solo, também chamado de plantio direto, consiste em um sistema de produção conservacionista, que se contrapõe ao sistema tradicional de manejo. Envolve o uso de técnicas que visam preservar a qualidade ambiental, fundamentando-se na ausência de preparo do solo e na presença de cobertura permanente sobre o terreno, por meio de rotação de culturas (MACHADO et al., 2004).

2 Escarificador

A operação de escarificação consiste em mobilizar o solo até 0,30 m de profundidade, com mínima mobilização superficial e mantendo parte da cobertura do solo. Por não provocar a inversão de camadas do solo, esta operação proporciona menor desagregação, sendo que parte dos resíduos vegetais fica depositado na superfície do solo, facilitando assim o controle da erosão, melhorando potencialmente a infiltração e a retenção de água, bem como a estrutura e a porosidade do solo, quando comparada aos preparos do solo convencionais (MACHADO et al., 2005).

CAMARA (2004) considera o escarificador como um equipamento adequado para o preparo reduzido do solo, com menor revolvimento e incorporação de restos de culturas, protegendo sua superfície e melhorando a infiltração de água. Afirma ainda que o preparo do solo com escarificador pode manter e até melhorar a parte física, por desagregar o mínimo possível a sua estrutura e preservar uma cobertura morta capaz de proteger a superfície da radiação solar e do impacto das gotas da chuva.

A escarificação reduz os efeitos negativos da compactação, diminuindo a densidade e a resistência mecânica do solo à penetração (ABREU et al., 2004), melhorando o ambiente do solo para o armazenamento e movimento de água, fatores que promovem maiores produtividades de plantas (VEIGA et al., 2006).

2.1 Demanda Operacional

O dimensionamento de um conjunto trator-equipamento é realizado pela máxima potência requerida no motor. De maneira indireta, deve-se considerar o tipo, forma de trabalho e largura do equipamento, e as condições de solo sobre as quais o trator irá trabalhar (MACMILLAN, 2002).

As variáveis que afetam o desempenho operacional dos escarificadores são: velocidade de deslocamento, consumo de combustível, força de tração e patinagem (SASAKI & GONÇALVES, 2005), configuração da haste, tipo e tamanho da ponteira, textura e o teor de água do solo (BENTIVENHA et al., 2003). GABRIEL FILHO et al. (2008) citam a necessidade de maior quantidade de pesquisas para avaliar o desempenho em tração sob condições de campo e, com isso, fornecer informações suficientes para que o desempenho seja estimado.

BIANCHINI et al. (1999), ao avaliar o comportamento de um escarificador de hastes parabólicas em solo de cerrado (LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO), obtiveram equações para prever a força de tração e a potência exigidas. Os autores verificaram que a força de tração apresenta comportamento quadrático com a profundidade de trabalho e concluíram que a regulagem do escarificador, com vistas a maximizar o seu desempenho, deve ser realizada observando-se criteriosamente os fatores do teor de água do solo, profundidade de trabalho, distância entre hastes e velocidade de operação.

SALVADOR et al. (1998), estudando a energia requerida por área considerando a potência e o tempo gasto por hectare em sistemas de preparo baseados em aração (discos e aivecas), gradagem (pesada e leve) e escarificação num LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO, concluíram que a escarificação apresentou menor requerimento de energia que os demais sistemas de preparo periódico do solo. Os valores obtidos de força de tração na barra foram de 12,77 e 18,16 kN, nas profundidades de solo de 0,27 e 0,31 m, respectivamente, as quais apresentaram diferenças.

LEVIEN et al. (2003) avaliaram o desempenho operacional de um escarificador com sete hastes com espaçamento entre hastes de 0,40 m, com profundidade de trabalho de 0,175 m, concluíram que a força média na barra de tração foi de 38,22 kN e a potência média na barra de tração foi de 27,78 kW. Os mesmos autores observaram consumo de combustível de 14,9 L h⁻¹ e consumo operacional de 20,3 L ha⁻¹.

Estudando a influência da compactação em solo com textura franco argilo-arenosa no trabalho de ferramentas de mobilização (escarificador com disco acoplado) em caixa de solo, SAHU & RAHEMAN (2006) encontraram aumento no esforço de tração com aumento da compactação, chegando a diferenças de 1,5 kN na profundidade de 0,10 m, quando a condição de compactação do solo passou de 826 kPa para 1219 kPa.

RAPER et al. (2005) verificaram redução no consumo de combustível da ordem de 43% e 27%, quando a profundidade de subsolagem foi de 0,25 e 0,35 m, respectivamente, comparado à profundidade de 0,45 m. Os mesmos autores alertam que se pode conseguir redução do consumo de combustível trabalhando com profundidades variáveis, de acordo com a camada do solo a ser descompactada.

Estudando o desempenho energético de subsoladores, KICHLER et al. (2007) observaram que ocorreu aumento no consumo de combustível de 20% e incremento na força de tração de 120% quando se aumentou a profundidade de 0,23 m para 0,35 m.

SALVADOR et al. (2008), estudando o consumo de combustível e a patinagem das rodas motrizes na operação de subsolagem efetuada com subsolador de 3 hastes em NITOSSOLO VERMELHO Distroférico textura argilosa, antes e depois da escarificação do solo, obtiveram consumo de combustível operacional de 26,54 L ha⁻¹ antes e 22,9 L ha⁻¹ após a escarificação, concluindo que a subsolagem após escarificação representou economia de combustível da ordem de 13,7%. Para a patinagem das rodas motrizes, após a escarificação, obtiveram 16,3% de redução nos valores de patinagem. A redução da patinagem, segundo os autores, proporciona menor compactação do solo, menor desgaste dos pneus e dos mecanismos de transmissão, como também reduz os gastos adicionais de combustíveis.

2.2 Teor de água do solo e profundidade de trabalho

Pesquisas indicam que o teor de água do solo e profundidade de trabalho são variáveis que influem nas operações de preparo de solo. Maiores conhecimentos e domínios destas tecnologias podem levar à redução dos custos de produção das culturas (KICHLER et al., 2007). O teor de água influencia em função da coesão entre as partículas do solo. À medida que o solo umedece, moléculas de água são adsorvidas na superfície de suas partículas, diminuindo a coesão. Quanto maior a superfície de contato das partículas, maior o filme de água adsorvido e, portanto, menor a coesão do solo. Caso o teor de água no solo seja muito elevado, as operações de preparo se tornam praticamente ineficazes, devido ao efeito lubrificante da água (SILVA, 2002).

Em geral, solos com teores de água elevados geram menor demanda por força de tração, apesar de não serem mobilizados adequadamente (SASAKI et al., 2002). Solos com teores de água mais baixos, verifica-se uma maior mobilização e um menor risco de compactação com o tráfego do trator (RÍPOLI et al., 1985).

3 Compactação do solo

O termo compactação refere-se ao processo de compressão do solo não saturado, provocando mudança na estruturação das partículas, ocorrendo aumento da densidade em consequência da redução do volume pela expulsão do ar de seus poros (SANTOS et al., 2011).

A compactação dos solos é um problema que deve ser corrigido nos sistemas agrícolas sob qualquer sistema de manejo do solo, uma vez que limita a absorção de nutrientes devido ao crescimento precário das raízes, proporcionando baixa infiltração e redistribuição de água ao longo do perfil além de diminuir as trocas gasosas, resultado direto do decréscimo da porosidade do solo (BEUTLER et al., 2007a).

A análise das modificações na estrutura do solo decorrentes da compactação pode ser feita por propriedades físicas do solo que traduzem as modificações na

distribuição das partículas ou agregados e conseqüentemente do tamanho de poros. Dentre as propriedades físicas do solo, a densidade do solo e resistência mecânica do solo à penetração média revelam-se como bons indicadores do seu nível de compactação. A densidade do solo é capaz de detectar modificações de volume (REICHERT et al., 2007), fornecendo uma visão geral do espaço poroso do solo. Uma primeira aproximação para a definição de limites críticos para identificar camadas e solos compactados, considera como limitante a densidade do solo de $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ para solos com mais de 55% de argila, $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ para solos entre 20 e 55% de argila e $1,65 \text{ g cm}^{-3}$ para solos com menos de 20% de argila (REINERT et al., 2001).

Sob o ponto de vista da máquina, a compactação gera efeito direto, podendo ser constatado pelo aumento da força de tração, visualizado pelo aumento da patinagem do trator, incidindo em desgaste nos mecanismos do trator, aumento no consumo de combustível, proporcionando redução da lucratividade de uma lavoura, redução da profundidade de semeadura, corte irregular da cobertura vegetal, ocasionado pela redução do desempenho do mecanismo sulcador (KLEIN, 1990).

4 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) tem sido utilizada, ao longo de muitos anos, com inúmeras aplicações em diversas áreas da pesquisa agrônoma, tais como: detecção de camadas compactadas, estudo da ação de ferramentas de máquinas no solo, prevenção de impedimento mecânico ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas, predição da força de tração necessária para execução de trabalhos e para conhecimento de processos de umedecimento e de ressecamento (CUNHA et al., 2002). A RMSP é uma propriedade do solo adotada como indicativo da compactação, por apresentar forte relação com o crescimento radicular das plantas (BEUTLER et al., 2002) e por ser muito eficiente na identificação de estados de compactação, quando comparada à densidade do solo (FREDDI et al., 2006) além de ser de fácil e rápida determinação (MERCANTE et al., 2003).

Os níveis críticos de resistência do solo para o crescimento das plantas variam de 1 a 4 MPa, sendo que muitos pesquisadores utilizam o valor de 2 MPa como o limite crítico. No entanto, o valor limitante ao desenvolvimento do sistema radicular das culturas ainda é muito discutido, pois depende da densidade do solo, textura, tipo do sistema radicular, teor de água do solo, entre outros fatores que direta ou indiretamente podem influenciar a RMSP (BONINI, 2006).

A RMSP é influenciada pelo teor de água, textura e pela condição estrutural do solo, fatores que estabelecem valores críticos do crescimento radicular e desenvolvimento das plantas (BEUTLER et al., 2007b). Em condição de baixa umidade, a água encontra-se num maior estado de tensão nos poros do solo. Além dessa tensão, somam-se as forças de coesão e de adesão já existentes entre os sólidos do solo, resultando em maior resistência à deformação ou à penetração de raízes numa condição de baixa umidade. Com o aumento do teor de água, decresce a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno, provocando, então, a diminuição da RMSP (CUNHA et al., 2002). Valores mais elevados de RMSP ocorrem por ocasião de menores conteúdos de água no solo (PEDROTTI et al., 2001).

Comparando tipos de manejo do solo (soja em sistema plantio direto, soja em solo escarificado e crotalária em cultivo mínimo), em solo com textura franco-arenosa e dez anos de plantio direto, ABREU et al. (2004) encontraram menor RMSP em solo escarificado do que em solo sob semeadura direta, sendo que o escarificador foi mais eficiente na ruptura da camada compactada e estabelecimento de poros condutores de água, do que em solos sob “escarificação biológica” com crotalária e semeadura direta.

BONINI (2006) avaliando a RMSP em quatro estados de compactação provocada por um rolo compactador Caterpillar CP 5330, na fase pós-colheita da cultura do trigo, encontrou que houve aumento da RMSP de acordo com o número de passadas do rolo compactador, concluindo que o maior estado de compactação observado nos tratamentos se deve ao efeito acumulativo de pressões de máquinas ou implementos que o solo recebe em uma safra ou de uma safra para outra, além de ter a acomodação natural das partículas mais finas pelo perfil do solo com o passar do tempo, que podem diretamente influenciar o aumento dos valores da RMSP.

Para medir a RMSP, uma das formas é utilizar um equipamento composto por uma haste com ponteira cônica denominado penetrômetro (CARBONERA, 2007). A RMSP mensurada através da penetrometria é determinada pelo índice de cone (IC), definido como a força de resistência do solo à penetração do cone de ângulo sólido de 30° com área basal conhecida, sendo expresso em unidade de pressão (Pascal ou Pa) que representa a força por unidade de área da base do cone (ALMEIDA et al., 2008). Esse método apresenta algumas vantagens por ser rápido, fácil e possuir boa correlação com o desenvolvimento radicular das plantas (BENGOUGH et al., 2001).

RIBEIRO (2010) ao compilar trabalhos sobre RMSP, estabeleceu a seguinte classificação para o IC: baixo (0 a 2 MPa); médio (2 a 4 MPa); alto (4 a 6 MPa) e muito alto (acima de 6 MPa).

A preferência em utilizar penetrômetros para medir o estado de compactação está na praticidade e rapidez na obtenção dos resultados. Ainda, os penetrômetros medem a RMSP em pequenos incrementos de profundidade, sendo úteis para avaliar camadas de maior resistência em profundidade e os valores de resistência mecânica do solo à penetração são positivamente correlacionados com a densidade do solo (SILVA et al., 2004).

5 Controle estatístico de processo

O controle estatístico de processos (CEP) é um conjunto de ferramentas de monitoramento, controle e melhoria na qualidade dos processos através de análises estatísticas (DE VRIES & RENEAU, 2010). A qualidade na definição moderna é inversamente proporcional à variabilidade. Os métodos de controle de qualidade nos dias de hoje mostram que a melhoria do processo produtivo pode ser monitorado, e rapidamente corrigidas as falhas encontradas no processo, mas é fundamental a utilização eficiente de gráficos de controle multivariado (MONTGOMERY, 2004).

Segundo TAKAHASHI (2011), os processos dentro da perspectiva do CEP são influenciados por dois tipos de variação, conhecidos como comum (natural ou aleatória)

e especial (não natural ou não aleatória). A variação comum é representada por variações pequenas, inevitáveis e resultantes de fatores naturais ao processo, que são dificilmente rastreáveis. A variação especial, por outro lado, é caracterizada por alterações de fácil identificação, responsáveis por uma mudança real no processo. Estas mudanças reais são representadas por alterações nos materiais, nas pessoas, nas máquinas, no meio ambiente ou no método utilizado. Entretanto, estas podem ser manipuladas, sendo frequentemente representadas pelo aumento de custos.

O controle da qualidade no CEP utiliza-se de cartas de controle para acompanhamento e monitoramento do processo. O objetivo das cartas de controle é possibilitar uma avaliação da estabilidade do processo e identificação de causas especiais e comuns de variação (CORTIVO, 2005).

As causas comuns de variação são aquelas que não fazem parte do processo ou sistema; exemplos: desregulagem de uma máquina ou irregularidades em uma matéria-prima. As causas especiais são anômalas ao processo, podendo ser prejudiciais à qualidade do produto manufaturado. O monitoramento e ação corretiva sobre causas especiais são de responsabilidade da área operacional da empresa. Uma vez identificadas as causas especiais, pode-se atuar imediatamente sobre elas buscando a estabilização do processo (PIRES, 2000).

III MATERIAL E MÉTODOS

1 Caracterização e localização da área experimental

O experimento foi conduzido na área da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV/UNESP), em Jaboticabal, estado de São Paulo, no mês de outubro de 2011, que está localizada nas coordenadas geodésicas 21°14' latitude Sul e 48°16' longitude Oeste, altitude média de 560 m e declividade média de 4%. O solo da área experimental foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico A moderado, textura argilosa e relevo suave ondulado, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (ANDREOLI & CENTURION, 1999).

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é Aw, ou seja, tropical úmido, com estação seca de inverno e temperatura média anual em torno de 22 °C.

Na Tabela 1, é apresentada a análise granulométrica do solo da área experimental, para profundidade de 0 a 0,30 m.

Tabela 1. Análise granulométrica simples de um LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico típico A moderado, textura argilosa, da área experimental, em Jaboticabal, SP.

CAMADA (m)	Argila	Limo	Areia		Classe
			Fina	Grossa	
0 - 0,30	g kg⁻¹				Argiloso
	500	250	125	125	

2 Delineamento experimental

Para a realização do experimento, adotou-se um esquema fatorial 2x2 conduzido sob delineamento inteiramente casualizado, com quatro tratamentos e cinco repetições, totalizando vinte parcelas amostrais. Os tratamentos foram constituídos por dois teores de água do solo (26,2 e 21,9%) e por duas profundidades de escarificação (0,20 e 0,30 m).

Cada parcela ocupou uma área útil de 200 m², sendo 40 m de comprimento x 5 m de largura. Entre as parcelas, foi deixada, no sentido longitudinal, uma distância de 20 m, a qual foi destinada a manobras e estabilização da velocidade de deslocamento do conjunto trator-escarificador (Figura 1).

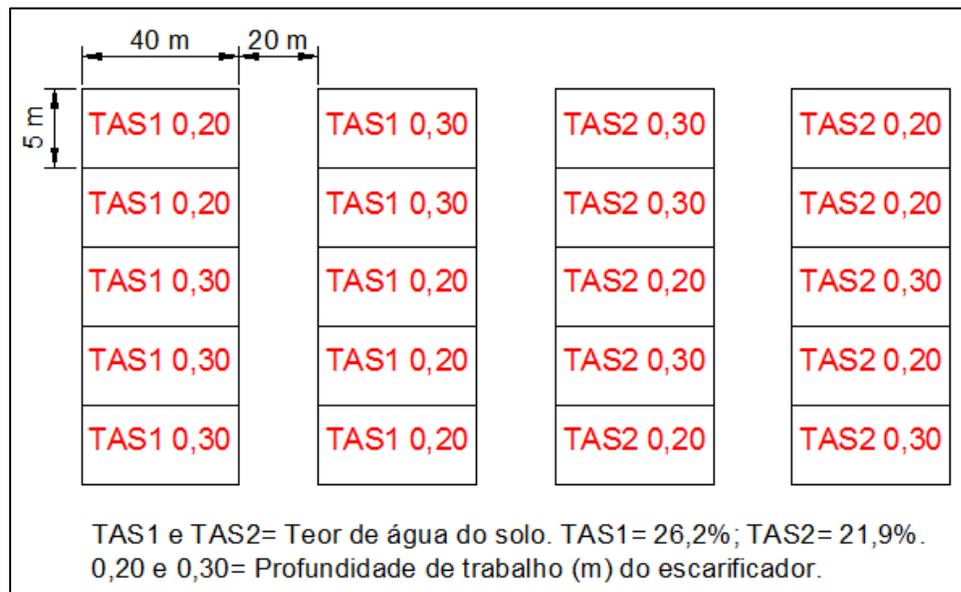


Figura 1. Croqui da área experimental e distribuição das parcelas no campo.

Na área experimental, anteriormente, foi colhido milho e encontrava-se em pousio, sem a presença de plantas daninhas, porém, com massa seca residual de milho em torno de 3 t ha⁻¹.

3 Equipamentos utilizados

3.1 Trator

Foi utilizado um trator da marca Valtra, modelo BM 125i (Figura 2), 4x2 TDA, com potência máxima no motor de 91,9 kW (125 cv) a 2300 rpm, com pneus dianteiros Firestone Super All Traction 14.9 - 26 R1, 6 lonas, com pressão de insuflagem de 137,9 kPa (20 psi); e traseiros Goodyear Gyna Torque III 23.1 - 30 R1, 12 lonas, com pressão de insuflagem de 165,5 kPa (24 psi). A bitola dianteira é de 1,85 m e a traseira, 1,66 m.



Figura 2. Trator Valtra BM 125i.

O trator possui massa de 6.454 kg, distribuídas da seguinte forma: 42% sobre o eixo dianteiro e 58% sobre o eixo traseiro, com $51,6 \text{ kg cv}^{-1}$ (relação massa/potência). Está lastrado com água até 75% nos pneus dianteiros e traseiros, e elementos metálicos, sendo 5 elos frontais com massa de 35 kg e mais 6 elos com massa de 37,5 kg para os pneus dianteiros, e 5 anéis laterais com massa de 70 kg em cada pneu traseiro, acoplados no centro da roda. O trator trabalhou na marcha 2^aL a 2100 rpm.

3.2 Escarificador

Foi utilizado um escarificador de arrasto da marca Marchesan, modelo AST/MATIC 450, com massa total de 1.400 kg (Figura 3a). Esse equipamento é constituído por sete hastes espaçadas entre si em 0,45 m, com ponteira sem asa com 0,07 m de largura, o que habilita o trabalho em profundidades de até 0,49 m, pois se considera que a profundidade máxima de trabalho deve ser de 5 a 7 vezes a largura da ponteira. A largura útil de trabalho do escarificador é de 3,15 m, e este está equipado com discos de corte de palha para cada haste com diâmetro de 0,457 m (18 pol), sistema de segurança de desarme automático e rolo destorroador. As profundidades de trabalho foram 0,20 e 0,30 m. O controle de profundidade se deu pelos pneus do escarificador, com o auxílio de anéis presos ao pistão hidráulico (Figura 3b).



(a)



(b)

Figura 3. Escarificador de sete hastes (a) e detalhe da regulação da profundidade de trabalho por anéis (b).

3.3 Desempenho operacional do conjunto trator-escarificador

3.3.1 Aquisição de dados

Para realizar a aquisição e armazenamento dos dados referentes às variáveis velocidade de deslocamento, consumo de combustível e força de tração, analisadas durante a condução do experimento, foi utilizado um sistema composto por *Micrologger* CR23X produzido pela Campbell Scientific Inc (Figura 4), programado para obter dados na frequência de 1 Hz, sendo posteriormente transferidos via porta de comunicação serial para um computador, a fim de serem processados. Os sensores foram alimentados por uma bateria auxiliar montada assessoramente ao sistema.



Figura 4. *Micrologger* CR23X.

3.3.2 Velocidade de deslocamento

A velocidade real de deslocamento foi mensurada por meio de um radar, marca Dick John, modelo RVS II, com erro de $\pm 3\%$ para velocidades de 3,2 a 70,8 km h⁻¹, instalado na lateral do trator, fazendo ângulo de 45° com a superfície do solo (Figura 5), conforme recomendação do fabricante. O radar trabalha à frequência de 1 Hz.

Considerou-se como velocidade real de deslocamento, a média obtida pelo radar no momento em que o trator estava em operação na parcela experimental. Os valores de velocidade foram obtidos em m h^{-1} e convertidos para km h^{-1} .



Figura 5. Radar Dick John, alinhado com ângulo de 45° em relação ao solo.

3.3.3 Consumo de combustível

Para determinação do consumo de combustível, utilizou-se um sistema composto de dois conjuntos de medição, sendo um para a alimentação da bomba injetora e o outro de retorno, obtendo-se o volume realmente utilizado pelo trator durante o percurso. Cada conjunto contém um medidor de fluxo, marca Oval M – III, modelo LSF41 (Figura 6). Os valores de fluxo de combustível foram obtidos em mL.

De posse desses dados, determinaram-se o consumo horário, por volume de solo trabalhado e operacional.



Figura 6. Medidor de fluxo de combustível Oval M – III, modelo LSF41.

3.3.3.1 Consumo horário

Com base no volume consumido e no tempo de percurso em cada parcela, foi determinado o consumo de combustível horário (Equação 1):

$$Ch = \left(\frac{Va - Vr}{t} \right) \times 3,6 \quad (1)$$

em que,

Ch = consumo de combustível horário ($L h^{-1}$);

Va = volume de alimentação de combustível na entrada da bomba injetora (mL);

Vr = volume total retornado dos bicos e da bomba injetora (mL);

t = tempo de percurso na parcela (s); e

3,6 = fator de conversão.

3.3.3.2 Consumo por volume de solo trabalhado

Com os dados do volume de combustível consumido e do comprimento da parcela, e da largura e profundidade de trabalho do escarificador, foi determinado o consumo de combustível por volume de solo trabalhado (Equação 2):

$$Cvt = \left(\frac{Va - Vr}{Le \times Cp \times Pe} \right) \quad (2)$$

em que,

Cvt = consumo de combustível por volume de solo trabalhado (mL m^{-3});

Va = volume de alimentação de combustível na entrada da bomba injetora (mL);

Vr = volume total retornado dos bicos e da bomba injetora (mL);

Le = largura útil de trabalho do escarificador (m);

Cp = comprimento da parcela experimental (m); e

Pe = profundidade de trabalho do escarificador (m).

3.3.3.3 Consumo operacional

O consumo de combustível operacional foi calculado com base no consumo horário e na capacidade de campo operacional, sendo expresso em L ha^{-1} (Equação 3):

$$Co = \frac{Ch}{Cco} \quad (3)$$

em que,

Co = consumo de combustível operacional (L ha^{-1});

Ch = consumo de combustível horário (L h^{-1}); e

Cco = capacidade de campo operacional (ha h^{-1}).

3.3.4 Capacidade de campo operacional

A capacidade de campo operacional foi obtida em função da largura de trabalho do escarificador, da velocidade de deslocamento do conjunto trator-escarificador, e da eficiência da operação, a qual foi adotada para efeito de cálculo como sendo 75% (Equação 4):

$$Cco = \left(\frac{v \times Le}{10} \right) \times e \quad (4)$$

em que,

Cco = capacidade de campo operacional ($ha\ h^{-1}$);

v = velocidade real de deslocamento do conjunto trator-escarificador ($km\ h^{-1}$);

Le = largura útil de trabalho do escarificador (m);

e = eficiência (decimal); e

10 = fator de conversão de unidades.

3.3.5 Força e potência na barra de tração

A força requerida na barra de tração foi medida utilizando-se célula de carga marca Shimizu, modelo TF 400, com capacidade de 100 kN e precisão de $\pm 1\ N$ (Figura 7), instalada sobre um suporte entre a barra de tração do trator e o cabeçalho do escarificador. Para efetivar a medição torna-se necessário retirar o pino da barra de tração. As aquisições foram realizadas a cada segundo. Os dados foram obtidos em kgf e convertidos para kN. De posse dos dados, calculou-se o valor médio da força de tração de cada parcela experimental.

A potência média na barra de tração (kW) foi determinada pelo produto da força (kN) pela velocidade de deslocamento ($m\ s^{-1}$).



Figura 7. Célula de carga Shimizu TF 400.

3.3.6 Patinagem dos rodados dianteiros e traseiros

A patinagem dos rodados dianteiros e traseiros foi determinada da seguinte forma:

1. Marcaram-se com o giz os flancos de um pneu dianteiro e outro traseiro do trator;
2. Com o trator em movimento numa área não trabalhada e com o escarificador levantado, cravaram-se duas balizas (uma para cada pneu) no local onde as marcas de giz dos pneus coincidiram com o solo;
3. Cravaram-se mais duas balizas quando foram completadas 10 voltas de cada pneu;
4. Mediram-se as distâncias percorridas pelos dois pneus (d_0);
5. Repetiu-se os passos 2, 3 e 4, porém agora com o trator em operação nas parcelas experimentais (d_1).

Com os dados obtidos, calculou-se então a patinagem traseira e dianteira (Equação 6):

$$P = \frac{d_0 - d_1}{d_0} \times 100 \quad (6)$$

em que,

P = patinação dos rodados (%);

d_0 = distância percorrida pelas rodas sem carregamento (m); e

d_1 = distância percorrida pelas rodas em operação (m).

3.4 Teor de água do solo

Para a obtenção de dois teores de água diferentes no solo no momento da escarificação, as parcelas do tratamento de 26,2% foram irrigadas com aspersão, dois dias antes da realização do experimento, até o solo chegar próximo à capacidade de campo. As parcelas do tratamento de 21,9% não foram irrigadas, permanecendo na condição de umidade que o solo se encontrava naturalmente.

Foram coletadas amostras de solo em um ponto por parcela no momento da escarificação, para determinação do teor de água do solo, com auxílio de trado holandês, nas profundidades de 0,00-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m. As amostras foram acondicionadas em latas de alumínio e posteriormente levadas para secagem em estufa a 105 °C até obter massa constante, possibilitando o cálculo do teor de água segundo o método gravimétrico padrão descrito em EMBRAPA (1997).

3.5 Densidade do solo

Para a determinação da densidade do solo, foram coletadas amostras indeformadas com cilindros de 90,48 cm³, com bordas cortantes, introduzidos no solo com auxílio de um amostrador (Figura 8) até o preenchimento total do anel, coletadas em um ponto aleatório por parcela, dois dias antes e duas semanas após a escarificação do solo, nas profundidades de 0,00-0,10 m; 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Tomou-se cuidado para evitar retirar amostras onde havia sido passado o rodado do trator e no local de passagem da haste do escarificador. Após a escarificação do solo, e antes da coleta final dos dados de densidade, houve precipitação total no período de 38 mm.



Figura 8. Coleta de amostras de densidade do solo.

As amostras foram levadas para secagem em estufa a 105 °C até obter massa constante, possibilitando o cálculo pela relação entre a massa seca da amostra de solo do cilindro volumétrico e o volume do mesmo cilindro (Equação 7), conforme EMBRAPA (1997):

$$D = \frac{Ms}{Vol} \quad (7)$$

em que,

D = densidade de solo (g cm^{-3});

Ms = massa seca da amostra (g); e

Vol = volume do cilindro (cm^3).

3.6 Resistência mecânica do solo à penetração

Para as medições da resistência mecânica do solo à penetração (RMSP) foi utilizado um penetrômetro eletrônico acoplado a um quadriciclo (Figura 9, TOLEDO et al., 2009), o qual foi desenvolvido pela empresa DLG Automação Industrial Ltda (RIBEIRO, 2010). O penetrômetro modelo PNT-2000/MOTOR possui entrada para GPS e é constituído de célula de carga com capacidade nominal de 150 kgf (1.500 N) para medição da força normal de penetração da haste. O quadriciclo utilizado para acoplar o penetrômetro é da marca Suzuki Motors, modelo LT-F160 QUADRUNNER, que possui massa de 162 kg, motor monocilindro com volume total de 158 cm³, quatro tempos arrefecido a ar, movido à gasolina. A haste utilizada possui ponteira cônica de 71,25 mm² e construída segundo o padrão ASAE S313.3 (ASAE, 1998), que determina as normas para o ensaio. A profundidade máxima de amostragem é de 0,55 m, medida por sensor indutivo-capacitivo com 2 mm de precisão. A velocidade de penetração da haste é de 0,03 m s⁻¹ e a frequência de aquisição de 3 Hz, portanto, os dados foram coletados em intervalos de 0,01 m.



Fonte: TOLEDO et al., 2009.

Figura 9. Penetrômetro eletrônico acoplado a um quadriciclo.

A comunicação com o penetrômetro segue o padrão NMEA-0183. A conexão com o GPS e a transferência dos dados coletados e armazenados no equipamento é feita utilizando-se uma interface serial RS-232. Os dados são descarregados diretamente ao programa de computador fornecido pela fabricante do penetrômetro, denominado PNTView.

Em cada parcela experimental, dois dias antes e duas semanas após a escarificação do solo, foram coletados 3 amostras de RMSP, em pontos aleatórios da parcela, até a profundidade de 0,40 m, para determinação do índice de cone (IC), a cada intervalo de profundidade de 0,05 m. Tomou-se cuidado para evitar retirar amostras onde havia sido passado o rodado do trator e no local de passagem da haste do escarificador. Após a escarificação do solo, e antes da coleta final dos dados de RMSP, houve precipitação total no período de 38 mm.

Tendo em vista que a compactação do solo está diretamente relacionada ao teor de água e ao tipo de solo, durante a coleta dos dados de RMSP, foram coletadas também amostras de solo nas camadas de 0,00-0,10 m; 0,10-0,20 m; 0,20-0,30 m e 0,30-0,40 m, em um ponto por parcela. As amostras foram acondicionadas em latas de alumínio e posteriormente levadas para secagem em estufa a 105 °C até obter massa constante, possibilitando o cálculo do teor de água segundo o método gravimétrico padrão descrito em EMBRAPA (1997). O teor médio de água do solo antes da escarificação foi de 25,1% e depois da escarificação, 22,6%.

4 Análise estatística dos dados

4.1 Análise de variância

O efeito dos fatores principais e de suas interações foram avaliados pela análise de variância (ANOVA) a 5% de probabilidade. Quando o teste F foi significativo, as

médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, com uso do programa estatístico SISVAR 5.3.

4.2 Controle estatístico de processo

A análise da variabilidade do desempenho operacional do conjunto trator-escarificador foi realizada por meio do controle estatístico com auxílio do programa Minitab® 16. As ferramentas utilizadas foram cartas de controle por variáveis (*control charts*), utilizando como indicadores de qualidade as variáveis anteriormente descritas.

O modelo de carta de controle selecionado para análise do estudo foi de Subgrupo Xbar-S (Figura 10), que gera uma carta de controle para as médias dos subgrupos na metade superior do gráfico e uma carta de controle para o desvio-padrão dos subgrupos na metade inferior do gráfico, de modo que possamos examinar o nível e a variação do processo ao mesmo tempo.

As observações foram divididas em subgrupos de tamanho 5 (média de 5 observações), justificado pela frequência com que a coleta da amostra foi realizada, ou seja, a cada 1 segundo coletava-se uma leitura das variáveis analisadas pelo equipamento (*micrologger*) e a cada 5 segundos foi calculado uma média. Foram utilizados quatro estágios, um para cada tratamento avaliado. Os limites de controle foram estabelecidos considerando a variação dos resultados devido a causas não-controladas no processo (causas especiais), tendo sido calculados com base no desvio padrão das variáveis, como demonstrado nas Equações 8 e 9.

$$LSC = \bar{x} + 3\sigma \quad (8)$$

$$LIC = \bar{x} - 3\sigma \quad (9)$$

em que,

LSC = limite superior de controle;

\bar{x} = média geral da variável;

σ = desvio-padrão; e
 LIC = limite inferior de controle.

Quando o cálculo do limite inferior de controle resultou em valores negativos, o mesmo foi considerado com valor nulo (LIC=0), uma vez que para as variáveis em estudo os valores negativos não possuem nenhum significado físico.

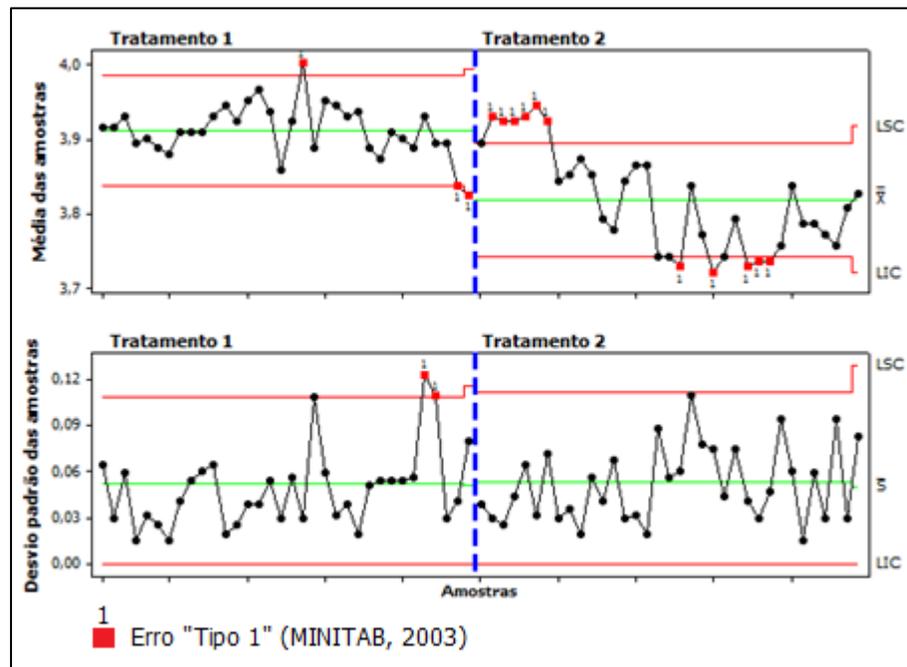


Figura 10. Modelo de carta de controle subgrupo de amplitude móvel.

Para testar as causas especiais, utilizou-se do teste do “*Automotive Industry Action Group*” (AIAG), citado por MINITAB (2003), que gera os erros correspondentes nas cartas de controle. Apesar de o programa e o teste utilizados permitirem a geração de vários tipos de erros, neste trabalho considerou-se somente o erro do “Tipo 1”, que considera como fora dos limites de controle, todo e qualquer ponto maior ou menor que a média, mais três vezes o desvio-padrão.

Neste programa, quando uma observação apresenta falha no teste para causas especiais, o ponto é destacado na carta de controle, indicando variação não-aleatória

nos resultados, considerada como variação devido à ação de causas especiais, indicando que a mesma deve ser investigada.

Quando nenhum ponto é destacado na carta de controle, não há observação falha no processo, ou seja, não existem causas especiais de variação e, conseqüentemente, o processo está sob controle estatístico, caso contrário, o mesmo é considerado fora de controle.

IV RESULTADOS E DISCUSSÃO

1 Análise de variância

1.1 Desempenho operacional do conjunto trator-escarificador

A velocidade de trabalho foi afetada tanto pelo teor de água do solo quanto pela interação deste fator com a profundidade de escarificação (Tabela 2). Os dados foram desdobrados e estão apresentados na Tabela 3. As variáveis relacionadas ao consumo de combustível e a patinagem dos rodados dianteiros foram influenciadas pelo teor de água do solo e pela profundidade de escarificação. A força e a potência na barra de tração aumentaram com a profundidade de trabalho, enquanto que a Cco foi afetada apenas pelo teor de água do solo (Tabela 2).

Quando o solo está mais seco, tende a haver maior atrito com os pneus, causado pela sustentação do solo, fazendo com que o conjunto trator-escarificador desloque-se com maior velocidade do que quando o solo está mais úmido, mantendo-se à mesma marcha e rotação de trabalho, fato este observado para a profundidade de 0,30 m (Tabela 3). O solo mais úmido pode deixar o rodado aprofundar mais e assim aumentar a resistência ao rolamento, diminuindo a velocidade de trabalho. Este fato também foi observado por SASAKI & GONÇALVES (2005), que trabalharam com subsolador de haste única em três tipos de LATOSSOLO VERMELHO, de textura média, argilosa e muito argilosa. Na menor profundidade, o teor de água do solo não alterou a velocidade de trabalho.

Para o teor de água de 26,2%, a velocidade foi maior na profundidade mais superficial, devido à menor resistência oferecida pelo equipamento de hastes. Para o teor de 21,9%, este fato não foi observado.

Tabela 2. Análise de variância e teste de médias para velocidade de trabalho; consumo horário de combustível, por volume de solo trabalhado e operacional; capacidade de campo operacional; força e potência na barra de tração; e patinagem traseira e dianteira.

FATORES	Velocidade (km h ⁻¹)	Consumo de combustível			Força de tração (kN)	Potência na barra (kW)	Cco ¹ (ha h ⁻¹)	Patinagem	
		Horário (L h ⁻¹)	Volume trabalhado (mL m ⁻³)	Operacional (L ha ⁻¹)				Traseira (%)	Dianteira (%)
Teor de água do solo (T)									
26,2%	3,86	10,50 b	3,46 b	11,76 b	18,98 a	19,50 a	0,89 a	8,31 a	7,95 b
21,9%	3,94	10,01 a	3,09 a	11,00 a	17,83 a	20,36 a	0,91 b	7,27 a	7,20 a
Profundidade de trabalho (P)									
0,20 m	3,92	10,00 a	3,76 b	11,03 a	17,40 a	18,94 a	0,91 a	7,86 a	6,85 a
0,30 m	3,88	10,51 b	2,79 a	11,72 b	19,42 b	20,92 b	0,90 a	7,71 a	8,30 b
Teste de F									
T	8,692*	4,551*	10,590*	7,511*	2,052 ^{ns}	1,135 ^{ns}	4,723*	2,282 ^{ns}	4,561*
P	2,292 ^{ns}	5,005*	73,574*	6,232*	6,443*	5,966*	2,410 ^{ns}	0,051 ^{ns}	16,702*
T x P	4,629*	0,028 ^{ns}	2,207 ^{ns}	0,195 ^{ns}	0,798 ^{ns}	0,335 ^{ns}	3,470 ^{ns}	1,283 ^{ns}	3,430 ^{ns}
CV (%)	1,44	5,04	7,73	5,47	9,73	9,09	1,60	19,74	10,41

Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesmas letras não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo; *Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste de F. CV (%): coeficiente de variação. ¹: Capacidade de campo operacional.

Tabela 3. Desdobramento da interação entre os fatores teor de água do solo e profundidade de trabalho para a variável velocidade de trabalho.

	Teor de água do solo (%)	
	26,2	21,9
Profundidade de trabalho		
0,20 m	3,91 A b	3,93 A a
0,30 m	3,81 A a	3,95 B a

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O consumo horário de combustível (Tabela 2) foi 4,8% superior quando o teor de água do solo aumentou. Esses resultados discordam dos observados por REIS et al. (2002), que não obtiveram diferenças em trabalho com duas semeadoras-adubadoras na cultura do milho, com 4 teores de água do solo em ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO, com textura argilosa. Para o fator profundidade de trabalho, o consumo horário de combustível aumentou 5% quando a profundidade passou de 0,20 para 0,30 m, devido ao aumento da área mobilizada do solo pelas hastes escarificadoras.

O consumo por volume de solo trabalhado foi maior quando se aumentou o teor de água do solo, como aconteceu com o consumo horário. Para o fator profundidade de trabalho, o comportamento foi de forma inversa ao consumo horário. Na profundidade de trabalho de 0,30 m, têm-se menor consumo de combustível, ocorrido pela diluição em função do maior volume de solo trabalhado.

O consumo operacional diferiu para os fatores teor de água do solo e profundidade de trabalho, semelhante ao que aconteceu com o consumo horário. Como o consumo operacional é função da capacidade de campo operacional (Cco), observa-se que ao aumento no teor de água do solo reduziu a Cco, aumentando o consumo operacional. Para a profundidade de trabalho, houve maior consumo para a profundidade de 0,30 m, em função da maior força de tração exigida pelo equipamento de hastes para vencer a resistência oferecida pelo solo.

A força de tração não apresentou diferença para o teor de água do solo, obtendo valor médio de 18,41 kN, pois a força de coesão das partículas do solo não é influenciada pelo teor de água em solos argilosos. O aumento da profundidade de trabalho fez com que o escarificador exigisse 11,6% a mais de força na barra de tração, evidenciando o efeito da resistência do solo sobre o equipamento de hastes. FERNANDES & GAMERO (2010) trabalharam com escarificador de 7 hastes conjugado com discos de cortes flutuantes em trator de 89 kW, com teor de água do solo de 29,6% e profundidade de trabalho de 0,15 m, na implantação da cultura do girassol e encontraram valores de força de tração de 41,6 kN, em NITOSSOLO VERMELHO Distroférico típico A moderado, textura argilosa. Os valores de força de tração encontrados por esses autores foram 126% superiores, pois trabalharam em área com onze anos de plantio direto, diferente da área do presente experimento que foi preparada anteriormente com grade pesada para a implantação da cultura do milho no ano anterior.

A potência na barra de tração apresentou comportamento semelhante à força de tração, ou seja, houve diferença no fator profundidade de trabalho, sendo que o aumento da profundidade exigiu maior potência. O teor de água no solo não alterou a potência, exigindo demanda média do trator de 19,9 kW. SALVADOR et al. (2008), trabalhando com subsolador de 3 hastes em NITOSSOLO VERMELHO Distroférico textura argilosa, em condição de solo escarificado, obtiveram valores de potência na barra de tração da ordem de 19,0 kW. Apesar de haver diferenças para a profundidade de trabalho, esse valor foi inferior à 2 kW, quando comparadas as médias, o que, para o trator que estava tracionando o escarificador, que possui 91,9 kW de potência máxima no motor, pode ser considerada como irrisório.

Para a Cco, houve diferença somente para o teor de água do solo, sendo maior quando o solo estava mais seco e na profundidade de trabalho de 0,30 m, fato esse explicado pela maior velocidade de deslocamento do conjunto trator-escarificador devido à menor resistência ao rolamento. Para o fator profundidade de trabalho, não houve diferenças.

Quanto à patinação dos rodados, os valores ficaram dentro ou abaixo dos índices preconizados pela ASAE (2003), para solo firme, que é de 8 a 10%, evidenciando que o trator estava com lastro acima do recomendado para o trabalho com escarificador, podendo haver remoção de lastro. Outro fator que pode explicar os valores de patinação é que o equipamento exigiu potência abaixo da que está disponível pelo trator usado no experimento. Os rodados traseiros não sofreram influência tanto do teor de água quanto da profundidade de trabalho. Nos rodados dianteiros, houve diferença, em que o solo com maior teor de água fez com que os pneus patinassem mais, bem como na maior profundidade de trabalho. SALVADOR et al. (2008) afirmam que a menor patinação dos rodados motrizes proporciona menor compactação do solo, menor desgaste dos pneus e dos mecanismos de transmissão, como também reduz os gastos adicionais de combustíveis.

1.2 Densidade do solo

A densidade não foi alterada pelos tratamentos teor de água do solo e profundidade de escarificação, tanto antes como após a escarificação, demonstrando homogeneidade dos tratamentos, não havendo também interações entre os fatores (Tabela 4).

Quanto à camada de amostragem, para o intervalo de 0,00-0,10 m, os valores de densidade foram menores do que para os intervalos de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, tanto antes como após a escarificação.

Como o escarificador desagrega o solo, esperava-se que houvesse diminuição da densidade após a escarificação, o que não ocorreu, concordando com ABREU et al. (2004), que trabalharam com vários manejos em sistema plantio direto em ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico arênico de textura franco-arenosa e observaram que a escarificação não diminuiu a densidade. Os autores atribuem que esse fato deve-se, possivelmente, ao processo de reconsolidação do solo, ocorrido no período entre a mecanização e a determinação dos atributos físicos. BORDIN et al. (2005), que

estudaram o efeito da escarificação no sistema radicular e nos atributos físicos do solo em plantas cítricas em LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico de textura argilosa, também verificaram que a escarificação não alterou a densidade, independente da profundidade de trabalho.

Tabela 4. Análise de variância e teste de médias para densidade do solo.

FATORES	Densidade do solo (g cm ⁻³)	
	Antes escarificação	Após escarificação
Teor de água do solo (T)		
26,2%	1,41 a	1,41 a
21,9%	1,40 a	1,38 a
Profundidade de trabalho (P)		
0,20 m	1,39 a	1,40 a
0,30 m	1,42 a	1,39 a
Camada de amostragem (C)		
0,00-0,10 m	1,31 a	1,26 a
0,10-0,20 m	1,45 b	1,45 b
0,20-0,30 m	1,45 b	1,48 b
Teste de F		
T	0,130 ^{ns}	3,385 ^{ns}
P	2,903 ^{ns}	0,918 ^{ns}
C	21,195*	62,850*
T x P	2,078 ^{ns}	0,037 ^{ns}
T x C	0,041 ^{ns}	1,089 ^{ns}
P x C	0,123 ^{ns}	1,809 ^{ns}
T x P x C	0,443 ^{ns}	0,363 ^{ns}
CV (%)	5,61	4,83

Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesmas letras não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo; *Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste de F. CV (%): coeficiente de variação.

Observando os valores médios para todos os tratamentos, REINERT et al. (2001) consideram como não limitantes ao desenvolvimento de raízes de plantas para solos com teor de argila entre 20 e 55%.

1.3 Resistência mecânica do solo à penetração

Na Tabela 5, são apresentados os valores do índice de cone (IC), que representam a resistência mecânica do solo à penetração média a cada 0,05 m de profundidade.

Antes da escarificação, pode-se verificar que o teor de água do solo e a camada de amostragem afetaram o IC. Também houve interação entre os fatores teor de água do solo e profundidade de trabalho, sendo os dados desdobrados na Tabela 6.

Esperava-se que antes da escarificação as camadas estivessem homogêneas, porém houve aumento do IC quando se aumentou a profundidade de amostragem.

Analisando os dados do desdobramento entre os fatores teor de água do solo e profundidade de trabalho antes da escarificação (Tabela 6), nota-se que para a profundidade de 0,20 m, os teores de água do solo não alteraram o IC, porém, para a profundidade de 0,30 m, o aumento do teor de água do solo aumentou o IC, fato que pode ter acontecido pela maior compactação do solo desta camada nas parcelas experimentais do tratamento de 26,2%.

Observando os teores de água, para 26,2%, ao aumentar a profundidade de trabalho, aumentou-se também o IC, e para o teor de 21,9%, ocorreu o contrário, fato que pode ter acontecido por características das parcelas experimentais.

Tabela 5. Análise de variância e teste de médias para índice de cone.

FATORES	Índice de cone (MPa)	
	Antes escarificação	Após escarificação
Teor de água do solo (T)		
26,2%	1,80	1,86 a
21,9%	1,56	2,05 b
Profundidade de trabalho (P)		
0,20 m	1,65	1,96 a
0,30 m	1,71	1,95 a
Camada de amostragem (C)		
0,00-0,05 m	0,44 a	0,79 a
0,05-0,10 m	1,14 b	1,16 a
0,10-0,15 m	1,18 b	1,29 a
0,15-0,20 m	1,49 b c	1,90 b
0,20-0,25 m	1,78 c d	2,25 b c
0,25-0,30 m	2,08 d e	2,47 c d
0,30-0,35 m	2,49 e f	2,79 d
0,35-0,40 m	2,81 f	2,98 d
Teste de F		
T	10,851*	4,741*
P	0,543 ^{ns}	0,043 ^{ns}
C	55,154*	44,949*
T x P	13,594*	3,865 ^{ns}
T x C	1,102 ^{ns}	0,741 ^{ns}
P x C	0,735 ^{ns}	0,927 ^{ns}
T x P x C	1,531 ^{ns}	0,057 ^{ns}
CV (%)	27,82	27,56

Em cada coluna, para cada fator, médias seguidas de mesmas letras não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. ^{ns}Não significativo; *Significativo a 5% de probabilidade, pelo teste de F. CV (%): coeficiente de variação.

Tabela 6. Desdobramento da interação entre os fatores teor de água do solo e profundidade de trabalho para a variável índice de cone antes da escarificação.

	Teor de água do solo (%)	
	26,2	21,9
Profundidade de trabalho		
0,20 m	1,64 A a	1,67 A a
0,30 m	1,96 B b	1,45 A b

Médias seguidas de mesmas letras maiúsculas nas linhas e minúsculas nas colunas não diferem entre si, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Após a escarificação (Tabela 5), pode-se verificar que o teor de água do solo e a camada de amostragem afetaram o IC, o que não aconteceu com a profundidade de trabalho, não havendo interação entre nenhum dos fatores avaliados. O solo mais seco apresentou maiores valores, evidenciando que com o aumento do teor de água, decresce a atuação das forças de coesão entre as partículas do solo e o atrito interno, provocando, então, a diminuição da resistência mecânica do solo à penetração (CUNHA et al., 2002).

Para a camada de amostragem, observa-se que até a profundidade de 0,30 m, a qual houve ação das hastes do escarificador, valores de IC abaixo de 2,5 MPa. Após a camada de 0,30 m, há aumento dos valores de RMSF para acima de 2,5 MPa, o que pode trazer problemas de impedimento para o desenvolvimento de plantas que possuem raízes mais profundas.

Observa-se ainda, comparando valores de antes e após a escarificação (Tabela 5), que depois da escarificação, os valores do IC são maiores que antes, para os mesmos fatores. Isto se deu pelo fato de o solo estar com menor teor de água na coleta dos dados de RMSF depois da escarificação (22,6% após a escarificação, contra 25,1% antes da escarificação). Esses valores de IC podem ter sido superestimados devido ao menor teor de água no momento da coleta dos dados com o penetrômetro, já que,

segundo PEDROTTI et al. (2001), valores mais elevados de RMSD ocorrem por ocasião de menores conteúdos de água no solo.

Todos os dados de índice de cone obtidos neste experimento estão classificados como baixos ou médios (RIBEIRO, 2010).

2 Controle estatístico de processo

A variabilidade da velocidade de trabalho entre os tratamentos foi praticamente a mesma, o que pode ser constatado pela variação similar entre os limites de controle em cada tratamento (Figura 11). Há ocorrência de pontos fora de controle para todos os tratamentos, o que caracterizou instabilidade na velocidade de trabalho para estas condições. Esta instabilidade é observada tanto para as médias quanto para a variação do processo, representada nas cartas de desvio-padrão. Para os tratamentos que trabalharam com profundidade de 0,20 m, houve menor quantidade de pontos fora de controle (26,2% - 0,20 m; 21,9% - 0,20 m).

Para o maior teor de água e maior profundidade de trabalho (26,2% - 0,30 m), houve queda na velocidade ao longo das parcelas experimentais. O solo mais úmido pode deixar o rodado aprofundar mais e assim aumentar a resistência ao rolamento, diminuindo a velocidade de trabalho, fato também foi observado por SASAKI & GONÇALVES (2005).

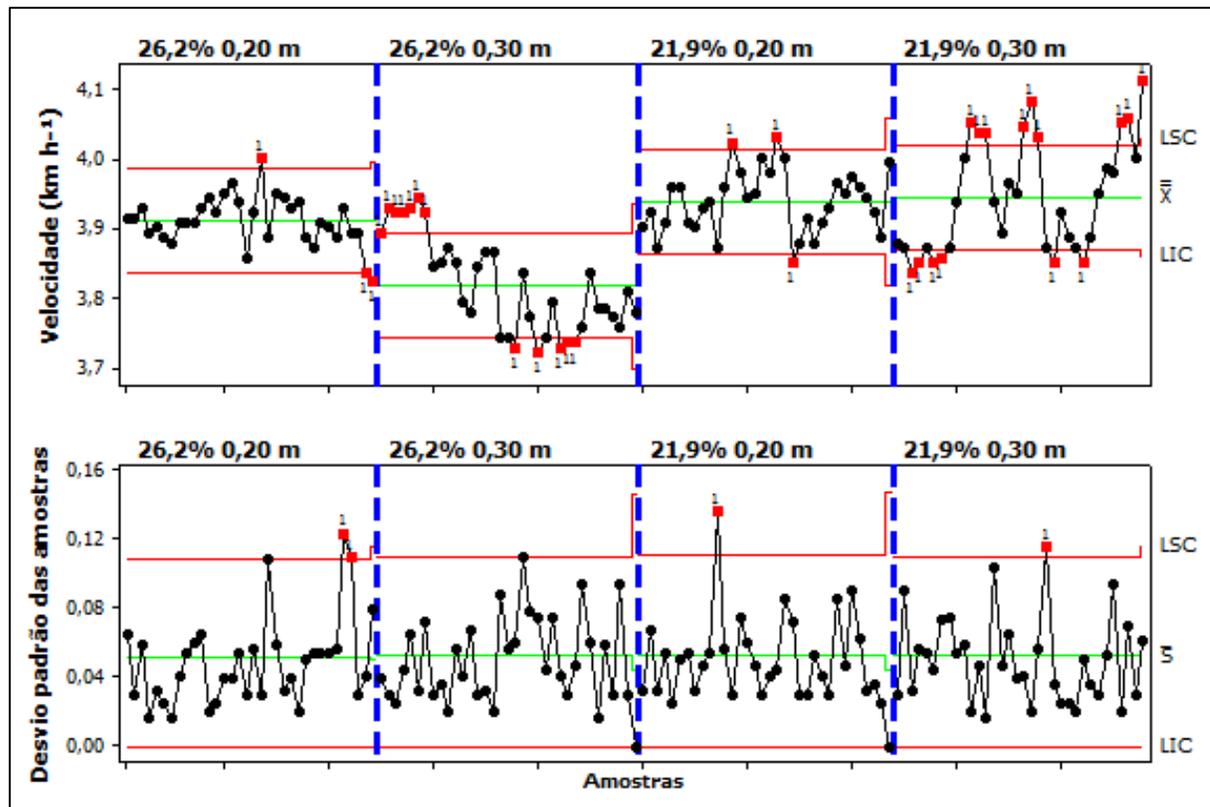


Figura 11. Cartas de controle para velocidade de trabalho.

Para o consumo horário de combustível (Figura 12), houve uniformidade na distribuição dos resultados para todos os tratamentos, não havendo pontos fora dos limites de controle nas cartas de valores médios, caracterizando um processo estável, ou seja, sujeito apenas à ação de causas comuns. Entretanto, para as cartas de desvio padrão das amostras, houve a ocorrência de um ponto fora dos limites de controle para o maior teor de água e maior profundidade de trabalho (26,2% - 0,30 m), o que poderia caracterizar a instabilidade do consumo de combustível nestas condições. Porém, a existência deste ponto pode estar relacionado à ocorrência de algum ponto discrepante na amostra. Houve menor variabilidade para o maior teor de água e maior profundidade de trabalho (26,2% - 0,30 m).

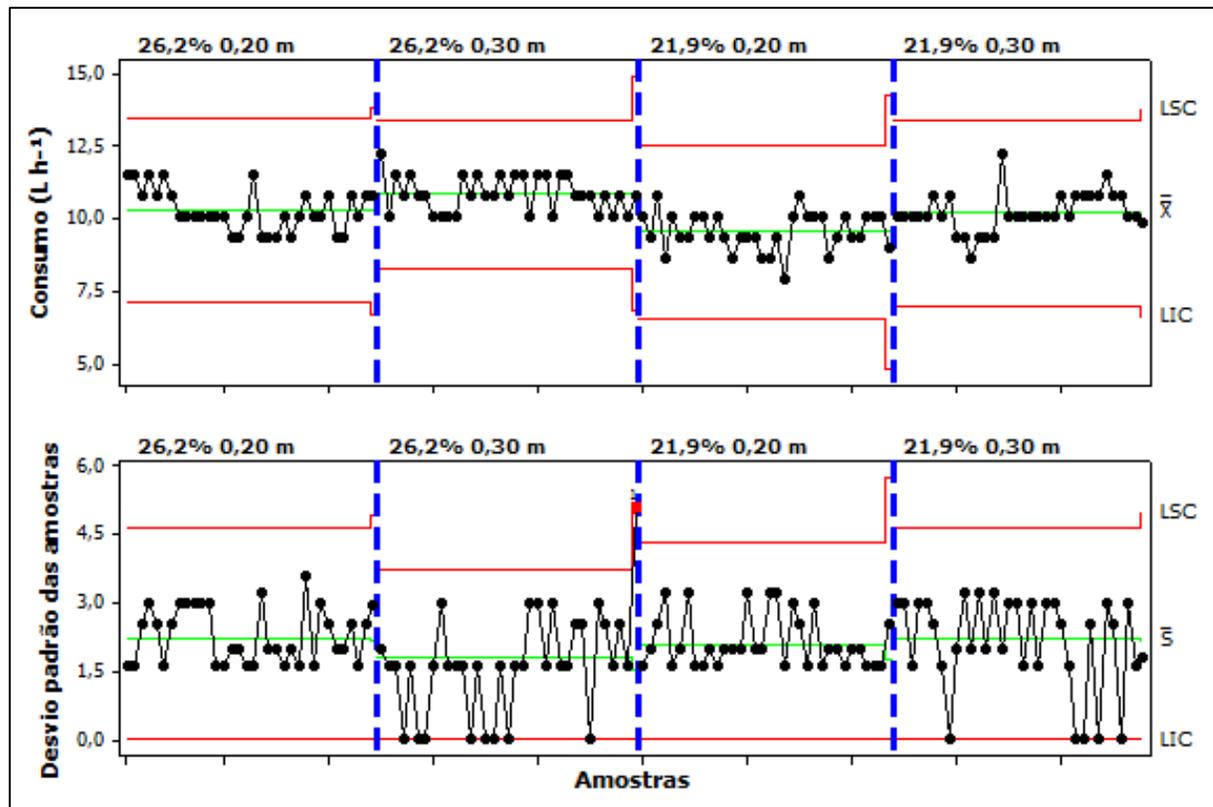


Figura 12. Cartas de controle para consumo de combustível horário.

Para a variável força de tração (Figura 13), a variabilidade entre os tratamentos foi praticamente a mesma, com ocorrência de pontos fora de controle para todos os tratamentos, caracterizando instabilidade da força de tração para as condições dos tratamentos. Para o maior teor de água e maior profundidade de trabalho (26,2% - 0,30 m), houve aumento da força de tração ao longo das parcelas amostrais. Para o menor teor de água e maior profundidade de trabalho (21,9% - 0,30 m), houve acentuada queda da força de tração durante um período do processo, caracterizando a existência de causas especiais, o que pode ter ocorrido pela menor resistência do solo em uma das parcelas amostrais.

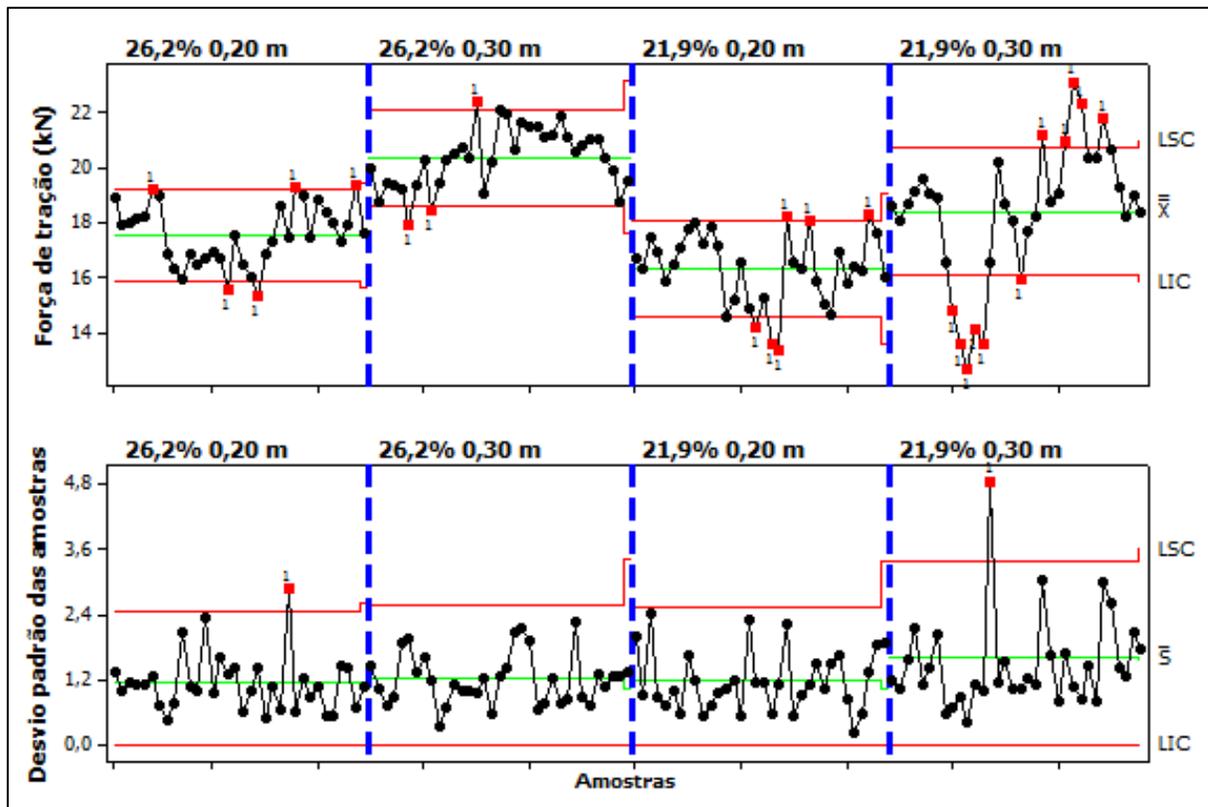


Figura 13. Cartas de controle para força de tração.

A potência na barra de tração (Figura 14) apresentou maior variabilidade para o menor teor de água e maior profundidade (21,9% - 0,30 m). Para os outros tratamentos, a variabilidade foi praticamente igual. Houve pontos fora de controle para todos os tratamentos, caracterizando instabilidade no processo para a potência na barra de tração. Como também ocorreu para a força de tração, no menor teor de água e maior profundidade de trabalho (21,9% - 0,30 m) houve uma acentuada queda da potência na barra de tração durante um período do processo. No maior teor de água do solo e maior profundidade de trabalho (26,2% - 0,30 m) observaram-se as maiores médias para potência na barra de tração, consumindo assim mais combustível nesse tratamento (Figura 12, 26,2% - 0,30 m).

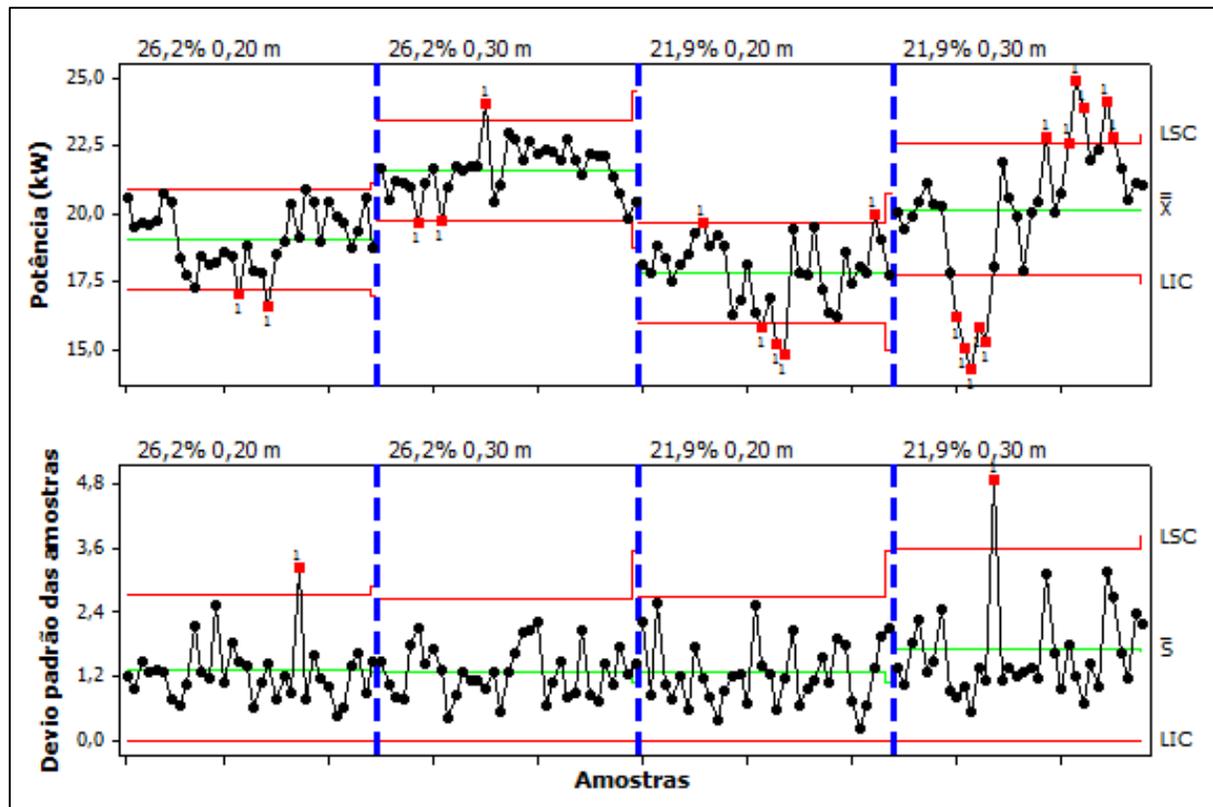


Figura 14. Cartas de controle para potência na barra de tração.

V CONCLUSÕES

O aumento do teor de água no solo proporcionou ao conjunto trator-escarificador menor consumo horário de combustível, menor patinação dos rodados dianteiros, menor capacidade de campo operacional e maior consumo de combustível operacional.

A maior profundidade de trabalho do escarificador aumentou o consumo horário e operacional de combustível, força de tração e potência na barra e patinação dos rodados dianteiros.

O teor de água e o aumento da profundidade de escarificação não reduziram a densidade do solo.

A velocidade de trabalho, o consumo de combustível horário, e a força e potência na barra de tração apresentaram comportamento instável em relação ao controle estatístico de processo.

VI REFERÊNCIAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 519-531, 2004.

ALMEIDA, C. X.; CENTURION, J. F.; FREDDI, O. S.; JORGE, R. F.; BARBOSA, J. C. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2235-2243, 2008.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Soil cone penetrometer. In: ASAE, **Standard S313.2**. St. Joseph, 1998.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Terminology and definitions for agricultural tillage implements. In: ASAE, **Standards 2003**: standards engineering practices data. St. Joseph, 2003. p. 373-380.

ANDREOLI, I.; CENTURION, J. F. Levantamento detalhado dos solos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 27, Brasília, 1999. **Anais...**, Brasília, Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 1999. 32p. (T025-3 CD-ROM)

BENGOUGH, A. G.; CAMPBELL, D. J.; O'SULLIVAN, M. F. Penetrometer techniques in relation to soil compaction and root growth. In: SMITH, K. A.; MULLINS, C. E. **Soil and environment analysis: Physical methods**. 2.ed. New York: Marcel Decher, 2001. p. 377-403.

BENTIVENHA, S. R. P.; GONÇALVES, J. L. M.; SASAKI, C. M. Mobilização do solo e crescimento inicial do eucalipto em função do tipo de haste subsoladora, profundidade

de trabalho e características do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 23, n. 3, p. 588-605, 2003.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; FREDDI, O. S.; SOUZA NETO, E. L.; LEONEL, C. L.; SILVA, A. P. Traffic soil compaction of an oxisol related to soybean development and yield. **Scientia Agrícola**, v. 64, n. 6, p. 608-615, 2007a.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. C.; LEONEL, C. L.; SÃO JOÃO, A. C. G.; FREDDI, O. S. Intervalo hídrico ótimo no monitoramento da compactação e da qualidade física de um latossolo vermelho cultivado com soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1223-1232, 2007b.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; SILVA, L. M. Utilização dos penetrômetros de impacto e de anel dinamométrico em latossolos. **Engenharia Agrícola**, v. 22, n. 2, p. 191-199, 2002.

BIANCHINI, A.; SABINO, M. H. C.; BORGES, P. H. M.; SGUAREZI, J. J. Comportamento operacional de um escarificador de hastes parabólicas em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, p. 395-401, 1999.

BONINI, A. K. **Compactação de um latossolo vermelho distroférico sob sistema plantio direto e rendimento de grãos de trigo, soja e milho**. 2006. 111 f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.

BORDIN, I.; NEVES, C. S. V. J.; AIDA, F. T.; SOUZA, W. R.; DAVOGLIO JÚNIOR, A. C.; FURLANETO, T. L. R.; TAVARES FILHO, J. Sistema radicular de planta cítrica e

atributos físicos do solo em um latossolo argiloso submetido à escarificação. **Ciência Rural**, v. 35, n. 4, p. 820-825, 2005.

CAMARA, R. K. **Influência da escarificação do solo sob sistema plantio direto nas propriedades do solo e na cultura da soja**. 2004. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2004.

CARBONERA, L. **Comparação entre diferentes penetrômetros para diagnósticos de compactação de solo**. 2007. 19 f. Relatório (Projeto de iniciação científica - PIBIQ) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007. Disponível em: <www.ler.esalq.usp.br/download/gmap/iniciacao/Lucelha.pdf>. Acesso em: 10 de mar. 2012.

CARVALHO FILHO, A.; CENTURION, J. F.; SILVA, R. P.; FURLANI, C. E. A.; CARVALHO, L. C. C. Métodos de preparo do solo: alterações na rugosidade do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 01, p. 229-237, 2007.

CASTRO FILHO, C.; HENKLAIN, J. C.; VIEIRA, M. J.; CASÃO JÚNIOR, R. Tillage methods and soil and water conservation in southern Brazil. **Soil Tillage Research**, v. 20, p. 271-83, 1991.

CORTIVO, Z. D. **Aplicação do controle estatístico de processo em sequências curtas de produção e análise estatística de processo através do planejamento econômico**. 2005. 151 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Paraná, 2005.

CUNHA, J. P. A. R.; VIEIRA, L. B.; MAGALHÃES, A. C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. **Engenharia na Agricultura**, v. 10, n. 1-4, p. 1-7, 2002.

DE VRIES, A.; RENEAU, J. K. Application of statistical process control charts to monitor changes in animal production systems. **Journal of Animal Science**, v. 88, suppl., p. 11-24, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise do solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212 p.

FERNANDES, J. C.; GAMERO, C. A. Avaliação do desempenho das máquinas agrícolas na implantação da cultura do girassol. **Energia na Agricultura**, v. 25, n. 2, p. 74-87, 2010.

FREDDI, O. S.; CARVALHO, M. P.; VERONESI JÚNIOR, V.; CARVALHO, G. J. Produtividade do milho relacionada com a resistência mecânica à penetração do solo sob preparo convencional. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 1, p. 113-121, 2006.

GABRIEL FILHO, A.; LANÇAS, K. P.; GUERRA, S. P.; PAULA, C. A.; MONTEIRO, L. A. Umeb - unidade móvel para ensaio da barra de tração. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 4, p. 782-789, 2008.

GABRIEL FILHO, A.; PESSOA, A. C. S.; STROHHAECKER, L.; HELMICH, J. J. Preparo convencional e cultivo mínimo do solo na cultura da mandioca em condições de adubação verde com ervilhaca e aveia. **Ciência Rural**, v. 30, p. 953-957, 2000.

GOMES, A. S.; PEÑA, Y.A. Caracterização da compactação através do uso do penetrômetro. **Lavoura Arrozeira**, v. 49, n. 1, p. 18-20, 1996.

KICHLER, C. M. et al. Spatially monitoring tractor performance to evaluate energy requirements of variable depth tillage and implement selection. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING., 2007, Minneapolis, **Proceedings...** St. Joseph: ASABE, 2007. Paper Number: 071028.

KLEIN, V. A. **Desenvolvimento de haste para escarificação em área sob sistema plantio direto**. 1990. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1990.

LEVIEN, R.; GAMERO, C. A.; FURLANI, C. E. A. Preparo convencional e reduzido em solo argiloso em diferentes condições de cobertura de inverno. **Engenharia Agrícola**, v. 23, n. 2, p. 277-289, 2003.

MACHADO, A. L. T.; REIS, A. V.; MORAES, M. L. B.; ALONÇO, A. S. **Máquinas de preparo do solo, semeadura, adubação e tratamentos culturais**. 2ª ed. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária-UFPel, 2005. 253 p.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A.; CARMO, C. A. F. S.; MEIRELLES, M. S. P.; MANZATTO, C. V. Estudo de caso em agricultura de precisão: manejo de lavoura de soja na região de campos gerais, PR. In: MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SILVA, C. A. **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2004. p. 93-113.

MACMILLAN, R. H. **The mechanics of tractor – implement performance: theory and worked examples**. Melbourne, 2002. 165 p.

MERCANTE, E.; URIBE-OPAZO, M. A.; SOUZA, E. G. Variabilidade espacial e temporal da resistência mecânica do solo à penetração em áreas com e sem manejo químico localizado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 1149-1159, 2003.

MINITAB. (2003). **Minitab Release 14.1: Meet Minitab 14** (Versão em Português), Minitab StatGuide; Minitab Help. [S.l]: Minitab Inc., 2003.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. 4ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 513 p.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E. A.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M. M.; DIAS JUNIOR, M. S.; GOMES, A. S.; TURATTI, A. L. Resistência mecânica à penetração de um planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 521-529, 2001.

PIRES, V. T. **Implantação do Controle Estatístico de Processos em uma empresa de manufatura de óleo de arroz**. 2000. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

RAPER, R. L.; REEVES, D. W.; SHAW, J. N.; VAN SANTEN, E.; MASK, P. L. Site-specific subsoiling benefits for cotton production. **ASABE**, ASAE Paper 051025, 2005.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERRETA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49-134.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. Propriedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; ROSA, G. M.; CERETTA, C. A. **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, 2001, p. 114-133.

REIS, E. F.; VIEIRA, L. B.; SOUZA, C. M.; SCHAEFER, C. E. G. R.; FERNANDES, H. C. Avaliação do desempenho de duas semeadoras-adubadoras de plantio direto em diferentes teores de água em um solo argiloso. **Engenharia na Agricultura**, v. 10, n. 1-4, p. 61-8, 2002.

RIBEIRO, C. A. **Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração em áreas mecanizadas de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*)**. 2010. 69 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

RÍPOLI, T. C.; MIALHE, L. G.; NAKAMURA, R. T. **Subsolagem e subsoladores**. Piracicaba: Centro Acadêmico Luiz de Queiroz, Departamento Editorial, 1985. 34 p.

SAHU, R. K.; RAHEMAN, H. An approach for draft prediction of combination tillage implements in sandy clay loam soil. **Soil Tillage Research**, v. 90, p. 145-155, 2006.

SALVADOR, N.; BENEZ, S. H.; MION, R. L. Consumo de combustível na operação de subsolagem realizada antes e depois de diferentes sistemas de preparo periódico do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 2, p. 256-62, 2008.

SALVADOR, N.; MION, R. L.; BENEZ, S. H. Requerimento energético e desagregação do solo em diferentes sistemas de preparo periódico num latossolo vermelho amarelo. **Engenharia na Agricultura**, v. 6, n. 4, p. 226-234, 1998.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. **Preparo convencional**. 2007. Brasília. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-deacucar/arvore/CONTAG01_84_22122006154841.html. Acesso em: 20 de abr. 2012.

SANTOS, M. S.; ALONÇO, A. S.; BAUMHARDT, U. B. Principais fatores que influenciam o desempenho de escarificadores e subsoladores. Uma revisão de literatura. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 5, n. 1, p. 13-19, 2011.

SASAKI, C. M.; BENTIVENHA, S. R. P.; GONÇALVES, J. L. M. Configurações básicas de subsoladores florestais. In: GONÇALVES, J. L.M.; STAPE, J. L. **Conservação e**

cultivo de solos para plantações florestais. Piracicaba: IPEF, 2002. cap. 12, p. 393-407.

SASAKI, C. M.; GONÇALVES, J. L. M.; Desempenho operacional de um subsolador em função da estrutura, do teor de argila e de água em três latossolos. **Scientia Forestalis**, n. 69, p.115-124, 2005.

SILVA, P. R. A. Avaliação da demanda energética de hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras de plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 31., 2002, Salvador. **Anais...** Jaboticabal: SBEA, 2002.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 399-406, 2004.

TAKAHASHI, F. H. **Aplicação do controle estatístico de processos (CEP) como ferramenta para a melhoria da qualidade do leite.** 2011. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 2011.

TOLEDO, A. et al. Penetrógrafo eletrônico automático acoplado a quadriciclo para aplicação em agricultura de precisão. In: VII CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA., 2009, Viçosa. **Anais...** Lavras: SBIAgro, 2009. p. 1-6.

VEIGA, M.; HORN, R. ; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil Tillage Research**, v. 92, p. 104-113, 2006.