

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

GABRIELLI FIORENTIN DEDORDI

**CRESCIMENTO RADICULAR DA SOJA SOB NÍVEIS DE
COMPACTAÇÃO DO SOLO E MECANISMOS SULCADORES**

DISSERTAÇÃO

**PATO BRANCO
2015**

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

GABRIELLI FIORENTIN DEDORDI

**CRESCIMENTO RADICULAR DA SOJA SOB NÍVEIS DE
COMPACTAÇÃO DO SOLO E MECANISMOS SULCADORES**

DISSERTAÇÃO

**PATO BRANCO
2015**

GABRIELLI FIORENTIN DEDORDI

**CRESCIMENTO RADICULAR DA SOJA SOB NÍVEIS DE
COMPACTAÇÃO DO SOLO E MECANISMOS SULCADORES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia - Área de Concentração: Produção Vegetal.

Orientador: Drº. Alcir José Modolo

Co-Orientador: Drº. Thiago de Oliveira Vargas

PATO BRANCO

2015

D299c

Dedordi, Gabrielli Fiorentin.

Crescimento radicular da cultura da soja sob níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores / Gabrielli Fiorentin Dedordi. - 2015.

70 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Alcir José Modolo

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. PR, 2015.

Bibliografia: f. 54-65.

1. Semeadura - Qualidade 2. Física do solo. 3. Soja - Cultivo radicular. I. Modolo, Alcir José. coorient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agronomia. IV. Título.

CDD (22.ed.) 630

Ficha Catalográfica elaborada por
Suélem Belmudes Cardoso CRB9/1630
Biblioteca da UTFPR Campus Pato Branco



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Pato Branco
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Agronomia



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação n.º 111

*Crescimento Radicular da Soja Sob Níveis de Compactação do Solo e
Mecanismos Sulcadores*

por

Gabrielli Fiorentin Dedordi

Dissertação apresentada às quatorze horas do dia vinte de março do ano de dois mil e quinze, como requisito parcial para obtenção do título de MESTRA EM AGRONOMIA, Linha de Pesquisa – Sistemas de Produção Vegetal, Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Área de Concentração: Produção vegetal), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Emerson Trogello
IFGoiano

Prof. Dr. Thiago de Oliveira Vargas
UTFPR/PB

Prof. Dr. Carlos André Bahry
UTFPR/PB

Prof. Dr. Alcir José Modolo
UTFPR/PB
Orientador

Visto da Coordenação:

Prof. Dr. Giovani Benin
Coordenador do PPGAG

* "O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do PPGAG."

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito.
Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”*

Marthin Luther King

*“Nenhum homem realmente produtivo pensa como se estivesse
escrevendo uma dissertação”*

Albert Einstein

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela graça da vida e pelas oportunidades oferecidas.

Aos meus pais Luiz Raul Dedordi e Ivone Fiorentin Dedordi, pela educação, dedicação, confiança, esforço e pelos exemplos que sempre me deram, saibam que levo comigo essa frase que ouvi de vocês milhares de vezes... *“Dinheiro, bens materiais se faz mais de uma vez, se perde, se rouba, mas a educação e o conhecimento de ti nunca serão roubados ou retirados”* Sábias palavras.

Ao meu esposo Patrick Weirich pelo imenso carinho, dedicação, paciência e apoio, você sempre esteve ao meu lado e agora para toda a vida... *“de que vale uma conquista sem que tenhamos alguém para dividir a alegria de termos alcançado?”*.

As minhas irmãs Glaucia e Graciela pelo apoio, carinho e cuidado por mim sempre demonstrados.

Agradeço a todos que de uma forma ou de outra sempre torceram e apoiaram minhas decisões e escolhas, a todos o meu singelo obrigada.

Agradeço aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, que sempre se dispuseram a estar repassando o conhecimento e valorizando-nos não apenas como acadêmicos, mas como profissionais.

Agradeço aos colegas e amigos que aqui encontrei, espero que esta amizade não venha a se perder no tempo, espero, que nos caminhos futuros, eu possa encontrar amizades tão especiais como estas.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Alcir José Modolo e co-orientador Prof. Dr. Thiago de Oliveira Vargas pelo apoio, incentivo, compreensão, dedicação, amizade e atenção a qual sempre recebi de vocês, no decorrer desses dois anos vocês foram muito mais que somente orientadores vocês se tornaram amigos, colegas e serão lembrados e levados com muito carinho e respeito por toda a minha vida.

Aos meus colegas Rudi Otto Dams, Antonio Carlos Marangoni De Cól, Leonardo Pasa Hoffmann, Robson Gonçalves Trentin, Andrei Daniel Zdziarski, Fernanda Daniela Brandelero, Sabrina Trento e Diana Thais Benso, os quais foram fundamentais para que esse trabalho fosse realizado com maior agilidade e entusiasmo, pois sempre é satisfatório saber que podemos contar com amigos.

A Embrapa Instrumentação Agropecuária na pessoa do Dr. Lucio André de Castro Jorge e a empresa Stonway, pela disponibilidade do treinamento de capacitação para o uso do software Safira e a atenção sempre recebida quando solicitados.

Agradeço ainda a CAPES e a UTFPR, pelo apoio financeiro e estrutural para realização desta pesquisa.

RESUMO

DEDORDI, Gabrielli, F. Crescimento radicular da cultura da soja sob níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores. 73f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Área de Concentração: Produção vegetal), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2015.

O sistema de plantio direto tem intensificado a utilização do solo, e o tráfego de máquinas vêm ocasionando problemas relacionados à compactação do solo, a qual pode ser um fator limitante para o crescimento do sistema radicular e conseqüente rendimento das culturas, dentre elas a soja. Nesse contexto, os objetivos do presente estudo foram avaliar os efeitos de mecanismos sulcadores e da compactação do solo na física do solo, na qualidade de semeadura e no crescimento do sistema radicular da soja. O experimento foi realizado na área experimental da UTFPR câmpus Pato Branco, utilizando-se o delineamento experimental em blocos ao caso com parcelas subdivididas, onde nas parcelas principais foram dispostos os níveis de compactação (Nível 0 – Plantio Direto; Nível 2 – Plantio Direto submetido a duas passadas com trator; Nível 4 – Plantio Direto submetido a quatro passadas com trator e Nível 6 – Plantio Direto submetido a seis passadas com trator) e, nas subparcelas, os dois mecanismos sulcadores (disco duplo e haste sulcadora). Antes da semeadura foram realizadas avaliações referentes à caracterização física do solo por meio da sua densidade e resistência à penetração. Após a semeadura avaliou-se a profundidade de semeadura, área de solo mobilizada e crescimento radicular. As avaliações referentes ao crescimento radicular se deram por meio de coleta de amostras de raízes em três profundidades (0,00 - 0,10; 0,10 - 0,20 e 0,20 - 0,30 m) na linha e entre linha de semeadura da cultura. Essas amostras foram lavadas, digitalizadas e analisadas com auxílio do software SAFIRA. Os dados foram avaliados por meio de análise de variância pelo teste F, para as variáveis densidade do solo e qualidade de semeadura as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), enquanto as médias referentes ao crescimento radicular foram submetidas ao teste LSD ($p < 0,05$). A resistência a penetração foi maior a medida que se elevou os níveis de compactação do solo até a profundidade de aproximadamente 0,20 m. A densidade do solo apresentou diferença significativa somente na profundidade de 0,00 - 0,07 m para o tratamento sem compactação adicional. A profundidade de semeadura foi influenciada somente pelos mecanismos sulcadores e a área de solo mobilizada não apresentou diferença significativa tanto para compactação como para sulcadores. O volume e área superficial de raiz foram influenciados pela interação dos entre níveis de compactação e mecanismos sulcadores na linha de semeadura para a profundidade de 0,10-0,20 m e pelos níveis de compactação nas profundidades de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m. O diâmetro de raiz foi influenciado pela compactação do solo na profundidade de 0,20-0,30 m na linha e na entre linha, o comprimento de raiz também foi afetado pela compactação na profundidade de 0,10-0,20 m somente na entre linha.

Palavras-chave: Qualidade de semeadura. Física do solo. Sistema radicular. *Glycine Max*. SAFIRA.

ABSTRACT

DEDORDI, Gabrielli F. Soybean root growth under soil compaction and furrowers mechanisms. 73f. Dissertation (Master's in Agronomy) - Graduate Program in Agronomy (Concentration Area: Plant Science), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2013.

No-tillage system has intensified land use and machine traffic come causing problems related to soil compaction which can be a limiting factor for root system development and therefore in yield. In this context, this study aimed to evaluate the effects of furrowers mechanisms in soil compaction levels on soybean root development. The experiment was carried out in the experimental area at UTFPR campus Pato Branco in a split-plot arranged in a randomized complete block design, where the whole plots were arranged the compaction levels (Level 0 - No-till without additional compaction; Level 2 - No-till submitted to further compaction through two tractor passes; Level 4 - No-till submitted to further compaction through four tractor passes and Level 6 - No-till submitted to further compaction through six tractor passes) and the split-plots the two mechanisms furrowers (double disk and driller shank). Before seeding evaluations on soil physical characterization were carried out through bulk density and penetration resistance. Afterwards seeding depth, soil area mobilized and root development were evaluated. Evaluations regarding root development were given through the collection of root samples at three depths (0.00-0.10; 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m) on the crops row and between rows. These samples were washed, scanned and processed with the assistance of SAFIRA software. Data were submitted to analysis of variance by F test for soil density and seeding quality variables means were compared by Tukey test ($p < 0.05$), whereas the means for root development to LSD test ($p < 0.05$). The penetration resistance was higher as increased soil compaction levels to a depth of approximately 0.20 m. Soil bulk density showed a significant difference only in depth from 0.00-0.07 m for treatment without further compression. The sowing depth was influenced only by furrowers mechanisms and the soil area mobilized not significantly different for both compression and to furrow openers. The volume and surface area of root were influenced by the interaction between the levels of compression and furrowers mechanisms at sowing line to the depth of 0.10-0.20 m by compression levels at depths of from 0.00-0.10 and 0.20-0.30 m. The root diameter was influenced by soil compaction at a depth of 0.20-0.30 m in the row and between line, the root length was also affected by compaction at a depth of 0.10-0.20 m only in between line.

Keywords: Seeding quality. Soil physics. Root system. *Glycine max.* SAFIRA.

LISTAS DE FIGURAS

- Figura 1 - Dados climáticos de precipitação ocorridos durante a realização do experimento. Pato Branco – PR, 2014. Fonte: IAPAR (2014)..... 22
- Figura 2 - Disposição das unidades experimentais com a distribuição dos tratamentos, Câmpus Pato Branco. Pato Branco – PR, 2015. 24
- Figura 3 - Sulcadores utilizados na condução do experimento (a) sulcador tipo haste e (b) sulcador tipo disco duplo. Pato Branco, 2015. 26
- Figura 4 - Coleta dos dados de resistência mecânica do solo à penetração. Pato Branco - PR, 2015. 28
- Figura 5- Vista geral do perfilômetro utilizado para avaliação do perfil da superfície final do solo (a) e perfil interno do solo mobilizado (b). Pato branco - PR, 2015. 29
- Figura 6 - Vista geral da retroescavadeira realizando a abertura da trincheira (a), e, tela quadriculada e disposição dos anéis utilizados para análise do sistema radicular da soja, detalhe para indicação de linhas (L) e entre linhas (EL) (b). Pato branco - PR, 2015..... 30
- Figura 7 - Separação de resíduos indesejados (a), amostras de raízes após lavagem e armazenadas em recipiente identificado (b). Pato Branco- PR, 2015. 31
- Figura 8 - Separação dos fragmentos radiculares para evitar sobreposição entre raízes. Pato Branco- PR, 2015. 32
- Figura 9 - Imagens originadas do escaneamento das raízes, utilizadas posteriormente para obtenção dos dados. Pato Branco - PR, 2015..... 32
- Figura 10 - Histograma de saída dos dados do programa Safira, fornecendo os dados de volume (mm^3), área superficial (mm^2), diâmetro médio ponderado (mm) e comprimento (mm). Pato Branco - PR, 2015. 33
- Figura 11- Resistência mecânica do solo à penetração em função do número de passadas do trator. Pato Branco – PR, 2015..... 35

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Caracterização química do solo na camada de 0,00–0,10 e 0,010–0,20 m de profundidade, antes da implantação do experimento. Pato Branco - PR, 2015... 23
- Tabela 2 - Características da semeadora-adubadora da marca Vence Tudo, modelo SA 14600 utilizada na semeadura da cultura da soja. Pato Branco, 2015..... 25
- Tabela 3 - Valores médios da densidade do solo (kg dm^{-3}) na profundidade de 0,00-0,07 e 0,07-0,15 m em função dos diferentes níveis de compactação do solo. Pato Branco – PR, 2015. 37
- Tabela 4- Valores médios da profundidade de semeadura de soja (cm) em função dos diferentes níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores. Pato Branco – PR, 2015. 38
- Tabela 5 - Valores médios da área de solo mobilizada (cm^2) na implantação da cultura da soja em função dos diferentes níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores. Pato Branco – PR, 2015..... 40
- Tabela 6 - Efeito dos níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores no volume de raízes de soja (mm^3) coletados na linha e entre linha de semeadura em diferentes profundidades. Pato Branco – PR, 2015..... 42
- Tabela 7 - Efeito da interação entre níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores no volume (mm^3) de raízes de soja na linha de semeadura na profundidade de 0,10-0,20 m. Pato Branco – PR, 2015. 43
- Tabela 8 - Efeito dos níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores na área superficial de raízes de soja (mm^2) coletados na linha e entre linha de semeadura em diferentes profundidades. Pato Branco – PR, 2015..... 44
- Tabela 9 - Efeito da interação entre níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores na área superficial (mm^3) de raízes de soja na linha de semeadura na profundidade de 0,10-0,20 m. Pato Branco – PR, 2015. 45
- Tabela 10 - Efeito dos níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores no diâmetro (mm) de raízes de soja coletados na linha e entre linha de semeadura em diferentes profundidades. Pato Branco – PR, 2015..... 46
- Tabela 11 - Efeito dos níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores no comprimento de raízes de soja (mm) coletados na linha e entre linha de semeadura em diferentes profundidades. Pato Branco – PR, 2015..... 48

SUMÁRIO

| | | |
|------------|------------------------------------------------------|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO | 11 |
| 2. | REVISÃO DE LITERATURA..... | 13 |
| 2.1 | ASPECTOS GERAIS E IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DA SOJA..... | 13 |
| 2.2 | SISTEMA PLANTIO DIRETO | 14 |
| 2.3 | COMPACTAÇÃO DO SOLO E CRESCIMENTO DE PLANTAS | 15 |
| 2.4 | SEMEADORA-ADUBADORA E MECANISMOS SULCADORES..... | 16 |
| 2.5 | CRESCIMENTO RADICULAR E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO..... | 18 |
| 3. | MATERIAS E MÉTODOS..... | 22 |
| 3.1 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL..... | 22 |
| 3.2 | TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL | 23 |
| 3.3 | SEMEADURA E TRATOS CULTURAIS..... | 25 |
| 3.4 | AVALIAÇÕES PRÉ-PLANTIO | 27 |
| 3.4.1 | Caracterização Física do Solo..... | 27 |
| 3.4.1.1 | Teor de água no solo | 27 |
| 3.4.1.2 | Densidade do solo..... | 27 |
| 3.4.1.3 | Resistência mecânica do solo à penetração | 27 |
| 3.5 | AVALIAÇÕES PÓS-PLANTIO | 28 |
| 3.5.1 | Profundidades de Deposição de Sementes | 28 |
| 3.5.2 | Área de Solo Mobilizada..... | 28 |
| 3.5.3 | Crescimento e Análise do Sistema Radicular | 29 |
| 3.6 | ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS..... | 33 |
| 4. | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 34 |
| 4.1 | Caracterização física do solo..... | 34 |
| 4.1.1 | Resistência Mecânica do Solo à Penetração | 34 |
| 4.1.2 | Densidade do Solo | 36 |
| 4.2 | PARÂMETROS DE QUALIDADE DE SEMEADURA | 38 |
| 4.2.1 | Profundidade de Semeadura..... | 38 |
| 4.3 | ÁREA DE SOLO MOBILIZADA | 40 |
| 4.4 | SISTEMA RADICULAR | 41 |
| 4.4.1 | Volume de raiz | 41 |
| 4.4.2 | Área Superficial de Raiz | 44 |

| | | |
|-----------|-----------------------------------|-----------|
| 4.4.3 | Diâmetro de Raiz..... | 46 |
| 4.4.4 | Comprimento de Raiz..... | 48 |
| 5. | CONCLUSÕES | 51 |
| 6. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 52 |
| | REFERÊNCIAS | 54 |
| | APÊNDICES | 66 |

1. INTRODUÇÃO

A crescente expansão da área cultivada com soja e a agregação de tecnologias, que elevaram sua produtividade, atribuíram-lhe a condição de cultura mais importante do agronegócio brasileiro e uma das culturas de maior importância econômica no mundo.

Entretanto, com o despertar de uma agricultura intensiva, na qual o número de máquinas que trafegam em áreas agriculturáveis é grande e o cultivo é feito muito mais, respeitando um planejamento temporal do que visando à conservação dos recursos edáficos, os problemas de compactação do solo vêm aparecendo sistematicamente em extensas áreas agrícolas do país, mostrando seus efeitos comprometedores ao potencial produtivo das culturas anuais em sistema de semeadura direta.

Para que se tenha lucratividade nas culturas, fatores relacionados com a profundidade de sulco e distribuição de sementes adequada, que venham garantir bom estande inicial de plantas, devem ser considerados na operação de semeadura. Além desses fatores, as condições físicas do solo também devem ser consideradas, pois estas podem afetar o crescimento do sistema radicular e aéreo do vegetal e, conseqüentemente o rendimento das culturas.

Uma das principais causas de alterações nas propriedades físicas do solo está relacionada ao tráfego de máquinas com umidade inadequada, o qual ocasiona aumento da densidade do solo e formação de camadas superficiais compactadas, as quais dificultam o crescimento do sistema radicular das culturas.

A compactação dos solos agrícolas é um dos principais problemas encontrados atualmente, pois a cada ano tem-se utilizado nas áreas agricultáveis máquinas e equipamento maiores e mais pesados, sendo que a carga aplicada sobre o solo vem aumentando à medida que se aumenta o número de cultivos.

Uma das alternativas, práticas e de menor custo, que vem sendo utilizada para romper a camada superficial compactada, tem sido a utilização de sulcadores do tipo haste nas semeadoras de plantio direto. A adoção das hastes sulcadoras permite a deposição do fertilizante a maiores profundidades, o que pode estimular o aprofundamento das raízes, tendo em vista que os nutrientes, em semeadura direta,

tendem a se concentrar na superfície do solo e, desse modo, minimizar os efeitos da compactação sobre o crescimento das plantas.

Diante da importância econômica da soja e do crescente aumento na demanda de grãos dessa cultura, são imprescindíveis os estudos científicos dos sistemas de produção e o avanço tecnológico para aumentar suas produtividades, competitividade e rentabilidade.

Um dos fatores importantes para a obtenção de boas produtividades de uma cultura é a presença de um bom sistema radicular, o qual deve apresentar ótimo crescimento. Considerando, que o crescimento das raízes é influenciado pelo manejo do solo, a avaliação do sistema radicular das culturas é um parâmetro importante para a correta aplicação de práticas agrícolas que visam à maximização das produtividades das culturas.

Com intuito de avaliar o sistema radicular, muitos métodos foram desenvolvidos buscando analisar o comportamento das raízes no perfil do solo, porém, a maioria desses métodos são dispendiosos e pouco precisos. O método que apresenta maior precisão aos dados de volume, área superficial, diâmetro e comprimento de raiz se dá por meio de processamento digital de imagens com raízes lavadas, onde os dados são obtidos com auxílio de softwares específicos desenvolvidos especialmente para essa finalidade.

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de mecanismos sulcadores e níveis de compactação do solo sobre os parâmetros de física do solo, qualidade de semeadura e crescimento radicular da cultura da soja.

Os objetivos específicos foram: Avaliar as propriedades físicas do solo por meio da resistência à penetração e densidade do solo; Avaliar a profundidade de semeadura e área de solo mobilizada; Avaliar o crescimento radicular da cultura da soja por meio de volume, área superficial, diâmetro e comprimento na linha e entre linha de semeadura em diferentes profundidades.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 ASPECTOS GERAIS E IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DA SOJA

A soja (*Glycine max*) é uma cultura de grande importância econômica. Seus grãos possuem em torno de 40% de proteína e 20% de óleo (OLIVEIRA, 2011), os quais são utilizados na produção de biodiesel, lubrificantes, alimentos humanos e animais. Pode ainda ser utilizada na forma de adubação verde, forragem e pastagem (SEDIYAMA; TEIXEIRA; BARROS, 2009). Além disso, é um produto vegetal com elevada importância no mercado externo, favorecendo o saldo da balança comercial (HIRAKURI, 2010).

No contexto mundial, o Brasil apresenta significativa participação da oferta e demanda agroindustrial da soja, e esse fator vem desempenhando papel fundamental no desenvolvimento de diversas regiões do país (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2011).

Dessa forma, o crescimento da cultura no Brasil está associado com os avanços científicos e disponibilidade de novas tecnologias, mecanização e crescimento de cultivares altamente produtivas adaptadas a inúmeras regiões de cultivo, manejo de solo, pragas e plantas daninhas (FREITAS, 2011).

Atualmente, o Brasil é o segundo maior produtor de soja do mundo, ficando atrás somente dos Estados Unidos (FAO, 2014). A soja é a cultura agrícola brasileira que mais cresceu nas últimas três décadas, correspondendo a 49% da área plantada com grãos no país (MAPA, 2013). Historicamente, a região centro-oeste apresenta a maior produção. O estado do Paraná é o segundo maior produtor de soja do Brasil e maior produtor da região sul (CONAB, 2014).

A área destinada ao plantio da soja na safra 2013/14 foi em torno de 30 milhões de hectares, 8,6% (2,37 milhões de hectares) superior à da safra 2012/13. A produção apresentou um volume de 86,27 milhões de toneladas, com produtividade média de 2.865 kg ha⁻¹. Para o estado do Paraná houve incremento na área plantada em 5,6% e redução da produção por hectare, cerca de 11% em relação a 2012/13, devido as estiagens ocorridas (CONAB, 2014).

2.2 SISTEMA PLANTIO DIRETO

O Brasil é um dos principais países em termos de adoção do sistema de plantio direto, com cerca de 25,5 milhões de hectares cultivados sob esse sistema (FEBRAPDP, 2014), sendo o estado do Paraná pioneiro na introdução desta prática (CASÃO JUNIOR; ARAÚJO; LLANILLO, 2008).

O sistema de plantio direto foi implantado com objetivo de melhorar as características físicas, químicas e biológicas das áreas degradadas pelas práticas de monocultura e do sistema convencional de preparo do solo, que incluíam a queima de resíduos após a colheita e uso intensivo de grades. Práticas estas que promoviam a decomposição acelerada da matéria orgânica e intensificavam a desagregação da estrutura do solo (COSTA et al., 2006).

A adoção do sistema plantio direto traz como vantagens a eliminação das operações de aração e gradagem e conseqüentemente redução no gasto de combustível devido à menor exigência de requerimento de potência pelo conjunto motomecanizado, ganho de tempo por dispensar o preparo do solo (DUARTE; DEUBER, 1999; CRUZ et al., 2001), menor custo e maior rentabilidade e estabilidade do sistema produtivo.

Ambientalmente, o sistema de plantio direto apresenta outros benefícios, pois os resíduos culturais que permanecem sobre o solo após as práticas de cultivo, oferecem elevada proteção da superfície do mesmo (BERTOL; COGO; LEVIEN, 1997), favorecendo a estruturação física do solo no que diz respeito a macro e microporosidade, melhorando a infiltração de água no solo (CRUZ et al., 2001), realizando a dissipação da energia cinética das gotas de chuva sobre o solo, conseqüentemente reduzindo a desagregação das partículas, o selamento superficial e a erosão hídrica (COGO; LEVIEN; SHUWARZ, 2003).

As limitações que esse sistema impõe estão relacionadas aos maiores custos com máquinas e implementos específicos para o plantio direto, dificuldade na eliminação de doenças e pragas que se desenvolvem em restos culturais, necessidade de maior conhecimento e assistência técnica, planejamento no uso das áreas e dificuldade de manutenção dos resíduos culturais, dependendo das condições edafoclimáticas da região (CRUZ et al., 2001; SILVA; RESCK, 1997).

De acordo com Derpsch et al. (2010), o sistema de plantio direto é reconhecido como um sistema de agricultura sustentável e isso favorece a sua expansão. Para os autores, as maiores barreiras para adoção desse sistema estão relacionadas ao conhecimento de como fazê-lo, tradição de cada região, disponibilidade de máquinas e herbicidas adequadas em algumas localidades.

2.3 COMPACTAÇÃO DO SOLO E CRESCIMENTO DE PLANTAS

A modernização da agricultura, acrescida da busca por produtividade e lucratividade exige a intensificação dos sistemas produtivos. Essa busca faz com que ocorra o uso intensivo do solo com maior tráfego de máquinas e a utilização de máquinas e equipamentos mais robustos e pesados, porém, essa evolução não foi acompanhada pelo aumento proporcional do tamanho e largura dos pneus o que resulta em alteração das propriedades físicas do solo (STRECK et al., 2004).

Mesmo com a utilização do plantio direto, o qual é uma alternativa para evitar as alterações do preparo do solo sobre as propriedades físicas, a compactação ocorre devido à utilização de forma inadequada desse sistema (CHAN et al., 1992).

Estudos apontam alterações significativas nas propriedades físicas de alguns solos devido ao tráfego contínuo de máquinas pesadas e as frequentes utilizações de máquinas e equipamentos com níveis de umidade elevados (STRECK, et al., 2004).

Para tanto, a compactação do solo é o aumento da densidade proporcionado pelo arranjo das partículas de areia, silte e argila e dos agregados, devido à pressão ocasionada pelas operações de cultivo realizadas na superfície do solo (TORRES; SARAIVA; GALERANI, 1993). Ainda, segundo os autores, os solos formados por partículas de diferentes tamanhos normalmente são mais facilmente compactados, pois as partículas menores se encaixam com maior facilidade nos espaços formados entre as partículas maiores.

Em solo compactado, o número de macroporos é menor e a densidade é maior, ocasionando maior resistência física do solo ao crescimento de raízes em solo seco (MARSCHNER, 1995). Em solo úmido, a compactação também traz

prejuízos, ocasionando a falta de oxigênio, elevando a concentração de etileno na região da radícula devido à menor aeração.

Como a compactação tem efeitos diretos nas porosidades do solo, tem-se diminuição do oxigênio disponível na rizosfera, podendo limitar os processos metabólicos da planta (QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000; TAVARES FILHO et al., 1999). Em solos compactados, o crescimento do sistema radicular é reduzido e, com isso, um menor volume de solo é explorado pelas raízes, ocorrendo conseqüentemente, menor absorção de água e nutrientes (HAKANSSON; STENBERG; RYDBERG, 1998).

Solos com resistência à penetração de 2,00 MPa podem proporcionar redução no crescimento radicular da soja (ROSOLEM; ALMEIDA; SACRAMENTO, 1994). O aumento da resistência do solo à penetração radicular, a relação hídrica e a aeração do solo são os fatores de maior relação com o crescimento das plantas (LEÃO, 2002). Segundo o autor, em casos severos de resistência à penetração associado ao déficit hídrico pode ocorrer perda total da produção.

Collares et al. (2008) observaram que as raízes de feijoeiro em plantio direto compactado apresentaram surgimento significativo de raízes secundárias. As raízes possuem dificuldade de penetração em solos que possuam camadas compactadas, dessa forma ocorre maior crescimento radicular nas camadas superiores ou inferiores as camadas compactadas (BEULTER; CENTURION, 2004).

Segundo Johnson et al. (1990) camadas de solo compactadas na superfície reduziram em 15% a produção de soja, já camadas de solo compactadas em subsuperfície ocasionaram redução na altura das plantas, no entanto, essa redução no crescimento vegetativo não resultou em decréscimo proporcional na produtividade da cultura. Estudos realizados indicam que a soja não apresentou diferença significativa na redução de grãos e massa da matéria seca em função da compactação do solo (CARDOSO et al., 2006).

2.4 SEMEADORA-ADUBADORA E MECANISMOS SULCADORES

A evolução da agricultura somente foi possível devido à presença e à modernização de máquinas e equipamentos agrícolas. Entre elas, as semeadoras-

adubadoras as quais devem ter a função de proporcionar condições adequadas para que a semeadura das culturas seja realizada de forma correta.

Basicamente, as semeadoras-adubadoras existentes no mercado nacional possuem dois sistemas de abertura de sulcos para deposição de adubo e semente, a haste sulcadora e o disco duplo (GERMINO; BENEZ, 2006). Segundo os autores, devido à menor mobilização do solo na linha de semeadura e menor embuchamento em solo com presença da palhada, muitos produtores têm optado pelo uso do sulcador do tipo disco duplo.

Já as hastes são ferramentas em forma de cunha cuja função é cortar e penetrar no solo, pois estas possuem maior capacidade de penetração do que os discos duplos, porém, há um maior embuchamento devido a ausência do corte da palhada (SIQUEIRA, 2008).

O uso da haste sulcadora, por proporcionar maior profundidade de trabalho, minimiza os efeitos da deficiência de água para germinação e emergência de plantas durante períodos de estiagem (SIQUEIRA, 2008).

Já os sulcadores do tipo disco duplo apresentam problemas de penetração em solos argilosos, fazendo com que as sementes sejam depositadas superficialmente e muito próximas dos fertilizantes. Esses sulcadores apresentam, ainda, maiores exigências de manutenção e são de custos mais elevados. Araújo et al. (1998) identificaram que, na região oeste do Paraná, a utilização de sulcadores do tipo haste é uma alternativa para romper a compactação superficial dos solos.

Quando se utiliza o mecanismo sulcador tipo haste para romper camadas compactadas na superfície do solo, há um aumento na exigência de tração (GERMINO; BENEZ, 2006; CASÃO JUNIOR, 2006), com isso tem-se maior gasto de combustível e dos componentes, além de elevar a mobilização do solo no sulco de semeadura, proporcionar germinação emergência de plantas daninhas o que não é desejável em sistema de plantio direto (CASÃO JUNIOR, 2006; REIS et al., 2004).

2.5 CRESCIMENTO RADICULAR E MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

O sistema radicular é muito importante para o crescimento das plantas e sua importância é expressa desde o momento da germinação, pois após a embebição da semente inicia-se o crescimento da radícula a qual se prolonga fixando-se no solo, somente após o crescimento da raiz primária que se inicia o crescimento do hipocótilo.

As raízes possuem muitas funções, entre elas a fixação da planta no solo, absorção de água e nutrientes (RAWITSCHER, 1979; BENGOUGH et al., 2006). No entanto, estas apresentam outras funções como, armazenamento de substâncias de reserva, propagação e dissipação, produção de metabólitos secundários, síntese de reguladores vegetais, interação com micorrizas, bactérias simbióticas e respiração celular (REVEN; EVERT; EICHHORN, 1996).

Os sistemas radiculares se diferem conforme as classes das plantas. Para a cultura da soja, o sistema é denominado pivotante, composto de um eixo principal formado pela radícula e, ao longo desse eixo se desenvolvem um grande número de raízes secundárias (TORRES; SARAIVA, 1999). A raiz principal penetra perpendicularmente no solo, buscando alcançar profundidades onde possui normalmente maior umidade (RAWITSCHER, 1979).

Na fase vegetativa a raiz principal da soja pode atingir até 0,60 m de profundidade enquanto, as raízes laterais podem atingir de 0,20 a 0,25 m de comprimento (TORRES; SARAIVA, 1999), na fase reprodutiva, a raiz principal pode atingir 0,75 m (QUEIROZ-VOLTAN et al., 2000), segundo os autores, em condições normais de cultivo, as raízes se distribuem quase totalmente nos primeiros 0,15 m do solo.

A arquitetura do sistema radicular está relacionada com a produtividade das culturas, pois muitos recursos do solo se encontram irregularmente distribuídos (LYNCH, 1995). Sendo assim, um bom posicionamento do sistema radicular pode aumentar a capacidade da planta em explorar estes recursos.

A habilidade das plantas em absorver água e nutrientes está relacionada à sua capacidade de desenvolver um extenso sistema radicular, crescendo em direção a um solo inexplorado (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Estudos relatam que o aumento da resistência mecânica do solo à penetração

pode estimular a proliferação de raízes laterais com menor diâmetro (CAMARGO; ALLEONI, 1997). O impedimento mecânico causado pela compactação pode provocar decréscimo na taxa de alongação celular (BENGOUGH; MULLINS, 1990), em função da baixa atividade biológica, ausência quase completa de orifícios e pouca porosidade nas estruturas compactadas (TAVARES FILHO et al., 1999).

Para mensurar os efeitos da compactação do solo no sistema radicular das culturas, vários métodos podem ser utilizados, no entanto, a maioria destes são demorados e trabalhosos, além de exigirem muita mão-de-obra, o que dificulta as avaliações (BENJAMIN; NIELSEN, 2004). O principal entrave para estudos e avaliações de sistemas radiculares é de caráter metodológico (BRASIL, 2005).

Normalmente, as avaliações de raízes a campo são realizadas de duas maneiras principais: diretamente pelo perfil do solo ou por meio de raízes lavadas, levando em conta o custo, precisão e o tempo da análise (JORGE; SILVA, 2010). Ainda segundo os autores, a coleta das raízes no campo é algo muito trabalhoso e pode ser feito de diversas formas, pelo método de monólito, trado, parede do perfil, dentre outros.

Dentre os métodos de monólito há dois métodos principais, a placa de pregos e a coleta de monólito com cilindros de área conhecida. O método placa de pregos que é tido como o método padrão em análises de raízes, consiste em retirar do solo uma amostra significativa do sistema radicular, com o auxílio de uma prancha com pregos, os quais permitem a permanência das raízes em posição próxima à posição natural.

Após a retirada da prancha, realiza-se o processo de lavagem, onde a placa é imersa na água e com o auxílio de um jato de água de baixa pressão, o solo é retirado tomando-se o cuidado para não retirar as raízes do lugar. Com esse método é possível fazer estudos quantitativos e qualitativos das raízes (JORGE; SILVA, 2010).

Outro método muito utilizado diz respeito à coleta de uma amostra do sistema radicular com auxílio de um tubo de PVC ou outro material, com volume conhecido, em que se retira um monólito cilíndrico do solo contendo as raízes e, após a coleta, as raízes passam por processo de lavagem, sendo separadas do solo (JORGE; SILVA, 2010).

Ambos são métodos trabalhosos, pois se faz necessário a abertura de trincheiras para coletar as amostras, além de realizar a lavagem para separar das amostras as raízes vivas de raízes mortas, de matéria orgânica e detritos (BENJAMIN; NIELSEN, 2004).

Tradicionalmente, as escavações de trincheiras é uma técnica usada por vários pesquisadores (EHLERS et al., 1983; VOORHEES, 1989) para estudo dos efeitos de manejo de solo sob os sistemas radiculares das culturas (BENJAMIN; NIELSEN, 2004).

O método de trincheira é muito informativo, pois permite analisar a distribuição do sistema radicular de forma completa, observando as raízes principais, laterais e verticais. Porém, esse é um método muito destrutivo, e dificulta a utilização de repetições dentro da parcela experimental (BENJAMIN; NIELSEN, 2004).

As raízes coletadas por meio de monólitos devem ser analisadas com auxílio de softwares. Farrell et al. (1993), Dowdy et al. (1995) e Kimura e Yamasaki (2001), verificaram que os softwares apresentam resultados semelhantes à medição manual para comprimento e diâmetro de raiz. Já Kokko et al. (1993) utilizaram uma abordagem um pouco diferente para quantificar as raízes de uma amostra de solo, contando o número de pixels projetada em uma imagem bidimensional para determinar a área da superfície radicular.

Costa et al. (2000) desenvolveram uma metodologia para sistemas radiculares grandes com a utilização de sub-amostras, sendo assim, nem todo o material de raiz coletado precisa ser analisado para obter medidas de comprimento por análise de imagens.

Nesse sentido, para auxiliar nas análises tem-se os softwares SIARCS (Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura do Solo) e o SAFIRA (Sistema para Análise de Fibras e Raízes) ambos de domínio público, e que analisam as raízes por meio de processamento de imagens obtidas por câmera digital e por meio de raízes lavadas, respectivamente (JORGE; SILVA, 2010).

O software SAFIRA permite obter medidas de área superficial, volume e comprimento das fibras e raízes, por classes de diâmetro (JORGE; RODRIGUES, 2008), além de realizar a quantificação das raízes lavadas de forma rápida, menos trabalhosa e mais detalhada, favorecendo a realização de um maior número de repetições experimentais.

O processamento de imagem é utilizado devido à sua facilidade e rapidez na obtenção dos dados. Esses softwares permitem a análise do crescimento radicular de culturas como a soja (BORDIN, 2008), o milho (BASSOI, 1994) e cana-de-açúcar (VASCONCELOS, 2003; AZEVEDO, 2008).

Em estudos com aplicação de organominerais em milho, Santana (2012) avaliou a densidade, área, volume de raiz da cultura com auxílio do software SAFIRA, podendo assim observar qual tratamento estimulou maior crescimento radicular da cultura.

3. MATERIAS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi conduzido na área experimental do Curso de Agronomia, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR - Câmpus Pato Branco. A área tem sua localização definida pelas coordenadas 26°16'36" de Latitude Sul, 52°41'20" de Longitude Oeste. O solo é caracterizado como Latossolo Vermelho distrófico, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), com textura muito argilosa (77,40% de argila, 20,31% de areia e 2,29% de silte). O clima é subtropical úmido do tipo Cfa, conforme classificação de Köppen (MAACK, 1968), com altitude média de 750 m e declividade máxima de 3%.

Os dados de precipitação média (Figura 1) foram obtidos a partir do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), o qual está distante a 8,0 km da área de implementação do experimento.

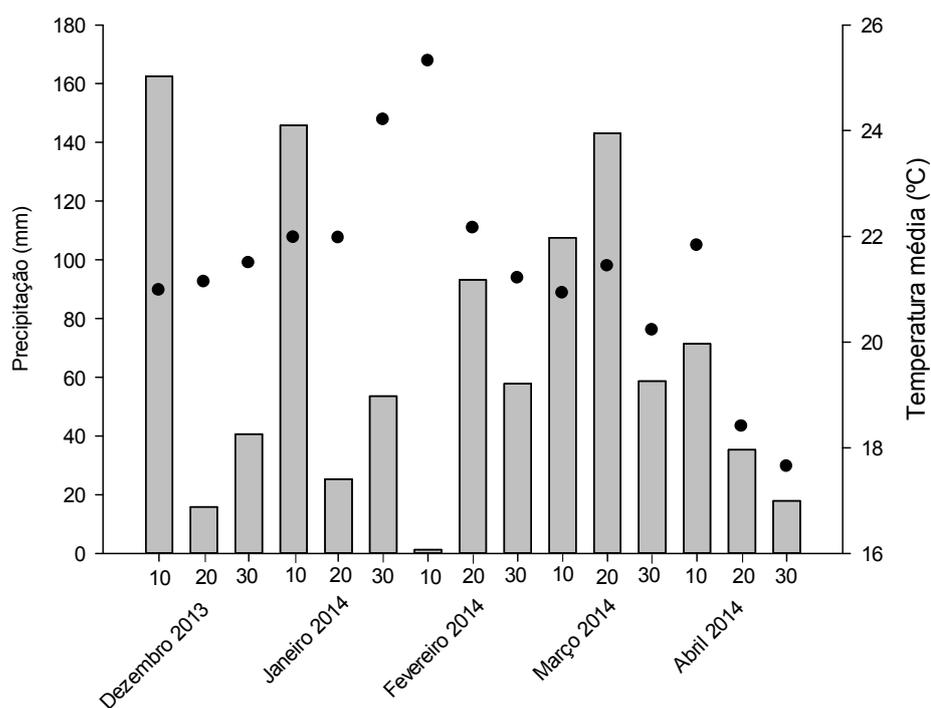


Figura 1 - Dados climáticos de precipitação ocorridos durante a realização do experimento. Pato Branco – PR, 2014. Fonte: IAPAR (2014).

Os dados apresentados foram dispostos de forma decendial (a cada dez dias), sendo que o período compreendido da semeadura (dezembro, 2013) a coleta das raízes da soja (abril, 214), houve precipitação mensal acumulada de 219 mm em dezembro de 2013, atingindo acumulados de 329 mm em março de 2014.

A área experimental vem sendo cultivada no sistema plantio direto há mais de quinze anos, com as culturas da soja (*Glycine max.*) e milho (*Zea mays*) no verão e com aveia preta (*Avena strigosa*) ou azevém no inverno (*Lolium multiflorum*).

Antes da instalação do experimento, foram realizadas amostragens do solo da área na camada de 0,00 a 0,20 m de profundidade, para caracterização química (Tabela 1), conforme metodologia descrita pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Comissão de Química e Fertilidade do Solo (2004). As características químicas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização química do solo na camada de 0,00–0,10 e 0,010–0,20 m de profundidade, antes da implantação do experimento. Pato Branco - PR, 2015.

| Prof. | pH | MO | P | H+Al | K | Ca | Mg | SB | CTC | V |
|-----------|-------------------|-------------------|--------------------|-------|-------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| (m) | CaCl ₂ | gdm ⁻³ | mgdm ⁻³ | ----- | ----- | cmol _c dm ⁻³ | ----- | ----- | ----- | % |
| 0,00-0,10 | 4,85 | 52,27 | 13,08 | 5,30 | 0,21 | 4,33 | 1,52 | 6,06 | 11,36 | 53,26 |
| 0,10-0,20 | 4,85 | 45,91 | 8,09 | 5,28 | 0,16 | 4,54 | 1,27 | 5,86 | 11,14 | 52,55 |

MO extraído por digestão unida; P, K, pH em CaCl₂; Extraídos em KCl 1 mol L⁻¹ Ca, Mg e Al trocável.

3.2 TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Os tratamentos foram compostos pela combinação entre quatro níveis de compactação do solo e dois mecanismos sulcadores (disco duplo e haste sulcadora), de uma semeadora-adubadora de plantio direto. Os níveis de compactação, aplicados às parcelas foram os seguintes:

Nível 0 (N0) – Plantio direto sem compactação adicional;

Nível 2 (N2) – Plantio direto submetido à compactação adicional, por meio de duas passadas com trator no mesmo rastro até fechamento total da área da parcela.

Nível 4 (N4) – Plantio direto submetido à compactação adicional, por meio de quatro passadas com trator no mesmo rastro até fechamento total da área da parcela.

Nível 6 (N6) – Plantio direto submetido à compactação adicional, por meio de seis passadas com trator, no mesmo rastro até fechamento total da área da parcela.

Para a aplicação dos níveis de compactação utilizou-se um trator modelo New Holland TL75E 4x2 TDA (Tração Dianteira Auxiliar), com lastragem máxima permitida de 5489 Kg, pneus Standard dianteiros 12,4x24 e traseiros 18,4x30, acoplado a um pulverizador montado, da marca Jacto (250 kg), abastecido com 600 litros de água. A compactação foi realizada logo após o período chuvoso, com a umidade do solo em torno de 38,1%.

Foi utilizado o esquema de parcelas subdivididas, em que as parcelas constituíram os quatro níveis de compactação do solo (N0, N2, N4 e N6) e as subparcelas os dois mecanismos sulcadores (disco duplo defasado e haste sulcadora), no delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições (Figura 2). A área foi dividida em quatro blocos casualizados, totalizando 32 unidades experimentais (UE), cada uma com área de 75 m² (3,75 x 20 m), com espaçamento entre blocos de 10 metros, utilizados para manobra e estabilização do conjunto motomecanizado.

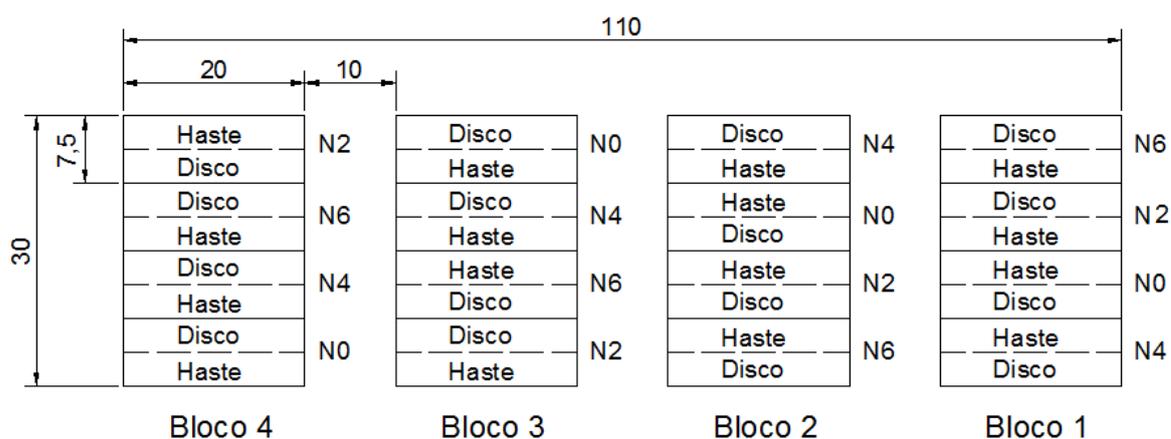


Figura 2 - Disposição das unidades experimentais com a distribuição dos tratamentos, Câmpus Pato Branco. Pato Branco – PR, 2015.

3.3 SEMEADURA E TRATOS CULTURAIS

A semeadura da cultura da soja realizou-se no dia 12 de dezembro de 2013, seguindo o zoneamento agrícola para a região sudoeste do Paraná, o qual vai de 11 de outubro a 30 de dezembro (MAPA, 2014). Utilizou-se a cultivar Don Mario 5.8i (BMX Apollo RR) visando atingir estande final de plantas de aproximadamente 300.000 plantas ha⁻¹.

A adubação da área foi realizada conforme recomendação da CQFS RS/SC (2004), a partir do resultado da análise química do solo (Tabela 1). Para adubação de base foram utilizados 390 kg ha⁻¹ da formulação 02-20-18.

A semeadura foi realizada com semeadora-adubadora de plantio direto, de arrasto, da marca Vence Tudo, modelo SA 14600, com dosador de sementes do tipo disco alveolado, com cinco linhas de semeadura, espaçadas entre si por 0,45 m, cuja as principais informações são apresentadas na Tabela 2. A velocidade de semeadura foi de 5,2 km h⁻¹.

Como fonte de potência, utilizou-se um trator New Holland, modelo TL75E, 4x2 TDA (Tração Dianteira Auxiliar), com potência máxima de 57,4 kW (78 cv.) no motor a 2.400 rpm.

Tabela 2 - Características da semeadora-adubadora da marca Vence Tudo, modelo SA 14600 utilizada na semeadura da cultura da soja. Pato Branco, 2015.

| Componentes | Características |
|------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Corte da cobertura (palhada) | Disco liso com 381 mm (15") de diâmetro |
| Sulcador de sementes | Discos duplos defasados com 356 mm (14") de diâmetro |
| Dosador de sementes | Disco horizontal com 90 furos |
| Controle de profundidade | Rodas compactadoras e reguladoras, na parte posterior |
| Discos de cobertura | Duas rodas estreitas em "V" |
| Rodas compactadoras | Roda convexa de borracha com 330 mm (13") de diâmetro e 170 mm de largura |
| Posição dos sulcadores | Alinhados |
| Sistema de transmissão | Correntes intercambiáveis |

Os sulcadores utilizados para deposição de adubo foram do tipo haste com ponteira de 17,76 mm de largura, ângulo de ataque de 42° e altura de 0,45 m (Figura 3a) ou sulcador do tipo disco duplo defasado com 381 mm (15") de diâmetro (Figura 3b).

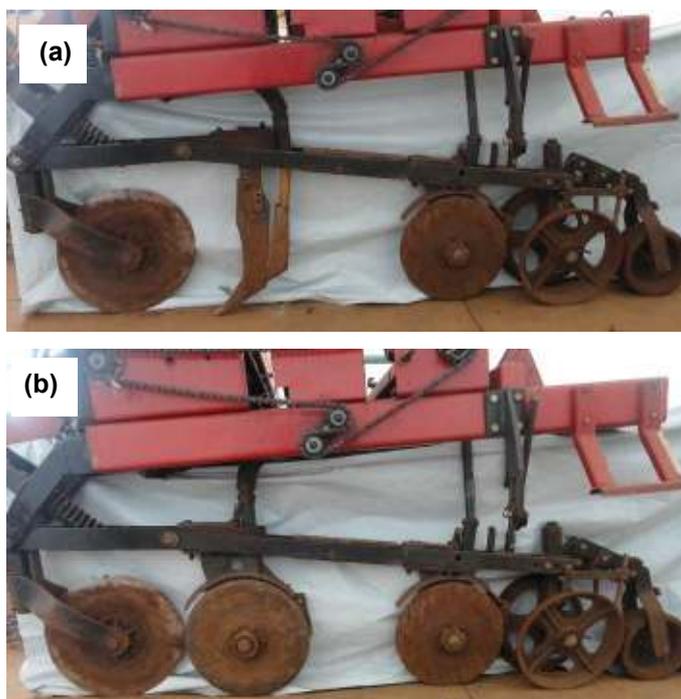


Figura 3 - Sulcadores utilizados na condução do experimento (a) sulcador tipo haste e (b) sulcador tipo disco duplo. Pato Branco, 2015.

Os tratos culturais foram realizados conforme a recomendação para a cultura da soja. Foram realizadas duas aplicações de Priori extra na dose de 300 ml ha⁻¹ em cada aplicação, para prevenção de ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) e Oídio (*Erysiphe diffusa*). Para o controle de lagarta da soja (*Anticarsia gemmatalis*), utilizou-se Connect na dose de 0,7 L ha⁻¹.

Para o controle da lagarta falsa medideira (*Pseudoplusia includens*) percevejo marrom (*Euschistus Heros*), percevejo verde (*Nezara viridula*), percevejo verde pequeno (*Piezodorus guildinii*) e ácaro utilizou-se Endosulfan na dose de 1,0 L ha⁻¹.

3.4 AVALIAÇÕES PRÉ-PLANTIO

3.4.1 Caracterização Física do Solo

3.4.1.1 Teor de água no solo

Foram realizadas avaliações de umidade do solo no momento da compactação do solo e da resistência do solo à penetração. Foi usado o método gravimétrico padrão, o qual mensura a massa de solo seco em estufa à temperatura de 105 a 110° C até obtenção de massa constante (EMBRAPA, 1997).

3.4.1.2 Densidade do solo

A densidade do solo foi determinada nas profundidades de 0,00 - 0,07 e 0,07 - 0,15 m, por meio do método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997). As amostragens foram coletadas após a realização da compactação do solo e antes da semeadura, com intuito de caracterizar a densidade no momento do plantio. Coletaram-se três amostras por profundidade em cada unidade experimental.

3.4.1.3 Resistência mecânica do solo à penetração

A resistência à penetração foi realizada com auxílio de um penetrômetro manual, marca Falker, com ponteira (cone) de 1,0 cm² de área, sendo realizada aleatoriamente dez amostragens por unidade experimental, obtendo os valores na camada de 0 a 0,4 m de profundidade (Figura 4).



Figura 4 - Coleta dos dados de resistência mecânica do solo à penetração. Pato Branco - PR, 2015.

3.5 AVALIAÇÕES PÓS-PLANTIO

3.5.1 Profundidades de Deposição de Sementes

Foi determinada nas três linhas centrais de semeadura em cada unidade experimental, medindo a profundidade de 20 sementes. Foi utilizada uma espátula para a remoção do solo sobre as sementes de forma a não retirá-las do seu local de deposição. Com as sementes descobertas determinou-se a distância da borda do sulco até o ponto onde esta se encontrava.

3.5.2 Área de Solo Mobilizada

Foi utilizado perfilômetro construído de madeira, com réguas verticais graduadas em centímetros, dispostas a cada 0,02 m no sentido transversal à linha de semeadura. As avaliações foram realizadas nas três linhas centrais de semeadura, obtendo-se a determinação dos perfis da superfície final (Figura 5a) e interno do solo mobilizado (Figura 5b).

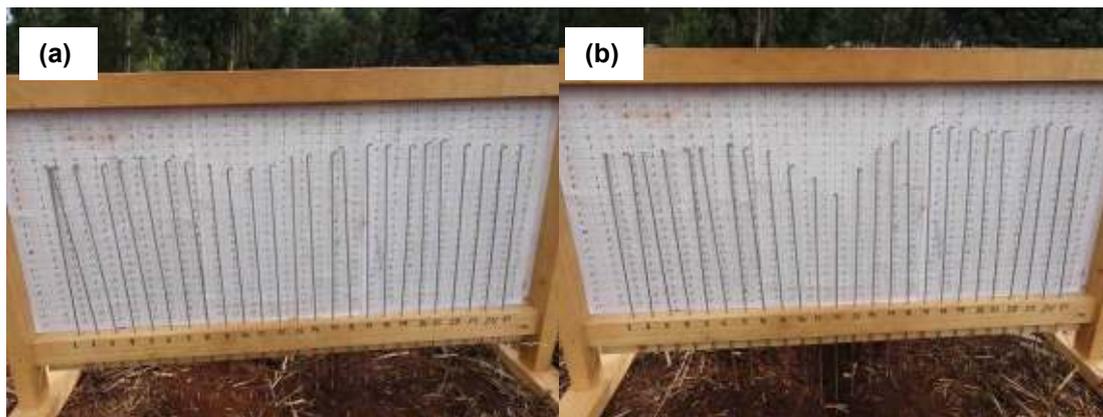


Figura 5- Vista geral do perfilômetro utilizado para avaliação do perfil da superfície final do solo (a) e perfil interno do solo mobilizado (b). Pato branco - PR, 2015.

Os cálculos de área de solo mobilizado foram realizados por meio de planimetria, segundo a equação 1:

$$Am = (P_N - P_F) * e \quad (1)$$

Em que:

Am = área mobilizada, cm^2 ;

P_N = valor do perfil da superfície natural do solo para cada ponto do perfilômetro, cm;

P_F = valor do perfil da superfície final do solo para cada ponto do perfilômetro, cm, e

e = espaçamento entre réguas verticais, cm.

3.5.3 Crescimento e Análise do Sistema Radicular

As avaliações do crescimento radicular seguiram o método de raízes lavadas proposto pela Embrapa Instrumentação Agropecuária (JORGE, 2010).

A coleta das raízes foi realizada quando a soja se encontrava no estágio de desenvolvimento reprodutivo R3 – início da formação da vagem: vagem com 5 mm de comprimento em um dos quatro últimos nós do caule com folhas completamente desenvolvidas (FARIAS; NEPOMUCENO; NEUMAIER, 2007).

A coleta das raízes foi realizada a campo seguindo a metodologia de trincheiras de Jorge e Silva (2010), a qual foi aberta transversalmente as linhas de semeadura com auxílio de uma retroescavadeira (Figura 6a), com 0,50 x 1,34 x 1,80 m de profundidade, largura e comprimento, respectivamente.

Para auxiliar na coleta das amostras de solo, foi adaptada a metodologia proposta por Goa et al. (2010), que consiste em ajustar contra a parede de cada trincheira um reticulado de madeira de 1,00 x 0,5 m, subdividido com uma malha de barbante branco em áreas de 0,10 x 0,10 m. Em seguida, foram coletados anéis volumétricos de 209,13 cm³ para amostragens de raízes em cada subdivisão, nas profundidades de 0,00 – 0,10; 0,10 - 0,20 e 0,20 - 0,30 m. Foi possível coletar as amostras nas mesmas posições em todas as parcelas. Coletou-se quinze amostras por parcela, destas, seis amostras foram coletadas em duas linhas de semeadura e nove amostras coletadas em três entrelinhas de semeadura (Figura 6b).

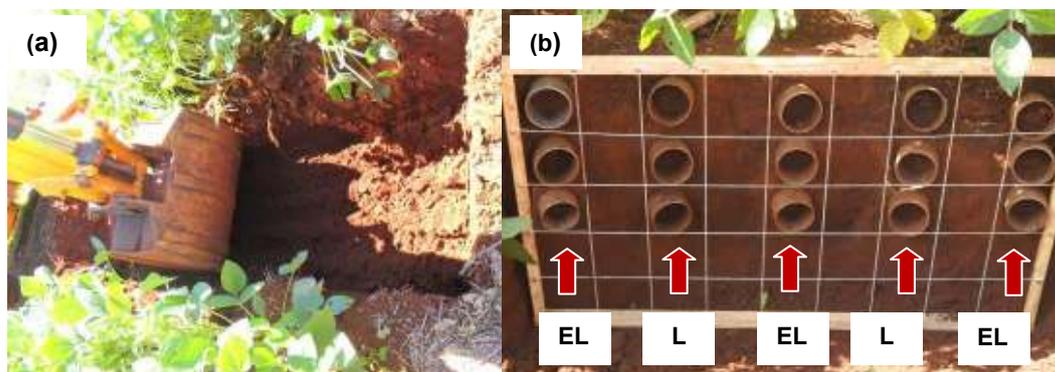


Figura 6 - Vista geral da retroescavadeira realizando a abertura da trincheira (a), e, tela quadriculada e disposição dos anéis utilizados para análise do sistema radicular da soja, detalhe para indicação de linhas (L) e entre linhas (EL) (b). Pato branco - PR, 2015.

Os anéis foram introduzidos no solo de modo a preenche-los totalmente. Após a retirada dos anéis, o volume de solo e raiz contido nos anéis foi depositado em embalagens plásticas, amarradas e devidamente identificadas, de forma a não permitir o ressecamento das amostras. Após a coleta, as amostras embaladas foram armazenadas em câmara fria a temperatura de, aproximadamente, 4°C até a realização das lavagens das raízes.

Em laboratório foi realizada a lavagem das amostras de solo, que se constituiu da separação das raízes com o auxílio de um conjunto de peneiras com

malha de 4,75, 2,00 e 1,00 mm, respectivamente, as quais possuíam a função de auxiliar na separação e limpeza das raízes, sendo que, após este processo as raízes eram reagrupadas e depositadas em recipientes plásticos, devidamente identificados. Após a lavagem, realizou-se a separação de fragmentos ou resíduos orgânicos e minerais presentes nas amostras, com auxílio de uma pinça (Figura 7).

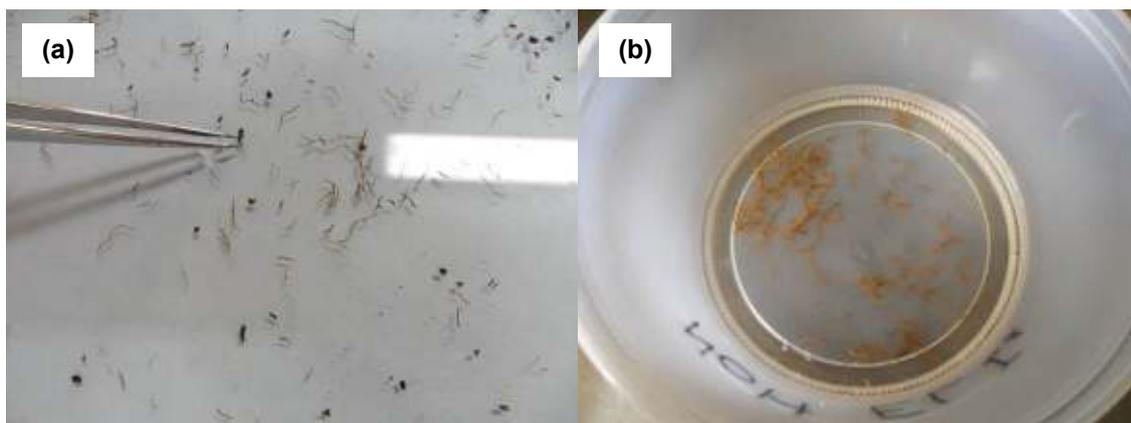


Figura 7 - Separação de resíduos indesejados (a), amostras de raízes após lavagem e armazenadas em recipiente identificado (b). Pato Branco- PR, 2015.

Com as raízes já limpas e identificadas realizou-se o escaneamento com auxílio de um escâner de leitura óptica com resolução mínima de 200 dpi. Para a realização do escaneamento, utilizou-se uma placa de vidro transparente de tamanho igual ao da tela do escâner, onde as raízes foram dispostas com água.

A utilização da água se fez necessária para que não ocorresse sombreamento e sobreposição das raízes no momento do escaneamento e para auxiliar a separação das raízes e pelos radiculares sem que os mesmos se rompessem. Com auxílio de pinças fez-se a separação de todos os fragmentos radiculares presentes na amostra (Figura 8).

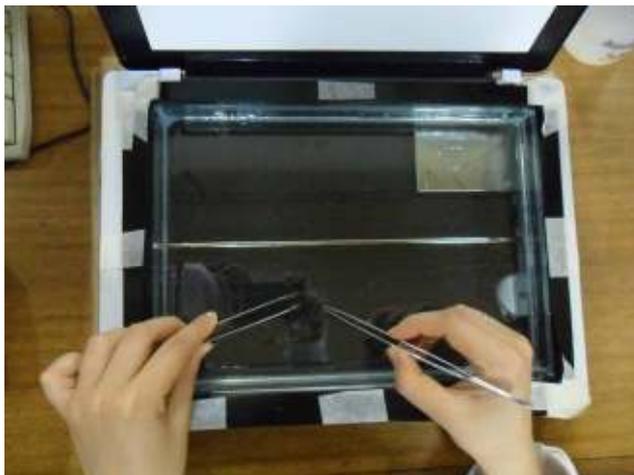


Figura 8 - Separação dos fragmentos radiculares para evitar sobreposição entre raízes. Pato Branco-PR, 2015.

Após o processo de separação dos fragmentos radiculares realizou-se o escaneamento, o qual originou as imagens desejadas (Figura 9).



Figura 9 - Imagens originadas do escaneamento das raízes, utilizadas posteriormente para obtenção dos dados. Pato Branco - PR, 2015.

As imagens geradas pelo processo de escaneamento foram processadas com auxílio do software SAFIRA, 2010 – Sistema para Análise de Fibras e Raízes – desenvolvido pelo Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária - CNPDIA, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (JORGE; RODRIGUES, 2008). O processamento de

imagens originou os dados de volume (mm^3), área superficial (mm^2), diâmetro médio ponderado (mm) e comprimento (mm) total de raízes por amostra (Figura 10).

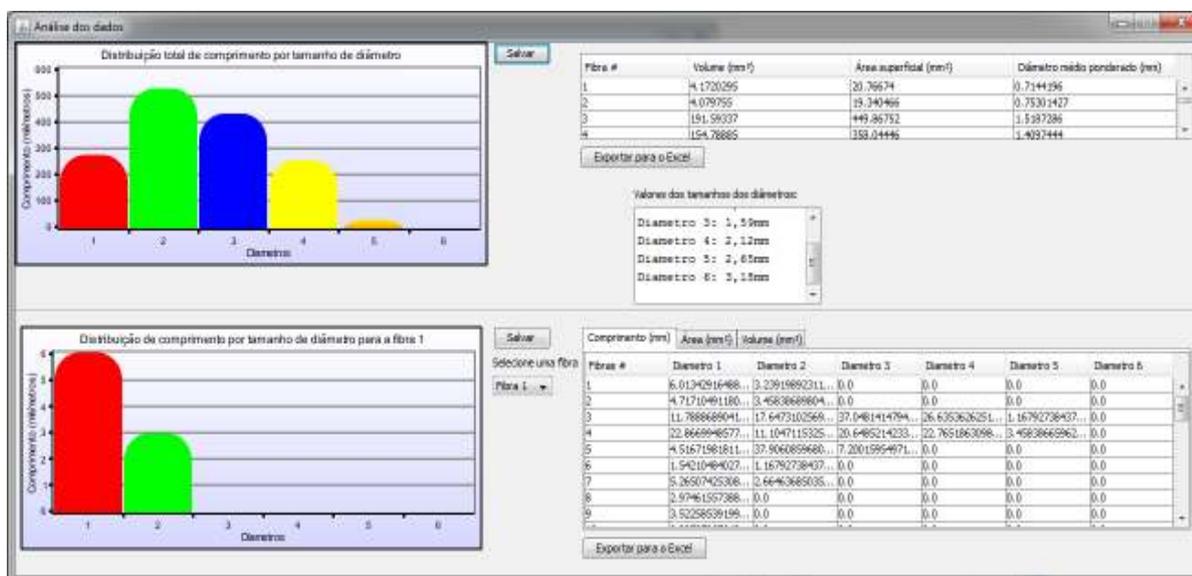


Figura 10 - Histograma de saída dos dados do programa Safira, fornecendo os dados de volume (mm^3), área superficial (mm^2), diâmetro médio ponderado (mm) e comprimento (mm). Pato Branco - PR, 2015.

3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Os dados foram avaliados por meio de análise de variância pelo teste F. As médias dos dados de física do solo e qualidade de semeadura foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Já as médias dos dados de crescimento radicular foram comparadas pelo teste de LSD ($p < 0,05$). As análises foram realizadas no Sistema para Análises Estatísticas e Genéticas, SAEG versão 9.1 (FUNARBE, 2007).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A síntese da análise de variância para densidade do solo (DS), profundidade de semeadura (PS) e área de solo mobilizado (AM) são apresentados no Apêndice A e, o volume de raiz (mm^3), área superficial de raiz (mm^2), diâmetro médio de raiz (mm) e comprimento de raiz (mm) de soja, em função de níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores são apresentadas nos Apêndices B, C e D, com suas respectivas profundidades.

4.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

4.1.1 Resistência Mecânica do Solo à Penetração

Os valores médios de resistência à penetração (MPa), em função dos diferentes níveis de compactação do solo, são apresentados na Figura 11, onde se observa que o tratamento tráfego em seis passadas apresentou os maiores valores de resistência à penetração até a profundidade de 0,22 m, diminuindo posteriormente, seguido dos tráfegos em quatro e duas passadas até a profundidade de 0,20 m. Durante a realização da resistência à penetração, a umidade do solo encontrava-se em 37,7%.

Os dados apresentados demonstram o comportamento típico de áreas submetidas ao tráfego excessivo e desordenado de máquinas, tráfego com umidade de solo inadequada e pneus impróprios ao tamanho do maquinário, o que ocasiona compactação nas diferentes camadas de solo. Dessa forma, quando o peso aplicado excede a resistência interna do solo, ocorrem mudanças nas propriedades físicas desse solo (HORN, 1988).

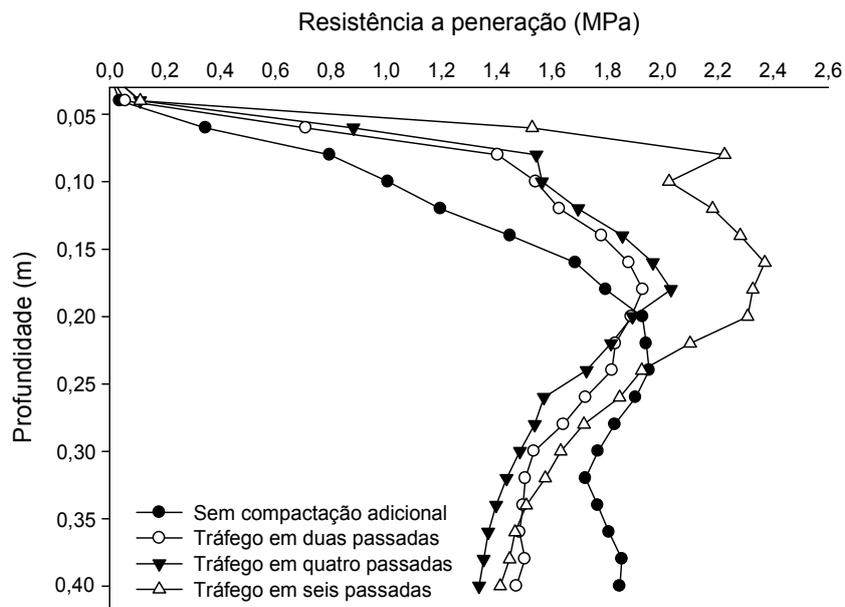


Figura 11- Resistência mecânica do solo à penetração em função do número de passadas do trator. Pato Branco – PR, 2015.

A compactação do solo traz muitas consequências e limitações, podendo comprometer o crescimento e a funcionalidade do sistema radicular de algumas culturas, quando esta se apresenta acima de 2,0 MPa (TAYLOR et al., 1966; TORMENA et al., 1998; NESMITH, 1987). Já, valores de resistência à penetração de 2,8 a 3,2 MPa podem retardar a elongação das raízes (VEPRASKAS; MINER, 1986).

Para Merotto Junior e Mudstock (1999) valores de resistência à penetração de 2,0 MPa ocasionou ligeira redução da matéria seca de raízes e do comprimento radicular, porém não se observou restrições graves ao crescimento da parte aérea das plantas de trigo cultivadas em vasos. Em trabalhos conduzidos a campo, diversos autores relatam que valores de 2,0 MPa podem ocasionar a redução do crescimento radicular de soja (DE MARIA; CASTRO; SOUZA DIAS, 1999; ROSOLEM, ALMEIDA, SACRAMENTO, 1994; SECCO, 2003).

No presente estudo, somente o tráfego em seis passadas apresentou valores de resistência à penetração maiores que 2,0 MPa. Alguns pesquisadores relatam que o fator de maior limitação para o crescimento radicular é a resistência à penetração que o solo oferece ao crescimento das raízes (VOORHEES, 1983).

Nas profundidades de 0,20 a 0,40 m observa-se que os tratamentos apresentaram comportamento semelhante (Figura 11), pois os efeitos de

compactação do solo tendem a se concentrar nos primeiros 0,20 m de profundidade. Esse comportamento se deve ao efeito cumulativo do tráfego nas camadas superficiais do solo, característico de sistema de plantio direto (KLEIN; BOLLER, 1995), uma vez que até a profundidade de 0,20 m é onde ocorre a maior dissipação de peso do conjunto motomecanizado por meio dos pneus.

Muitos problemas de compactação do solo estão relacionados com o tráfego de máquinas e o tipo de pneus utilizados nos maquinários, nas operações de semeadura, tratos culturais e colheita (FLOWERS; LAL, 1998), pois a maioria dos pneus utilizados são de banda diagonal, caracterizando maior rigidez, o que impede que o pneu se molde no solo seguindo as irregularidades do terreno reduzindo, dessa forma, a área de contato pneu-solo e, conseqüentemente, aumentando a pressão na superfície do solo (SILVA; REINERT; REICHERT, 2000).

Uma forma de evitar ou reduzir o efeito de compactação do solo seria reduzir o tráfego ou concentrar as operações nos períodos que o solo apresente menor umidade (HAKANSSON; MEDVEDEV, 1995).

4.1.2 Densidade do Solo

Os níveis de compactação influenciaram significativamente na densidade do solo (kg dm^{-3}) na profundidade de 0,00 - 0,07 m, para a profundidade de 0,07 - 0,15 m, não houve diferença significativa para os níveis de compactação aplicados (Tabela 3).

Observa-se também, que o tratamento sem compactação adicional apresentou os menores valores de densidade para ambas as profundidades, porém, para a profundidade de 0,00 - 0,07 m o mesmo não diferiu significativamente do tratamento tráfego em duas passadas. Isso se deve ao fato de a área estar sendo cultivada em sistema de plantio direto durante anos, o que acaba por aumentar a densidade do solo por meio de compactação devido ao tráfego de máquinas comum a esse sistema e a acomodação natural das partículas sólidas (HAKANSSON; MEDVEDEV, 1995)

Tabela 3 - Valores médios da densidade do solo (kg dm^{-3}) na profundidade de 0,00-0,07 e 0,07-0,15 m em função dos diferentes níveis de compactação do solo. Pato Branco – PR, 2015.

| Níveis de compactação (N) | Profundidades (m) | |
|----------------------------|-----------------------------------|--------------|
| | 0,0 – 0,07 | 0,07 – 0, 15 |
| | -----(kg dm^{-3})----- | |
| Sem compactação adicional | 1,13 b | 1,20 |
| Tráfego em duas passadas | 1,20 ab | 1,26 |
| Tráfego em quatro passadas | 1,22 a | 1,21 |
| Tráfego em seis passadas | 1,24 a | 1,23 |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Bergamin et al. (2010) observaram que em solo argiloso há aumento da compactação até duas passadas do trator de 5,0 toneladas, sendo que o tráfego em quatro e seis passadas não apresentaram influência significativa na densidade do solo. Os autores observaram ainda, que o tráfego de trator alterou a densidade do solo até a profundidade de 0,10 m, constatando que em sistema de plantio direto, o tráfego de máquinas provoca aumento da compactação do solo, de forma mais expressiva na camada de 0,00 - 0,10 m de profundidade.

A ausência de diferenças significativas na densidade do solo na profundidade de 0, 07 – 0,15 m pode estar relacionada à presença de matéria orgânica no solo (Tabela 1), a qual proporciona estabilidade de agregados, além de influenciar indiretamente na densidade, na porosidade do solo e na infiltração de água (BAYER, MIELNICZUK, 1999).

A compactação do solo pode ocasionar mudanças no potencial produtivo das culturas devido à redução da macroporosidade e aumento da microporosidade, ocasionando dessa forma, aumento na densidade do solo, resultando em maior resistência física ao crescimento radicular em condição de solo seco, e ocorrência de falta de oxigênio e elevação das concentrações de etileno na região radicular em condição de solo úmido (JIMENEZ et al., 2008).

4.2 PARÂMETROS DE QUALIDADE DE SEMEADURA

4.2.1 Profundidade de Semeadura

O sulcador tipo haste tem sido utilizado nas semeadoras–adubadoras de plantio direto principalmente em locais de solo argiloso, como uma alternativa para romper camadas superficiais compactadas e penetrar até maiores profundidades (ARAUJO et al., 1999). Essa maior profundidade de atuação da haste, pode ocasionar maior profundidade de semeadura.

Para a profundidade de semeadura observa-se que não houve efeito significativo para níveis de compactação do solo (Tabela 4), e que os mesmos variaram de 0,03 a 0,06 m, considerados adequados para a cultura da soja (CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2006).

Tabela 4- Valores médios da profundidade de semeadura de soja (cm) em função dos diferentes níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores. Pato Branco – PR, 2015.

| Níveis de compactação (N) | Profundidade de semeadura (cm) |
|----------------------------|--------------------------------|
| Sem compactação adicional | 5,01 |
| Tráfego em duas passadas | 4,62 |
| Tráfego em quatro passadas | 4,50 |
| Tráfego em seis passadas | 4,02 |
| Sulcador (S) | |
| Disco | 4,71 a |
| Haste | 4,36 b |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Com relação aos mecanismos sulcadores, observa-se que o sulcador tipo disco apresentou maiores valores médios de profundidade de semeadura do que o sulcador tipo haste. Isso ocorreu, pois, a linha de plantio da semeadora utilizada era composta por um conjunto de barras articuladas e molas de pressão inclinadas em relação à vertical, as quais tem a função de deslocar a haste para trás quando esta

encontrar um obstáculo (pedras, madeiras ou solo compactado) que ofereça maior resistência que a tensão da mola de segurança (MIALHE, 2012). Esse sistema é também conhecido como “pula pedra”, tendo como objetivo evitar danos ao sulcador (CASÃO JUNIOR; SIQUEIRA, 2006). Esse deslocamento da haste fez com que a mesma trabalhasse em profundidade menor que o disco, reduzindo assim a profundidade de semeadura.

O sulcador tipo disco, devido seu formato construtivo, tem a função de cortar o solo abrindo o sulco de semeadura aonde será depositada a semente, dessa forma, exige menos tração do trator e não apresenta problemas de repulsão, já que sua função é cortar o solo por meio de compressão e não por sucção como a haste (SCHLOSSER et al., 1999).

Resultados semelhantes foram encontrados por Reis et al. (2004) e Camilo et al. (2004), os quais trabalhando com mecanismos sulcadores observaram que o sulcador do tipo disco duplo apresentou a maior profundidade de semeadura do que a haste sulcadora. A maior profundidade de semeadura ocasionada pelo disco é atribuída a maior estabilidade às paredes do sulco em relação à haste sulcadora (REIS et al., 2004).

A profundidade de semeadura é um fator fundamental para uma boa emergência e bom estabelecimento inicial da lavoura, pois segundo Ortolani et al. (1986), as sementes devem ser depositadas na profundidade ideal ao seu crescimento, de acordo com suas características fisiológicas.

Se as sementes forem depositadas em grandes profundidades, ao germinarem, as plântulas possuirão uma espessa camada de solo para explorar até chegar a superfície (REIS et al., 2004), levando mais tempo para emergir e ficando assim expostas ao ataque de pragas do solo, o que irá inviabilizar a germinação (KOAKOSKI et al., 2007). Caso as sementes sejam depositadas superficialmente no solo, as altas temperaturas solares que atingem a superfície podem promover a sua desidratação.

4.3 ÁREA DE SOLO MOBILIZADA

Os valores médios de área de solo mobilizada (cm²) são apresentados na Tabela 5, onde observa-se que os níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores não influenciaram significativamente no parâmetro avaliado.

Tabela 5 - Valores médios da área de solo mobilizada (cm²) na implantação da cultura da soja em função dos diferentes níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores. Pato Branco – PR, 2015.

| Níveis de compactação (N) | Área de solo mobilizada (cm ²) |
|----------------------------|--------------------------------------------|
| Sem compactação adicional | 59,53 |
| Tráfego em duas passadas | 57,74 |
| Tráfego em quatro passadas | 45,99 |
| Tráfego em seis passadas | 43,01 |
| Sulcador (S) | |
| Disco | 53,12 ^{ns} |
| Haste | 50,01 |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Isso pode estar relacionada ao mecanismo “pula pedra”, anteriormente, o qual dificultou a penetração da haste sulcadora no solo, dessa forma não apresentou diferença significativa na área de solo mobilizada. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Mion et al. (2009) que não observaram diferenças significativas em área de solo mobilizada quando comparado mecanismos sulcador tipo disco duplo e haste, no entanto diferiram dos obtidos por Grego (2002) e Mello, Pinto e Yano (2003) os quais obtiveram maior área de solo mobilizado no sulco de semeadura quando da utilização do mecanismo sulcador tipo haste, em relação ao disco duplo.

A haste sulcadora, tem sido utilizada como alternativa para romper camadas compactadas superficialmente, características do sistema de plantio direto, porém essas hastes exigem maior força de tração e maior gasto de combustível (ARAÚJO

et al. 1998), e muitas vezes não desempenham adequadamente sua função, como pode ser observado nos dados apresentados.

Silva et al. (2006), Unger e Kaspar, (1994) ressaltam que a haste sulcadora tende a ocasionar maior mobilização do solo comparado com o disco duplo, além de ser uma alternativa para contornar problemas relacionados a compactação superficial do solo.

A haste permite deposição do adubo a profundidades maiores estimulando assim o crescimento radicular das plantas (CONTE et al., 2008) e a exploração de um maior volume de solo. Para Araújo et al. (2001), a melhor haste é aquela que consegue penetrar em solo de maior densidade superficial, movimentando pouco o solo no sulco e exigindo pouca força de tração.

Trogello et al. (2013) em estudos com velocidade de semeadura e deposição de palhada, em mesmo solo e com mesma semeadora, não observaram diferença estatística na área de solo mobilizada entre mecanismos sulcador tipo disco e haste na semeadura do milho.

4.4 SISTEMA RADICULAR

4.4.1 Volume de raiz

A compactação do solo influenciou significativamente o volume de raiz para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m na entre linha de semeadura (Tabela 6). Os maiores volumes de raízes foram obtidos no tratamento sem compactação adicional, esse resultado se justifica pois, segundo Beulter e Centurion (2004) em solos com impedimento mecânico reduzido, o sistema radicular apresenta melhor distribuição e consegue se desenvolver de forma adequada.

Já para as profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m, na linha houve diferença significativa entre os tratamentos, porém, apresentaram médias de volume de raiz de 21,20; 20,48 e 15,97 mm³, respectivamente e média de 15,23 mm³ para a entre linha na profundidade de 0,10-0,20 m.

Tabela 6 - Efeito dos níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores no volume de raízes de soja (mm^3) coletados na linha e entre linha de semeadura em diferentes profundidades. Pato Branco – PR, 2015.

| Compactações | Entre linha | |
|----------------------------|------------------|-----------|
| | Profundidade (m) | |
| | 0,00-0,10 | 0,20-0,30 |
| Sem compactação adicional | 19,82 a | 13,21 a |
| Tráfego em duas passadas | 15,03 bc | 10,39 b |
| Tráfego em quatro passadas | 17,95 ab | 10,67 b |
| Tráfego em seis passadas | 13,95 c | 8,72 b |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de LSD ($p < 0,05$).

Para as profundidades de 0,00-0,010 e 0,20-0,30 na linha de semeadura e 0,10-0,20 m na entre linha não apresentaram diferença significativa. E os mecanismos sulcadores não influenciaram significativamente no volume de raiz para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m na linha de semeadura e 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m na entre linha.

Esses resultados podem estar relacionados ao bom crescimento da planta, devido à mobilização do solo, na linha de semeadura proporcionada pelos sulcadores e as boas condições pluviométricas ocorridas no período de dezembro de 2013 a fevereiro de 2014 (Figura 1), que compreende o ápice de crescimento do sistema radicular da cultura da soja.

De acordo com Boone et al. (1986) a maior expressão do efeito de compactação do solo no sistema radicular se dá durante o crescimento da cultura em condições de restrição hídrica. Freddi et al. (2007) ao avaliarem o crescimento radicular do milho, também não observaram efeitos da compactação do solo sob condições pluviométricas favoráveis.

Já, o menor volume de raiz foi observado no tratamento com maior tráfego (seis passadas) para ambas as profundidades, que corresponde a maior densidade do solo (Tabela 3). Esse resultado pode ser atribuído a dificuldade dos sulcadores em desestruturar o solo, na entre linha de semeadura, fazendo com que compactação do solo limitasse de alguma forma o crescimento das raízes.

Em trabalho conduzido a campo em um Latossolo Vermelho distrófico, Beulter e Centurion (2004) constataram que o sistema radicular da soja foi afetado pela compactação do solo, a medida que se elevou a resistência do solo a penetração.

Houve interação significativa entre níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores para volume de raiz na profundidade de 0,10 - 0,20 m na linha de semeadura (Tabela 7), onde se verifica que, para o sulcador tipo disco duplo os tratamentos sem compactação adicional, tráfego com quatro e seis passadas não apresentaram diferenças significativas entre si. Já para o sulcador tipo haste somente o tratamento sem compactação adicional apresentou diferença significativa em relação aos demais tratamentos, o qual apresentou o menor volume de raiz.

Tabela 7 - Efeito da interação entre níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores no volume (mm^3) de raízes de soja na linha de semeadura na profundidade de 0,10-0,20 m. Pato Branco – PR, 2015.

| Volume de raiz (mm^3) | | |
|----------------------------------|------------|-----------|
| Níveis de Compactação | Sulcadores | |
| | Disco | Haste |
| Sem compactação adicional | 32,90 aA | 14,51 bB |
| Tráfego em duas passadas | 15,45 bB | 23,76 aA |
| Tráfego em quatro passadas | 18,59 aB | 20,15 aA |
| Tráfego em seis passadas | 18,70 aB | 19,23 aAB |

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si, médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha não diferem entre si pelo teste LSD ($p < 0,05$)

A haste sulcadora tem característica de realizar a desestruturação lateral do solo e possui efeito descompactador em profundidade (ANDREOLLA, 2005), sendo assim, em solo sem compactação adicional a haste proporcionou melhor aprofundamento e distribuição das raízes da soja no perfil do solo, abrangendo a linha, a entre linha e conseqüentemente um maior volume de solo, em comparação com o sulcador disco.

O disco devido ao seu formato construtivo tem a característica de atuar em menor profundidade no solo, não minimizando os efeitos do adensamento superficial, característica natural do sistema de plantio direto, sobre o crescimento

radicular, dessa forma, ocasionou maior concentração de raízes na profundidade de 0,10-0,20 m.

Quando se comparou mecanismos sulcadores sob os níveis de compactação, pôde se observar que, a haste sulcadora aprestou maiores volumes de raízes para os tratamentos tráfego em duas, quatro e seis passadas em relação ao disco duplo, isso ocorreu pois, mesmo a haste apresentando menor profundidade de semeadura a característica destrutiva da haste favorece o melhor crescimento do sistema radicular das culturas (GERMINO; BENES, 2006).

4.4.2 Área Superficial de Raiz

Os níveis de compactação do solo influenciaram significativamente a área superficial de raiz nas profundidades de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m na entre linha de semeadura (Tabela 8). Os maiores valores de área superficial de raiz foram observados no tratamento sem compactação adicional, porém os mesmos não diferiram estatisticamente do tratamento tráfego em quatro passadas.

As profundidades de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m na linha de semeadura, não apresentaram diferenças significativas para área superficial de raiz, apresentando médias de 57,43; 54,82 e 45,38 mm², respectivamente e média de 45,01 mm² para a profundidade de 0,10-0,20 m na entre linha.

Tabela 8 - Efeito dos níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores na área superficial de raízes de soja (mm²) coletados na linha e entre linha de semeadura em diferentes profundidades. Pato Branco – PR, 2015.

| Compactações | Entre linha | |
|----------------------------|------------------|-----------|
| | Profundidade (m) | |
| | 0,00-0,10 | 0,20-0,30 |
| Sem compactação adicional | 57,53 a | 41,06 a |
| Tráfego em duas passadas | 45,94 bc | 34,36 b |
| Tráfego em quatro passadas | 52,93 ab | 35,65 ab |
| Tráfego em seis passadas | 43,47 c | 30,58 b |

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de LSD ($p < 0,05$).

Para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,20- 0,30 na linha e 0,10-0,20 na entre linha, não houve diferença significativa entre área superficial de raiz, Oliveira et al. (2012) também não observaram diferenças significativas entre os valores de área superficial de raízes, em estudos com sistema radicular da cultura da soja submetido a níveis de compactação do solo de 0, 2, 4 e 6 passadas com trator pesando 11 toneladas em Latossolo Vermelho eutroférico nas profundidades de 0,10 - 0,20 m na entre linha de crescimento da cultura.

Houve interação significativa entre os fatores compactação do solo e mecanismo sulcadores para a profundidade de 0,10–0,20 m na linha (Tabela 9), observa-se que, o comportamento dos dados de área superficial e volume de raiz são semelhantes, tanto para as diferenças entre os níveis de compactação como para os sulcadores. Isso ocorreu, pois matematicamente, há uma relação direta entre volume e área superficial, sendo que a medida que o volume aumenta há maior área superficial de raiz, justificando essa relação.

Tabela 9 - Efeito da interação entre níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores na área superficial (mm^2) de raízes de soja na linha de semeadura na profundidade de 0,10-0,20 m. Pato Branco – PR, 2015.

| Área superficial de raízes (mm^2) | | |
|----------------------------------------------|------------|----------|
| Níveis de Compactação | Sulcadores | |
| | Disco | Haste |
| Sem compactação adicional | 77,87 aA | 45,74 bB |
| Tráfego em duas passadas | 47, 78 bB | 55,68 aA |
| Tráfego em quatro passadas | 51,95 aB | 55,99 aA |
| Tráfego em seis passadas | 51,30 aB | 52,27 aA |

Médias seguidas de letras minúsculas diferentes, na coluna, e minúsculas diferentes na linha diferem ($P < 0,05$) pelo teste LSD.

Um dos fatores que influenciam o crescimento radicular, bem como a área superficial das raízes é a umidade do solo. Silva et al. (2000) observaram que, em altas condições de umidade, as diferenças de resistência à penetração para solo

compactado e não compactado geralmente são baixas, porém, quando os solos tornam-se secos, as camadas de solo compactadas causarão danos e restrições ao crescimento radicular.

A matéria orgânica presente no solo auxilia fortemente no crescimento radicular, pois confere aos solos maior capacidade de resistir a perturbações, melhora a infiltração e armazenamento de água, aeração do solo, ciclagem de nutrientes e proporciona menor resistência ao crescimento radicular, além de melhora o desenvolvimento da microbiota do solo (BAYER, 2004).

No entanto, Davies e Zange (1991) relatam que as raízes parecem dispor de mecanismos que detectam como estão às condições de solo e dessa foram adaptam-se a elas para garantir o desenvolvimento da planta, essa detecção pode estar relacionada às rizobactérias as quais são promotoras do crescimento radicular das plantas (ZATORRE, 2008).

4.4.3 Diâmetro de Raiz

O diâmetro de raiz apresentou diferença significativa somente para a profundidade de 0,20 - 0,30 m na linha e na entre linha de semeadura, não havendo diferenças entre os mecanismos sulcadores. As médias apresentadas para o diâmetro de raiz para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m foram 0,91 e 0,93 mm para linha, respectivamente e 0,88 e 0,87 mm para entre linha, não apresentando diferença significativa entre os tratamentos.

O maior diâmetro de raiz encontrado na linha de semeadura foi para o tratamento sem compactação adicional o qual não diferiu do tratamento tráfego em quatro passadas. Para a entre linha também observou-se maior diâmetro de raiz no tratamento sem compactação adicional não diferindo estatisticamente do tráfego em duas e quatro passadas (Tabela 10).

raízes de soja coletados na linha e entre linha de semeadura em diferentes profundidades. Pato Branco – PR, 2015.

| Compactações | Profundidade (m) | |
|----------------------------|------------------|-------------|
| | 0,20-0,30 | |
| | Linha | Entre linha |
| Sem compactação adicional | 0,90 a | 0,84 a |
| Tráfego em duas passadas | 0,84 b | 0,81 ab |
| Tráfego em quatro passadas | 0,89 a | 0,82 a |
| Tráfego em seis passadas | 0,83 b | 0,78 b |

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste LSD ($p < 0,05$)

Estudo realizados por Beulter e Centurion (2004), em Latossolo Vermelho sob compactação do solo, por meio de passadas de trator de 11 toneladas, com densidade do solo entre de 1,19 e 1,81 Mg m^{-3} na parcela sem compactação adicional e 1,81 Mg m^{-3} na parcela com seis passadas, com umidade do solo correspondente a capacidade de campo (0,1 MPa), os mesmos não observaram alterações significativas no diâmetro de raízes de soja até a profundidade de 0,15 m.

Em Latossolo Vermelho eutroférico, submetido a níveis de compactação do solo, Oliveira et al. (2012) observaram diferenças significativas no diâmetro das raízes de soja na profundidade de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m quando submetidas a compactação do solo por meio de passadas do trator de 11 toneladas, onde se observou densidade do solo para camadas 0,0-0,10 m variando de 1,19 a 1,35 Mg m^{-3} para as compactações de 0 e 6 passadas respectivamente, já para a profundidade de 0,10-0,20 m os autores obtiveram densidades de 1,31 a 1,32 Mg m^{-3} para 0 e 6 passadas, sob irrigação de 0,001, 0,01 e 0,05 MPa, porém a diferença entrada no diâmetro radicular apresentou distribuição quadrática em relação aos níveis de compactação do solo.

A presença de diferenças significativas entre os diâmetros, para os níveis de compactação na profundidade de 0,20-0,30 m pode estar relacionada com a característica de a compactação adicional possuir sua maior expressividade até a profundidade de 0,20 m, dessa forma as raízes que atingem profundidades superiores a esta encontraram menores restrições físicas do solo ao seu crescimento.

A resistência do solo a penetração avaliado pelo penetrômetro, apontou

valores mais expressivos de resistência do solo à penetração no tratamento tráfego em seis passadas, a qual atingiu aproximadamente 2,2 a 2,4 MPa até a profundidade aproximada de 0,20 m (Figura 11), porém não se observou diferença significativa no diâmetro de raízes até a profundidade de 0,20 somente a partir desta.

A possível explicação para a não diferença nos dados crescimento radicular pode seguir o raciocínio de Bengough e Mullins (1990), onde os mesmos esclarecem que, os penetrômetros são sondas rígidas metálicas e se restringem a um caminho linear no solo, dessa forma penetram no solo com maior magnitude do que as raízes, porém as raízes são órgãos flexíveis, seguem caminhos tortuosos através do solo, sempre em busca de zonas com menor resistência ao seu crescimento.

Mesmo com essa limitação o penetrômetro até o momento, é o melhor equipamento para mensurar a resistência do solo a penetração (BENGHOUGH; MULLINS (1990).

4.4.4 Comprimento de Raiz

O comprimento de raiz foi influenciado significativamente somente pelos níveis de compactação do solo na entre linha de semeadura para a profundidade de 0,10-0,20 m (Tabela 11), onde se observa que o maior comprimento foi constatado no tratamento sem compactação adicional e o menor comprimento foi observado no tráfego em seis passadas. Isso ocorreu, pois em solos sem compactação, as raízes apresentam maior distribuição e crescimento (COLLARES et al., 2008), e o sistema radicular se desenvolve melhor devido a presença de macroporos e galerias deixadas por raízes de culturas antecessoras (WILLIAMS; WEIL, 2004).

Não houve diferença significativa para as profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m na linha de semeadura e 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m na entre linha, porém, estas apresentaram as médias de 4,04, 4,45 e 4,51 mm para linha e 4,04 e 4,07 mm para entre linha nas respectivas profundidades.

Tabela 11 - Efeito dos níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores no comprimento de raízes de soja (mm) coletados na linha e entre linha de semeadura em diferentes profundidades. Pato

Branco – PR, 2015.

| Compactações | Entre linha |
|----------------------------|------------------|
| | Profundidade (m) |
| | 0,10–0,20 |
| Sem compactação adicional | 4,64 a |
| Tráfego em duas passadas | 4,21 ab |
| Tráfego em quatro passadas | 4,20 ab |
| Tráfego em seis passadas | 3,79 b |

Médias seguidas de mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste LSD ($p < 0,05$)

O comprimento de raiz foi afetado de forma expressiva somente pelo maior nível de compactação, sendo que o menor crescimento radicular em solos compactados ocorre devido à menor taxa de alongação celular em razão da redução da taxa de divisão celular meristemática (BENGHOUGH; MULLINS, 1990). Segundo os mesmos, se a presença de poros no solo forem distribuídos de tal modo que apenas o eixo principal da raiz sofra impedimento, as raízes laterais conseguem penetrar livremente, podendo atingir maior extensão do que em solo sem impedimento.

Outro fator que auxilia na alongação das raízes em solos compactados é a fauna do solo, que desenvolvem cavidades no perfil do solo no sentido vertical, indicando que o solo é capaz de recuperar alguns graus de compactação pelos processos biológicos (HOLLAND, 2004).

Já Oliveira et al (2012) não observaram diferença significativa no comprimento radicular da cultura da soja para as profundidades de 0,00-10 e 0,10-0,20 m em solo compactado com 0, 2, 4 e 6 passadas de trator de 11 toneladas.

A não coerência de relação entre a resistência à penetração do solo e o crescimento radicular da cultura da soja, pode estar relacionado segundo Cardoso et al. (2006), ao fato de a avaliação com o penetrômetro ser de caráter bidimensional, onde foi avaliado somente o plano da parede do perfil do solo, não sendo considerada a resistência do solo à penetração em todas as áreas de abrangência do sistema radicular de uma planta.

Valores de resistência à penetração de 2 MPa não são limitantes ao crescimento da cultura segundo estudos de Vieira e Klein (2007). Para Benghough e

Mullins (1990), as raízes cessam seu crescimento no solo quando a resistência à penetração é aproximadamente seis vezes maiores do que a pressão máxima axial que as raízes podem exercer.

A densidade do solo no presente estudo não ultrapassou os valores críticos ao crescimento do sistema radicular da cultura da soja para solos argilosos descrito por Klein e Camera (2007) como sendo de $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ ou de $1,35 \text{ Mg m}^{-3}$, conforme apontado por Reichert et al. (2009).

5. CONCLUSÕES

A resistência à penetração se elevou a medida que os níveis de compactação se elevaram, até a profundidade de aproximadamente 0,20 m. A densidade do solo na profundidade de 0,00 - 0,07 m foi afetada pelos níveis de compactação solo.

A profundidade de semeadura e a área de solo mobilizada não foram influenciadas pelos níveis de compactação do solo. Os mecanismos sulcadores influenciaram somente a profundidade de semeadura.

A compactação do solo e os mecanismos sulcadores alteraram o crescimento radicular, sendo que o volume e a área superficial de raiz apresentaram interações entre, níveis de compactação do solo e mecanismos sulcadores na linha de semeadura, para a profundidade de 0,10-0,20 m, os níveis de compactação também influenciaram o volume e área de raiz na entre linha para a profundidade de 0,00-0,10 e 0,20-0,30 m. O diâmetro de raízes sofreu influência dos níveis de compactação do solo para a linha e entre linha na profundidade de 0,20-0,30 m e o comprimento de raiz na entre linha para a profundidade de 0,10-0,20 m.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muitos fatores influenciam no crescimento de uma cultura, refletindo na produtividade final. Dessa forma, torna-se importante dar atenção aos fatores controláveis, como a qualidade física, química e biológica do solo, escolha da cultivar adaptada a região, instalação da lavoura, tratos culturais e maximizar o uso de medidas que minimizem os fatores negativos do clima, buscando opções de manejo adequado do solo, que venham a auxiliar no crescimento das culturas mesmo em condições de estresse.

Dessa forma, torna-se importante conhecer a capacidade de suporte de carga do solo, bem como suas características físicas, regime pluviométrico e, assim, adequar as operações agrícolas a fim de evitar danos ao solo que possam prejudicar o crescimento da cultura.

Considerando que a área trabalhada passa por sistema de rotação de culturas, possui sistema de plantio direto consolidado e a estruturação do solo é favorável ao crescimento da cultura, seria interessante estudar áreas com intenso uso, pouca cobertura vegetal nos períodos de entre safra e/ou que pratiquem sucessão de culturas.

Tomar os devidos cuidados com semeadoras-adubadoras que possuam o sistema “pula pedra” na haste sulcadora, pois esta pode não estar desempenhando sua principal função que é de romper as camadas superficiais compactadas.

A ocorrência de períodos de estiagem pode favorecer estudo com compactação do solo e crescimento radicular, devido a necessidade que as plantas têm em aprofundar o sistema radicular em busca de água, e a maior resistência do solo a penetração das raízes o que poderá acarretar diferenças no volume, área superficial, diâmetro e comprimento do sistema radicular da cultura.

Ressalva-se que a compactação do solo não tem influência somente no crescimento do sistema radicular das plantas ou diretamente na produtividade, mas a compactação do solo traz outros problemas como degradação do solo por meio da erosão hídrica, que ocorre devido a redução da macro e aumento da microporosidade do solo, reduzindo a infiltração de água no solo. A erosão ocasiona

perda de solo, nutrientes e matéria orgânica de extrema importância para um bom crescimento e produtividade das culturas;

REFERÊNCIAS

ANDREOLLA, V. R. M. **Eficácia de sulcadores de semeadoras-adubadoras e suas implicações sobre a cultura da soja e nos atributos físicos de um Latossolo sob integração lavoura-pecuária.** 2005, 174 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Agrícola) Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2005.

ARAÚJO A. G.; CASÃO JUNIOR, R.; MEDEIROS, G. B.; CASTRO FILHO, C.; DORETTO, M.; BERTÉ, A. A.; CAVIGLIONE, J. H.; FIGUEIREDO, P. R. A. Identificação das restrições para expansão do plantio direto na região da represa de Itaipu. **In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE PLANTIO DIRETO NA PEQUENA PROPRIEDADE**, 3., 1998, Pato Branco. Trabalhos apresentados. Pato Branco: IAPAR, p. 18, 1998.

ARAÚJO, A. G.; CASÃO JÚNIOR, R.; RALISCH, R.; SIQUEIRA, R. Mobilização de solo e emergência de plantas na semeadura direta de soja (*Glycine max L.*) e milho (*Zea mays L.*) em solos argilosos. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 19, n. 2, p. 226-237, 1999.

ARAÚJO, A. G.; CASÃO JÚNIOR, R.; SIQUEIRA, R. Mecanização do plantio direto: problemas e soluções. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná. 18 p. **Informe da Pesquisa**, n. 137, 2001. (Informe da Pesquisa 137).

AZEVEDO, M. C. B. DE. **Efeito de Três sistemas de manejo físico do solo no enraizamento e na produção de cana-de-açúcar.** 2008, 101 f. Tese (Doutor em Agronomia). Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2008.

BASSOI, L. H. FANTE JUNIOR, L.; JORGE, L. A. C.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K. Distribuição do sistema radicular do milho irrigado em terra roxa estruturada latossólica: II: Comparação entre cultura irrigada e fertirrigada. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 51, n. 3, p. 541-548, 1994.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. **In: SANTOS, G. A; CAMARGO, F.A.O. (ed.) Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais.** Porto Alegre: Gênese. p. 9-26, 1999.

BAYER, C. Manejando os solos agrícolas para alta qualidade em ambientes tropicais. **In.: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS**, 26., REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 10., SIMPÓSIO

BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO. REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 1CD-ROM, Lages. SBCS: UDESC Lages, 2004.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO A. C. T.; FRANCHINI J. C.; SOUZA, C. M. A. DE; SOUZA F. R. DE. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 681-691, 2010.

BERTOL, I.; COGO, N. P.; LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e na ausência dos resíduos culturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 409-418, 1997.

BENGHOUGH, A. G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, v. 41, n.3, p. 341-358, 1990.

BENGHOUGH, A. G.; BRANSBY, M. F.; HANS, J.; MCKENNA S. J.; ROBERTS, T. J.; VALENTINE, T. A. Root responses to soil physical conditions; growth dynamics from field to cell. **Journal of Experimental Botany**, v. 57, n. 2, p. 437-447, 2006.

BENJAMIN, J.G.; NIELSEN, D.C. A method to separate plant roots from soil and analyze root surface área. **Plant and Soil**, Colorado, v. 267 p. 225-234, 2004.

BEULTER, A. N.; CENTURIO, J. F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 581-588, 2004.

BEULTER, A. N.; CENTURIONO, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 7, p. 849-856, 2004.

BOONE, F. R.; WERF, H. M. G.; KROESBERGEN, B.; HAAG, B. A.; BOERS, A. The effect of compactation of the arable layer in sandy soils on the growth of maize of silage. II. Soil conditions and growth. Nether. **Journal of Agricultural Science**, v. 35, p. 113-128, 1986.

BRASIL, F. C. **Variabilidade espacial e temporal de características morfológicas do sistema radicular de gramíneas forrageiras**. 2005. 137f. Tese (Doutorado em ciência do solo). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2005.

BORDIN I.; NEVES. C. S. V. J.; MEDINA, C. DE C.; SANTOS, J. C. F. DOS.; TORRES, E.; URQUIAGA, S. Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho em plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 12, p. 1785-1792, 2008.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: ESALQ, p.132, 1997.

CAMILO, A. J.; FERNANDES, H. C.; MODOLO, A. J.; RESENDE, RICARDO C. de. Influência de mecanismos rompedores e velocidades de trabalho no desempenho de uma semeadora-adubadora de plantio direto do feijão. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 12, n. 3, p. 203-211, 2004.

CASÃO JUNIOR, R. **Máquinas e qualidade de semeadura em plantio direto**. Passo Fundo, RS: Revista Plantio Direto, Aldeia Norte Editora, ed. 96, 2006.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G.; FUENTES, R. L. SISTEMA PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL: Fatores que promoveram a evolução do sistema e o desenvolvimento de máquinas agrícolas. Londrina, p.100, 2008.

CASÃO JUNIOR, R.; SIQUEIRA, R. Máquinas para manejo de vegetações e semeadura em plantio direto. In: Ruy Casão Junior; Rubens Siqueira; Yeshwant Ranchandra Mehta; João José Passini. (Org.). Plantio direto com qualidade. 1ed. Londrina-Foz do Iguaçu: Instituto Agrônômico do Paraná - ITAIPU Binacional, v. 1, p. 85-126, 2006.

CARDOSO, E. G; ZOTARELLI, J.; PICCININ, L.; TORRES, E.; SARAIVA, O. F; GUIMARÃES, M. F. de. Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 493-501, 2006.

CHAN, K. Y.; ROBERTS, W. P.; HEENAN, D. P. Organic carbon and associated soil properties of a red earth after 10 years of rotation under different stubble and tillage practices. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 30, n. 1, p. 71-83, 1992.

COGO N. P.; LEVIEN R.; SCHWARZ R. A. Perdas de solo e água por erosão hídrica influenciadas por métodos de preparo, classes de declive e níveis de fertilidade do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 743-753, 2003.

COLLARES, G. L.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 933-942, 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **CONAB** - Acompanhamento da safra brasileira: grãos, décimo levantamento, julho / Companhia Nacional de Abastecimento. - Brasília: Conab, 2014. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_07_09_09_36_57_10_levantamento_de_graos_julho_2014.pdf>. Acessado em: 25 jul. 2014.

CONTE, O.; LEVIEN R.; TREIN, C. R.; MAZURANA, M.; DEBIASI, H.; Resistência mecânica do solo e força de tração em hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras em sistema de integração lavoura-pecuária. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 730-739, 2008.

COSTA, A.; VIEIRA, M. J.; BRAGAGNOLO, N.; MUZILLI O.; PAN W. Programas de Conservação do solo e da água em Microbacias: o caso do Paraná, resultados obtidos e novos desafios. In: SIMPÓSIO NACIONAL SOBRE O USO DA ÁGUA NA AGRICULTURA, 2006. Passo Fundo, p.12, 2006.

COSTA, C.; DWYER, L. M.; HAMILTON, R. I.; HAMEL, C.; NANTAIS, L.; SMITH, D. L.; A sampling method for measurement of large root systems with scanner-based image analysis. **Agronomy Journal**, v. 92, n. 4, p. 621-627. 2000.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; ALOARENGAI, R. C.; SANTANA, D; P. Plantio direto e sustentabilidade do sistema agrícola. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 208, p.13-24, 2001.

DAVIES, W. J.; ZANGH, J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 42, p. 55 - 76, 1991.

DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; DIAS, H. S. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 703-709, 1999.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; HONGWEN, L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 3 n. 1, p. 1- 26, 2010.

DOWDY, R. H.; NATER, E. A.; DOLAN, M. S. Quantification of the length and diameter of root segments with public domain software. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 26, p. 459–468, 1995.

DUARTE, A. P.; DEUBER, R. Levantamento de plantas infestantes em lavouras de milho safrinha no Estado de São Paulo. **Revista Planta Daninha**, Viçosa, v. 17, n. 2, p. 297- 307, 1999.

EHLERS W, KÖPKE U, HESSE F.; BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 3, p. 261–275, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – **EMBRAPA**. Centro Nacional de Ciência do Solo. Manual de métodos de análise de solos. 2. ed. Rio de Janeiro, p. 212,1997.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – **EMBRAPA**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 306, 2006.

FARRELL, R. E.; WALLEY, F. L.; LUKEY, A. P.; GERMIDA, J. J. Manual and digital line-intercept methods of measuring root length: A comparison. **Agronomy Journal**, v. 85, n. 6, p. 1233–1237, 1993.

FARIAS, J. R. B.; NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N. Ecofisiologia da soja. Londrina: Embrapa Soja. p. 8, (Embrapa Soja. Circular técnica, 48). 2007

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. **FEBRAPDP**. Disponível em: <http://www.febrapdp.org.br/download/AREA_PD_MUNDO.pdf> Acessado em: 20 jun. 2014.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - **FAO**- Food Outlook – Biannual report on global food markets. October 2014. Disponível em: < <http://www.fao.org> > acessado em: 01 abril 2015.

Food Outlook BIENNIAL REPORT ON GLOBAL FOOD MARKETS

FLOWERS, M.D., LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil e Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, n. 2, p. 21-35, 1998.

FREDDI, O. DA S.; CENTURION, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI R. G.; LEONEL, C. L. Compactação do solo no crescimento radicular e produtividade da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 4, p. 627-636, 2007.

FREITAS, M. C. M. de. A cultura da soja no Brasil: o crescimento da produção Brasileira e o surgimento de uma nova fronteira agrícola. **In: ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer**, Goiânia, v. 7, n. 12, 2011.

FUNDAÇÃO ARTHUR BERNARDES – FUNARB, SAEG Sistema para Análise Estatística. Versão 9.1, UFV, Viçosa, 2007.

GERMINO, R.; BENEZ, S. H. Ensaio comparativo em dois modelos de hastes soldadoras para semeadoras-adubadoras de plantio direto. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 21, n. 3, p. 85-92, 2006.

GOA Y.; DUAN, A.; QIU, X.; LIU, Z.; SUN, J.; ZHANG, J.; WANG, H. Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system. **Agricultural Water Management**, v. 98, n.1, p. 199–212, 2010.

GREGO, Célia R. **Sistemas de manejo do solo e da cobertura vegetal na cultura da soja (*Glycine Max (L.) Merrill*) semeada com dois mecanismos sulcadores**. 2002. 139 f. Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

HAKANSSON, I.; MEDVEDEV, V.W. Protection of soils from mechanical overloading by establishing limits for stresses caused by heavy vehicles. **Soil e Tillage Research**, Amsterdam, v.35, p.85-97, 1995.

HAKANSSON, I.; STENBERG, M.; RYDBERG, T. Long-term experiments with different depths of mouldboard ploughing in Sweden. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 46, n. 3-4 p. 209-223, 1998.

HIRAKURI, M. H. Efeito da estiagem na viabilidade Econômica da produção de soja no oeste do Paraná: Um estudo de caso da safra 2008/20091. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 2, p. 230-237, 2010

HIRAKURI, M. H.; LAZZAROTTO, J. J. Evolução e perspectivas de desempenho econômico associadas com a produção de soja nos contextos mundial brasileiro. Londrina: **Embrapa Soja**, p. 46, 2011. (Documentos, 319).

HOLLAND, J. M. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe: reviewing the evidence. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 103, p. 1-25, 2004.

HORN, R. Compressibility of arable land. *Catena*, Jerusalém, v. 11, p. 53-71, 1988.

JIMENEZ, R. L.; GONÇALVES, W. G.; ARAÚJO FILHO, J. V.; ASSIS, R. L.; PIRES, F.R.; SILVA, G.P. Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um latossolo vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 116-121, 2008.

JOHNSON, J. F.; VOORHEES, W. B.; NELSON, W.W. & RANDALL, G.W. Soybean growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, p. 973-979, 1990.

JORGE, L. A. de C; RODRIGUES, A. F. de O. Safira: sistema de análise de fibras e raízes. São Carlos, p. 20. 2008. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento-EMBRAPA).

JORGE, L. A. C de. SILVA, D. J. da C. B. S. SAFIRA: Manual de utilização. Embrapa Instrumentação, São Carlos, 2010.

KIMURA, K.; YAMASAKI, S. Root length and diameter measurement using NIH Image: Application of the line-intercept principle for diameter estimation. **Plant and Soil**, v. 234, n. 1, p. 37-46. 2001.

KLEIN, V.A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 395-398, 1995.

KLEIN, V. A.; CAMARA, R. K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto escarificado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 2, n. 31, p. 221-227, 2007.

KOAKOSKI, A.; SOUZA, C. M. A. de; RAFULL, L. Z. L.; SOUZA, L. C. F. de; REIS, E. F. dos. Desempenho de semeadora-adubadora utilizando-se dois mecanismos rompedores e três pressões da roda compactadora. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 5, p. 725-731, 2007.

KOKKO, E. G.; VOLKMAR, K. M.; GOWEN, B. E.; ENTZ, T. Determination of total root surface area in soil core samples by image analysis. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 26, p. 33–43, 1993.

LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem**. 2002, 58 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

LYNCH, J. Root architecture and plant productivity. **Plant Physiology**, Waterbury, v. 109, n. 1, p. 7-13, 1995.

MAACK, R. Geografia física do estado do Paraná. Curitiba: **Banco de Desenvolvimento do Paraná**, p. 350, 1968.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – **MAPA**. Portaria 131, zoneamento agrícola da soja para o Paraná safra 14/15. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/politica-agricola/zoneamento-agricola/portarias-segmentadas-por-uf>>. Acessado em: 02 abr. 2015.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. London: Academic Press, p. 889 1995.

MELLO, L. M. M.; PINTO, E. R.; YANO, E. H. Distribuição de sementes e produtividade de grãos da cultura do milho em função da velocidade de semeadura e tipos de dosadores. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 563-567, 2003.

MEROTTO A.; MUNDSTOCK C. M. Crescimento de raízes de trigo afetado pela resistência mecânica do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n.3, p.197-202,1999.

MIALHES, L. G. Máquinas agrícolas para plantio. São Paulo: Millennium. 2012.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PEQUÁRIA E ABASTECIMENTO. **MAPA. SOJA**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/soja>>. Acessado em: 12 de Maio de 2013.

MION, R. L.; BENEZ, S. H.; VILIOTTI, C. A.; MOREIRA, J. B.; SALVADOR, N. Análise tridimensional de esforços em elementos rompedores de semeadoras de

plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 5, p. 1414-1419, 2009.

NESMITH, D.S. Soil compaction in double cropped wheat and soybean on Ultissol. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 51, p. 183-186, 1987.

OLIVEIRA, I. J. de. **Relação genética entre produtividade de óleo e podridão vermelha das raízes**. 2011. 168 f. Tese (Doutorado em Ciência) – Escola superior de Agricultura “Luiz de Queirós”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2011.

OLIVEIRA, P. R. DE.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. DA C.; FRANCO, H. B. J.; PEREIRA, F. DE S.; JÚNIOR L. S. B.; ROSSETTI, K. DE V. Qualidade Física de um Latossolo Vermelho cultivado com soja submetido a níveis de compactação e de irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 587-597, 2012.

ORTOLANI, A. F.; BANZATTO, D. A.; BORTOLI, N. M. Influência da profundidade de semeadura e da compactação do solo, na emergência e desenvolvimento do sorgo granífero (*Sorghum bicolor* (L.) MOENCH). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 15., 1986, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBEA, p. 27-39, 1986.

QUEIROZ-VOLTAN, R. B.; NOGUEIRA, S. Dos. S. S.; MIRANDA, M. A. C, De. Aspectos da estrutura da raiz e do desenvolvimento de plantas de soja em solos compactados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 5, p. 929-938, 2000.

RAVEN, P.H., EVERT, R.F., & EICHHORN, S.E. **Biologia Vegetal**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1996.

RAWITSCHER, F. **Elementos básicos da botânica: introdução aos estudos da botânica**. São Paulo: Ed. Nacional, 1979.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HÄKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 102, p. 242-254, 2009.

REIS, E. F. dos.; FERNANDES, H. C.; SCHAEFER, C. E. G. R; ARAÚJO, E. F. Avaliação de mecanismos rompedores e compactadores em semeadura direta. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 12, n. 3, p. 212- 221, 2004.

ROSOLEM, C. A.; ALMEIDA, A. C. S.; SACRAMENTO, L. V. S. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. **Bragantia**, Campinas, v. 53, n. 2, p. 259-266, 1994.

SANTANA, C. T. C. **Comportamento de milho (*Zea mays L.*) e propriedades físicas do solo, no sistema plantio direto, em resposta a aplicação de fertilizante organomineral**. 2012. 49 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universidade estadual paulista “Júlio de Mesquita Filho” (Faculdade de Ciências Agronômicas). Botucatu, 2012.

SCHLOSSER, J. F.; BERTOL, O. J.; BERTOL, I.; LAVORANTI, O. J. Desempenho de três mecanismos sulcadores de semeadora na presença de diferenças culturas destinada à cobertura de inverno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 19, n. 1, p. 64-70, 1999.

SECCO, D. **Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois Latossolos sob plantio direto**. 2003, 105 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SEDIYAMA T.; TEIXEIRA R. C da; BARROS, H. B. **Origem, evolução e importância econômica**. In: Tecnologias de produção e usos da soja, Sidiyama Tuneo, Editora Mecenaz LTDA, p. 314, Londrina, 2009.

SIQUEIRA, R. Milho: Semeadoras-adubadoras para sistema plantio direto com qualidade. In: XXVII CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 2008, Londrina. **Anais eletrônicos...** Paraná; <<http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Molin/leb432/Semeadoras/semeadora-adubadora.pdf>>. Acessado em 20 jun. 2013.

SILVA, V. R. REINERT, D. J.; REICHERT J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 191-199, 2000.

SILVA, A. R.; DIAS JUNIOR, M. S.; GUIMARRÃES, P. T. G.; ARAÚJO JUNIOR, C. F. Modelagem da capacidade de suporte de carga e quantificação dos efeitos das operações mecanizadas em um latossolo amarelo cultivado com cafeeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 207-216, 2006.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S. Plantio direto no cerrado. IN: PEIXOTO, R.T.G.; AHRENS, D.C.; SAMAHA, M.J. Plantio direto – O caminho para uma agricultura

sustentável. Ponta Grossa: Instituto Agronômico do Paraná, p. 158-184. 1997.

SOCIEDADE BRASIEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO - Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre, 2004.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT J. M.; KAISER, D. R.; Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M.F.; MEDINA, C.C.; BALBINO, L.C.; NEVES, C.S.V.J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 393- 399, 1999.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M; PARKER, J. J. Soil strength - Root penetration relations to medium to coarse – textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, n. 1, p. 18-22, 1966.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F; GALERANI, P. R. Manejo do solo para a cultura da soja. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, p. 71, 1993. (EMBRAPA-CNPSo. Circular técnica, 12).

TORRES, E. T; SARAIVA, O. F. Impedimento mecânico do solo em sistema agrícola com a soja. Londrina: **Embrapa Soja**, p. 58, 1999. (Circular técnica, 23).

TROGELLO E.; MODOLO, A. J.; SCARSI, M. DALLACORT, R. Manejos de cobertura, mecanismos sulcadores e velocidades de operação sobre a semeadura direta da cultura do milho. **Bragantina**, Campinas, v. 72, n. 1, p. 101-109, 2013.

UNGER, P.W.; KASPAR, T.C. Soil compactacion and root growth: A review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, n. 4, p. 759-66, 1994.

VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A.; PERECIN, D.; JORGE, L. A. C.; LANDELL, M. G. A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 27, n. 5, p. 849-858, 2003.

VEPRASKAS, M.J.; MINER, G.S. Effects of subsoiling and mechanical impedance on tobacco root-growth. **Soil e Tillage Research**, Amsterdam, v. 50, p. 423-427, 1986.

VIEIRA, M.L.; KLEIN, V.A. Propriedades físico-hídricas de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p.1271-1280, 2007.

VOORHEES, W. B. Relative effectiveness of tillage and natural forces in alleviating wheel-induced soil compaction. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 47, p. 129- 133, 1983.

VOORHEES, W. B. Root activity related to shallow and deep compaction. In: *Mechanics and Related Processes in Structured Agricultural Soils*. **Kluwer Academic Publishers**, Dordrecht, v. 172, p. 173–186, 1989.

WILLIAMS, S.M.; WEIL, R.R. Crop Cover Root Channels May Alleviate Soil Compaction Effects on Soybean Crop. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 1403-1409, 2004.

ZATORRE, N. P. Atributos biológicos do solo como indicadores de qualidade do solo. **Gaia Scientia**, Paraíba, v. 2 n. 1, p. 9-13, 2008.

APÊNDICES

ÍNDICE DE APÊNDICES

- APÊNDICE A - Fontes de variação e graus de liberdade, para densidade do solo (DS) nas profundidades de 0,00 - 0,07 e 0,07 - 0,15 m, profundidade de semeadura (PS) e área de solo mobilizada (AM). 68
- APÊNDICE B - Fontes de variação, graus de liberdade e quadrado médio dos caracteres volume de raiz (VR), área superficial de raiz (AR), diâmetro médio ponderado de raiz (DR) e comprimento de raiz (CR) na profundidade de 0,0 – 0,10 m, coletados na linha e entre linha de semeadura em função de níveis de compactação e mecanismos sulcadores. 68
- APÊNDICE C - Fontes de variação, graus de liberdade e quadrado médio dos caracteres volume de raiz (VR), área superficial de raiz (AR), diâmetro médio ponderado de raiz (DR) e comprimento de raiz (CR) na profundidade de 0,10 – 0,20 m, coletados na linha e entre linha de semeadura em função de níveis de compactação e mecanismos sulcadores. 68
- APÊNDICE D - Fontes de variação, graus de liberdade e quadrado médio dos caracteres para volume de raiz (VR), área superficial de raiz (AR), diâmetro médio ponderado de raiz (DR) e comprimento de raiz (CR) na profundidade de 0,02 – 0,30 m, coletados na linha e entre linha de semeadura em função de níveis de compactação e mecanismos sulcadores. 70

APÊNDICE A - Fontes de variação e graus de liberdade, para densidade do solo (DS) nas profundidades de 0,00 - 0,07 e 0,07 - 0,15 m, profundidade de semeadura (PS) e área de solo mobilizada (AM).

| FV | GL | DS (cm ³) | | PS (cm) | AM (cm) |
|-----------------|----|-----------------------|------------|---------|---------|
| | | 0,0-0,07 | 0,07 -0,15 | | |
| Bloco | 3 | 0,001 | 0,005 | 0,75 | 132,87 |
| Compactação (C) | 3 | 0,001** | 0,003 | 1,32 | 588,85 |
| Erro (a) | 9 | 0,001 | 0,004 | 0,43 | 229,98 |
| Sulcador (S) | 1 | - | - | 1,03** | 77,34 |
| CxS | 3 | - | - | 0,07 | 217,16 |
| Erro (b) | 12 | - | - | 0,11 | 183,47 |
| Cv (s) (%) | | 2,95 | 5,54 | 7,27 | 26,27 |

*: Significativo (P<0,05). **: Significativo (P<0,01). C.V.: Coeficiente de Variação.

APÊNDICE B - Fontes de variação, graus de liberdade e quadrado médio dos caracteres volume de raiz (VR), área superficial de raiz (AR), diâmetro médio ponderado de raiz (DR) e comprimento de raiz (CR) na profundidade de 0,0 – 0,10 m, coletados na linha e entre linha de semeadura em função de níveis de compactação e mecanismos sulcadores.

| FV | GL | Linha | | | |
|-----------------|----|-------------|----------|------|------|
| | | VR | AR | DR | CR |
| Bloco | 3 | 351,45 | 1350,48 | 0,03 | 1,12 |
| Compactação (C) | 3 | 12,84 | 68,38 | 0,00 | 0,53 |
| Erro (a) | 9 | 11,50 | 27,11 | 0,00 | 0,17 |
| Sulcador (S) | 1 | 29,18 | 41,43 | 0,00 | 0,20 |
| CxS | 3 | 25,89 | 136,38 | 0,00 | 0,42 |
| Erro (b) | 12 | 21,96 | 76,38 | 0,00 | 0,19 |
| Cv (geral) (%) | | 22,10 | 15,25 | 5,25 | 9,20 |
| | | Entre linha | | | |
| Bloco | 3 | 260,64 | 1153,71 | 0,03 | 0,70 |
| Compactação (C) | 3 | 57,77** | 331,77** | 0,00 | 0,29 |
| Erro (a) | 9 | 11,85 | 61,53 | 0,00 | 0,12 |
| Sulcador (S) | 1 | 1,69 | 4,79 | 0,00 | 0,01 |
| CxS | 3 | 0,75 | 7,13 | 0,00 | 0,05 |
| Erro (b) | 12 | 10,98 | 60,65 | 0,00 | 0,13 |
| Cv (s) (%) | | 19,86 | 15,58 | 4,11 | 8,84 |

*: Significativo (P<0,05). **: Significativo (P<0,01). C.V.: Coeficiente de Variação.

APÊNDICE C - Fontes de variação, graus de liberdade e quadrado médio dos caracteres

volume de raiz (VR), área superficial de raiz (AR), diâmetro médio ponderado de raiz (DR) e comprimento de raiz (CR) na profundidade de 0,10 – 0,20 m, coletados na linha e entre linha de semeadura em função de níveis de compactação e mecanismos sulcadores.

| FV | Linha | | | | |
|-----------------|-------------|----------|----------|------|--------|
| | GL | VR | AR | DR | CR |
| Bloco | 3 | 273,50 | 1412,35 | 0,05 | 0,54 |
| Compactação (C) | 3 | 39,05 | 181,98 | 0,00 | 0,35 |
| Erro (a) | 9 | 86,30 | 173,17 | 0,00 | 1,04 |
| Sulcador (S) | 1 | 31,96 | 184,69 | 0,00 | 0,05 |
| CxS | 3 | 262,71** | 679,83** | 0,02 | 1,43 |
| Erro (b) | 12 | 61,67 | 131,27 | 0,00 | 0,91 |
| Cv (s) (%) | | 38,47 | 20,90 | 7,86 | 21,43 |
| FV | Entre linha | | | | |
| | GL | VR | AR | DR | CR |
| Bloco | 3 | 315,41 | 1523,87 | 0,04 | 1,42 |
| Compactação (C) | 3 | 66,64 | 340,65 | 0,00 | 0,96** |
| Erro (a) | 9 | 38,79 | 165,98 | 0,00 | 0,20 |
| Sulcador (S) | 1 | 13,68 | 14,44 | 0,00 | 0,00 |
| CxS | 3 | 26,34 | 117,14 | 0,00 | 0,31 |
| Erro (b) | 12 | 25,53 | 103,80 | 0,00 | 0,29 |
| Cv (s) (%) | | 33,16 | 22,63 | 4,47 | 12,76 |

*: Significativo (P<0,05). **: Significativo (P<0,01). C.V.: Coeficiente de Variação.

APÊNDICE D - Fontes de variação, graus de liberdade e quadrado médio dos caracteres para volume de raiz (VR), área superficial de raiz (AR), diâmetro médio ponderado de raiz (DR) e comprimento de raiz (CR) na profundidade de 0,02 – 0,30 m, coletados na linha e entre linha de semeadura em função de níveis de compactação e mecanismos sulcadores.

| FV | Linha | | | | |
|-----------------|-------------|---------|----------|--------|-------|
| | GL | VR | AR | DR | CR |
| Bloco | 3 | 162,07 | 787,76 | 0,01 | 1,02 |
| Compactação (C) | 3 | 49,16 | 335,32 | 0,01** | 0,08 |
| Erro (a) | 9 | 43,28 | 122,12 | 0,00 | 0,30 |
| Sulcador (S) | 1 | 0,188 | 8,091 | 0,00 | 0,07 |
| CxS | 3 | 63,91 | 181,79 | 0,00 | 0,99 |
| Erro (b) | 12 | 23,90 | 95,210 | 0,00 | 0,53 |
| Cv (s) (%) | | 30,61 | 21,60 | 5,67 | 15,96 |
| FV | Entre linha | | | | |
| | GL | VR | AR | DR | CR |
| Bloco | 3 | 45,80 | 307,97 | 0,00 | 0,97 |
| Compactação (C) | 3 | 27,43** | 150,29** | 0,00** | 0,24 |
| Erro (a) | 9 | 4,95 | 25,90 | 0,00 | 0,12 |
| Sulcador (S) | 1 | 0,00 | 1,82 | 0,00 | 0,40 |
| CxS | 3 | 0,19 | 2,34 | 0,00 | 0,04 |
| Erro (b) | 12 | 7,11 | 36,98 | 0,00 | 0,40 |
| Cv (s) (%) | | 24,81 | 17,17 | 3,25 | 15,62 |

*: Significativo (P<0,05). **: Significativo (P<0,01). C.V.: Coeficiente de Variação.