

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO DO SISTEMA RADICULAR DA SOJA SOB SISTEMAS  
DE MANEJO DO SOLO**

**LAÉRCIO AUGUSTO PIVETTA**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Agricultura)

BOTUCATU-SP

Fevereiro – 2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO DO SISTEMA RADICULAR DA SOJA SOB SISTEMAS  
DE MANEJO DO SOLO**

**LAÉRCIO AUGUSTO PIVETTA**

Orientador: Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia (Agricultura)

BOTUCATU-SP

Fevereiro – 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

P693a Pivetta, Laércio Augusto, 1986-  
Avaliação do sistema radicular da soja sob sistemas de manejo do solo / Laércio Augusto Pivetta. - Botucatu : [s.n.], 2011  
vii, 42 f. : gráfs., tabs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2011

Orientador: Ciro Antonio Rosolem  
Inclui bibliografia

1. Soja - Produtividade. 2. Soja - Raízes. 3. Solos - Manejo. 4. Solos - Produtividade. I. Rosolem, Ciro Antonio. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU**

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO: AVALIAÇÃO DO SISTEMA RADICULAR DA SOJA SOB SISTEMAS DE  
MANEJO DO SOLO

ALUNO: LAÉRCIO AUGUSTO PIVETTA

ORIENTADOR: PROF. DR. CIRO ANTONIO ROSOLEM

Aprovado pela Comissão Examinadora



---

PROF. DR. CIRO ANTONIO ROSOLEM



---

PROF. DR. JULIANO CARLOS CALONEGO



---

PROF. DR. JOSÉ SALVADOR SIMONETTI FOLONI

Data da Realização: 25 de fevereiro de 2011.

**DEDICO**

*Aos meus pais Valderi Luiz Pivetta e Maria de Lurdes Pivetta, exemplos de vida e dedicação, minha eterna gratidão e respeito.*

*À minha noiva, Mayara Rodrigues, pelo carinho e apoio nos momentos difíceis dessa caminhada.*

**OFEREÇO**

*À Deus, pelo dom da vida e proteção. Tudo sem Ele é nada e nada com Ele é tudo.*

## AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Ciências Agronômicas - FCA/UNESP – pela oportunidade e suporte na realização do mestrado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Prof. Ciro Antonio Rosolem pela orientação e suporte na condução deste experimento.

Aos professores da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Mônica Sarolli Silva de Mendonça Costa, Luiz Antônio de Mendonça Costa e Emerson Fey, pela construção de meu caráter profissional e incentivo na realização da pós-graduação, além da amizade.

Ao técnico do laboratório de relação solo-planta, Dorival Pires de Arruda, pela amizade e apoio na realização das análises de laboratório.

Aos amigos Dácio Olibone e Ana Paula Encide Olibone, pelo apoio na chegada à Botucatu e orientações na condução desta pesquisa.

Aos amigos Gustavo Castoldi, Samuel Luiz Fioreze e Lucas Barbosa de Freitas e ao meu irmão e amigo Laerte Gustavo Pivetta, que estiveram sempre presentes nas coletas e avaliações de campo.

Aos docentes e funcionários do Departamento de Produção Vegetal.

Aos estagiários Gabriel Peixoto dos Santos (Spantaio) e Caio Cesar Carnelos (Chicuta).

Aos colegas de pós-graduação do Departamento de Produção Vegetal, pelo companheirismo e amizade.

**EPIGRAFE**

*“Sit down before fact like a little child, and be prepared to give up every preconceived notion.  
Follow humbly wherever and to whatever abyss Nature leads, or you shall learn nothing.”*

Thomas Henry Huxley (1825-1895)

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
LISTA DE FIGURAS .....	VI
LISTA DE TABELAS .....	VII
1. RESUMO .....	1
2. SUMMARY .....	3
3. INTRODUÇÃO.....	5
4. REVISÃO DE LITERATURA .....	7
4.1. Sistema radicular das plantas.....	7
4.2. Compactação do solo.....	8
4.3. Manejo da compactação do solo.....	9
4.4. Avaliação do sistema radicular.....	11
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
5.1. Caracterização da área experimental .....	14
5.2. Delineamento experimental e tratamentos .....	14
5.3. Instalação e condução do experimento.....	15
5.3.1. Culturas de inverno.....	15
5.3.2. Manejo de primavera .....	16
5.3.2. Cultura da soja .....	18
5.4. Avaliações .....	19
5.4.1. Atividade radicular da soja.....	19
5.4.2. Avaliações diretas do sistema radicular da soja .....	20
5.4.3. Produtividade da soja .....	21
5.5. Análise dos resultados .....	21
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	23
6.1. Densidade de comprimento radicular da soja.....	23
6.2. Atividade radicular da soja.....	26
6.3. Análise da distribuição vertical do sistema radicular da soja.....	28
6.4. Comparação entre as metodologias .....	30
6.5. Produtividade da soja .....	33



7. CONCLUSÕES .....	35
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	36

**LISTA DE FIGURAS**

	<b>Página</b>
Figura 1 – Resistência do solo a penetração sob cultivo de girassol e triticales, antes (a) e após (b) a escarificação (Setembro/2009).....	16
Figura 2 – Temperatura média e precipitação acumulada semanal durante o ciclo da cultura da soja, safra 2009/2010.....	18
Figura 3 – Distribuição vertical de uma variável radicular hipotética, para diferentes $\beta$ 's segundo a equação $Y = 1 - \beta^p$ , descrevendo a fração radicular cumulativa (Y) pela profundidade (p). Adaptado de Gale e Grigal (1987).....	22
Figura 4 – Densidade de comprimento radicular da soja após as culturas de inverno, girassol (A) ou triticales (B).....	24
Figura 5 – Densidade de comprimento radicular da soja, após os manejos de primavera, milho (A), sorgo forrageiro (B), crotalária júncea (C) ou escarificação (D).....	25
Figura 6 – Atividade radicular da soja após as culturas de inverno, girassol (A) ou triticales (B).....	27
Figura 7 – Atividade radicular da soja, após os manejos de primavera, milho (A), sorgo forrageiro (B), crotalária júncea (C) ou escarificação (D).....	27

**LISTA DE TABELAS**

	<b>Página</b>
Tabela 1 – Análise química da área experimental antes do manejo de primavera, na camada de 0,0 – 0,2 m (Agosto/2009).....	17
Tabela 2 – Massa de matéria seca ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) das plantas de cobertura de primavera, cultivadas em sucessão ao girassol ou triticales (Outubro/2009).....	17
Tabela 3 – Nível de significância ( <i>P</i> ) para densidade de comprimento radicular da soja, em diferentes camadas e distâncias da planta de referência.....	24
Tabela 4 – Valores do coeficiente $\beta$ obtido a partir do modelo $Y = 1 - \beta^p$ , proposto por Gale e Grigal (1987), e profundidade correspondente ao acúmulo de 80% (P80), para densidade de comprimento e atividade radicular da soja, em três distâncias da planta de referência.....	29
Tabela 5 – Coeficientes de correlação de Pearson ( <i>r</i> ) entre as variáveis radiculares da soja, a partir de duas origens de dados: proporção de cada camada em relação ao total (valores percentuais) e valores absolutos. ....	30
Tabela 6 – Produtividade da soja após culturas de inverno e manejos de primavera.....	33

## 1. RESUMO

A avaliação do sistema radicular de uma cultura é fundamental para o desenvolvimento de práticas agrícolas que visam a otimização da produtividade. Além disso, a distribuição das raízes no perfil do solo não necessariamente condiz com a atividade radicular, que é mais importante no tocante a absorção de água e nutrientes. O objetivo do experimento foi avaliar o efeito de sistemas de manejo sobre o sistema radicular e a produtividade da soja e comparar as metodologias do trado e do elemento não marcado (rubídio), na análise radicular. As avaliações foram realizadas na safra agrícola 2009/2010, em um experimento instalado desde 2003. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, em esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas foram constituídas pelas culturas de inverno triticales (*X Triticosecale* Wittmack) e girassol (*Helianthus annuus* L.), e as subparcelas pelos manejos de primavera envolvendo milheto (*Pennisetum glaucum* L.), sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e crotalária júncea (*Crotalaria juncea* L.), além da escarificação, realizada em 2003 e 2009. Na safra de verão foi cultivada a soja, em todas as subparcelas. As avaliações realizadas foram: densidade de comprimento, área superficial, massa de matéria seca (trado) e atividade radicular (rubídio) da soja, nas distâncias 0,00; 0,11 e 0,22 m da planta de referência, no estágio R4 da cultura, além da produtividade de grãos. Pelo método do trado foram amostradas as camadas 0,00-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. O marcador para a atividade radicular, nitrato de rubídio ( $RbNO_3$ ), foi aplicado nas profundidades 0,05, 0,10, 0,20, 0,40 e 0,60 m. A produtividade da soja não foi influenciada pelas culturas de inverno ou manejos de primavera. As culturas de inverno não se

diferenciaram em nenhuma das variáveis. Entre os manejos de primavera, a escarificação e a crotalária promoveram menor crescimento radicular da soja. A escarificação proporcionou maior atividade radicular da soja na profundidade 0,10 m, entretanto, nas demais posições a atividade foi menor. A medida direta do sistema radicular da soja, pelo método do trado, apresentou baixa correlação com a atividade radicular.

EVALUATION OF SOYBEAN ROOT SYSTEM AS AFFECTED BY SOIL MANAGERMENTS. Botucatu, 2011, p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: Laércio Augusto Pivetta

Adviser: Ciro Antonio Rosolem

## 2. SUMMARY

The knowledge of root distribution as affected by cropping systems and its role in nutrient acquisition by plants is important in planning crop rotations and soil management that optimize crops yield. Furthermore, root distribution in the soil profile does not necessarily matches root activity, which is more important in water and nutrient acquisition. The objective of this research was to assess the effects of managements systems on soybean root distribution and yields, and compare a direct method (soil core sampling) with an indirect method (with rubidium) in evaluating the root system. Evaluations were carried out in season 2010, in an experiment that has been running since 2003. The experimental design is a complete randomized block with a split-plot arrangement of treatments with four replicates. Plots consist in fall-winter crops triticale (*X Triticosecale* Wittmack) and sunflower (*Helianthus annuus* L.), and the subplots in spring crops pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.), forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) and sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.), besides chisel tillage in 2003 and 2009. In summer, soybean (*Glycine max* L. (Merril) is sowed in all subplots. The evaluations carried out were: soybean root length, surface, dry matter (soil core sampling), activity (rubidium), at 0.0, 0.11 and 0.22 m from the reference plant, at R4, besides soybean yield. The samples by soil core sampling method were taken at layers 0.00-0.05, 0.05-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.40 and 0.40-0.60m. The rubidium nitrate was applied at depths 0.05, 0.10, 0.20, 0.40 and 0.60m. Soybean yield was not affected by winter crops or spring managements. Winter crops did not differ in any variable. Among spring managements, the chisel tillage and sunn hemp resulted less soybean root length. The chisel tillage resulted

highest soybean root activity at depth 0.10 m, however, in positions remaining the activity was lowest. Direct measurements of soybean root system, by soil core sampling, showed low correlation with root activity.

### 3. INTRODUÇÃO

As principais funções da raiz na planta são a sustentação e a absorção de água e nutrientes (RAVEN, 1996). Grande parte das regiões agricultáveis apresenta problemas edafoclimáticos, como períodos de seca, deficiências de nutrientes, desequilíbrio químico, compactação, acidez e salinidade. Dessa forma, o sistema radicular das plantas deve apresentar bom desenvolvimento em volume e boa arquitetura, para otimizar a utilização dos recursos que estão disponíveis (TAIZ; ZEIGER, 2004; LYNCH, 1995).

Os sistemas conservacionistas de preparo do solo, como a semeadura direta, imprimem características químicas, físicas e biológicas distintas ao solo, de maneira a modificar a distribuição e a morfologia das raízes, com reflexos no crescimento da parte aérea (KLEPKER; ANGHINONI, 1995). Porém, estudos indicam maior compactação em sistemas sob semeadura direta, na camada superficial do solo, prejudicando o crescimento do sistema radicular das culturas (DE MARIA et al., 1999). Esse problema pode ser superado no curto prazo pela escarificação, contudo, pode também ser solucionado ou prevenido no longo prazo por meio da rotação de culturas com plantas de cobertura, que possuam características de rusticidade e sistema radicular vigoroso e agressivo (MUZILLI, 2006).

Como o sistema radicular é profundamente influenciado pelo manejo do solo, a avaliação do sistema radicular de uma cultura é fundamental para o desenvolvimento de práticas agrícolas que visam a otimização da produtividade (FANTE JÚNIOR et al., 1994). Os métodos de análise de raiz podem ser divididos em diretos e indiretos. Os métodos diretos são mais comumente usados, contudo são mais trabalhosos e



causam maior mobilização de solo. Os métodos indiretos são baseados na determinação de taxas de mudança de água ou elementos no perfil do solo, inferindo-se a distribuição e a atividade radicular (BÖHM, 1979). Enquanto os métodos diretos determinam a distribuição física das raízes no solo, a maior parte dos métodos indiretos determina a atividade radicular. Os métodos diretos normalmente não distinguem raízes mortas e vivas, inativas e ativas. Dessa forma, em determinadas circunstâncias seria mais interessante a determinação da atividade radicular do que a simples distribuição das raízes no solo.

Um dos elementos químicos que apresenta boas características para a análise indireta de raízes é o rubídio, um elemento análogo ao potássio, disponível nas formas de cloreto, fosfato, sulfato e nitrato, possibilitando doses mais exatas, uma vez que não faz parte de fertilizantes e corretivos e não é essencial às plantas, além de ser não radioativo, reduzindo os riscos de uso.

O objetivo do experimento foi avaliar o efeito de sistemas de manejo sobre o sistema radicular e a produtividade da soja e comparar as metodologias do trado e do elemento não marcado (rubídio), na análise radicular.

## **4. REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1. Sistema radicular das plantas**

As funções primárias que as raízes desempenham na planta são a fixação e absorção de água e nutrientes, contudo, podem apresentar outras funções, como armazenamento de substâncias de reserva, propagação e dispersão, nicho para simbioses e organismos livres associados, produção de metabólitos secundários e síntese de reguladores vegetais (RAVEN et al., 1996). As raízes ocupam um volume pequeno de solo, normalmente menos que 1% da camada arável. A densidade de raízes no solo varia com as espécies, situando-se na faixa de 1 a 5 cm cm<sup>-3</sup>, na camada de 0-15 cm do solo, para culturas anuais (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Existem vários mecanismos e processos na planta que contribuem para o uso eficiente de nutrientes. Esses mecanismos e processos estão relacionados com características morfológicas e fisiológicas da planta, além dos fatores genéticos (FAGERIA; BALIGAR, 1993). As características fisiológicas são: habilidade do sistema radicular em modificar a rizosfera para superar baixa disponibilidade de nutrientes; capacidade de manter o metabolismo normal com baixo teor de nutrientes nos tecidos e; alta taxa fotossintética. As características morfológicas são: alta relação entre raízes e parte aérea; sistema radicular extensivo, explorando maior volume de solo e; colonização do sistema radicular por micorrizas e bactérias que fixam o N<sub>2</sub> atmosférico (FAGERIA; BALIGAR, 1993).

A arquitetura radicular é muito relacionada com a produtividade das culturas, devido ao fato de muitos recursos do solo se encontrarem irregularmente distribuídos e um bom posicionamento do sistema radicular pode aumentar a capacidade da planta em explorar estes recursos (LYNCH, 1995). Segundo Taiz e Zeiger (2004), 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. Dessa forma, o manejo do solo deve proporcionar às plantas condições adequadas para um bom desenvolvimento do sistema radicular, a fim de permitir a exploração de maior volume de solo.

#### **4.2. Compactação do solo**

A intensa mobilização dos solos traz como consequência sua desagregação superficial, sujeita à formação de uma fina crosta resultante da dispersão das partículas do solo, e ainda outra camada subsuperficial compactada, resultante da pressão exercida pelo peso dos implementos agrícolas e pela ação direta dos pneus (CASTRO et al., 1986).

A redução da movimentação do solo e a manutenção de resíduos culturais na superfície do terreno são práticas necessárias para o controle da erosão e para a redução da degradação do solo e do meio ambiente (LAL, 2000).

Os sistemas conservacionistas de manejo do solo, quando comparados ao sistema de preparo convencional, imprimem características químicas, físicas e biológicas distintas ao solo, de maneira a modificar a distribuição e morfologia das raízes, com reflexos no crescimento da parte aérea e na produtividade (KLEPKER; ANGHINONI, 1995). Dentre os sistemas conservacionistas, está o sistema de semeadura direta, caracterizado pelo revolvimento do solo somente na linha de semeadura, mantendo os restos culturais na superfície do terreno (LEAL et al., 2008).

O sistema de semeadura direta é uma técnica eficiente no controle da erosão do solo, quando comparado com o sistema convencional (BERTOL et al., 1997), porém alguns estudos indicam uma maior compactação na camada superficial pelo primeiro

(DE MARIA et al., 1999), provocada pelo efeito cumulativo do tráfego de máquinas e acomodação natural das partículas sólidas (KLEIN; BOLLER, 1995).

As modificações de importância agronômica que ocorrem em solos compactados dizem respeito aos seguintes fatores: aumento da resistência à penetração radicular, redução da aeração, alteração do fluxo de água e calor e da disponibilidade de água e nutrientes (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Num determinado tempo e local, um desses fatores pode tornar restrito o desenvolvimento das plantas, a depender do tipo de solo, da condição climática, da espécie e do estágio de desenvolvimento da cultura.

Em solo compactado o número de macroporos é reduzido e a densidade é maior, o que em solo seco, resulta em maior resistência física ao crescimento das raízes e decréscimo no potencial água. Em condições de solo úmido ocorre falta de oxigênio e elevadas concentrações de etileno na zona radicular, derivadas de menor aeração (MARSCHNER, 1995). Sob estresse edáfico, há forte demanda metabólica para manter o crescimento e a atividade do sistema radicular, podendo consumir mais da metade dos fotoassimilados disponíveis, reduzindo assim a produtividade da cultura (LYNCH, 1995).

O efeito de uma camada compactada sobre o sistema radicular depende do local e das dimensões dessa camada, além do nível de compactação (GLINSKI; LIPIEC, 1990) e da susceptibilidade da planta (CLARK et al., 2003; CLARK; BARRACLOUGH, 1999). Resguardando as devidas particularidades, o crescimento radicular sob compactação foi comprovadamente reduzido em várias culturas, como feijão, soja, sorgo, cevada, aveia, arroz, trigo, ervilha, canola, amendoim e milho (GLINSKI; LIPIEC, 1990).

#### **4.3. Manejo da compactação do solo**

A descompactação do solo em sistema de semeadura direta pode ser realizada mecânica ou biologicamente. Dentre os processos mecânicos, os implementos com hastes são mais adequados que os de discos, pois produzem superfícies mais rugosas (KOCHHANN; DENARDIN, 2000; CARVALHO FILHO et al., 2007), possuem menor superfície de contato e apresentam menor poder desagregador do solo, além de manter maior quantidade de restos culturais em superfície (VERNETTI JÚNIOR; GOMES, 1999).

A escarificação realizada em área sob semeadura direta a 6 anos reduziu a densidade e aumentou a rugosidade superficial, a condutividade hidráulica e a taxa de infiltração de água e seis meses após o manejo mecânico, os níveis de restos culturais foram semelhantes aos do solo sem revolvimento (CÂMARA; KLEIN, 2005a). Contudo, dependendo do manejo realizado após a escarificação, como a escolha das culturas no esquema de rotação e o tráfego, seus efeitos sobre as propriedades físicas do solo podem ter duração de 6 meses a 3 anos (FRANCHINI; DEBIASI, 2009).

Além de ser usada como medida preventiva, a rotação de culturas pode ser utilizada no controle da compactação, desde que sejam escolhidas plantas com sistema radicular vigoroso, capacidade de crescer em solos com alta resistência à penetração, criando poros por onde as raízes da cultura subsequente possam crescer (SILVA; ROSOLEM, 2002; MUZILLI, 2006).

Abreu et al. (2004) avaliaram o efeito da escarificação mecânica e biológica (*Crotalaria spectabilis*) na redução da compactação e encontraram resultados contrastantes, dependendo da propriedade física. Considerando a condutividade hidráulica do solo, há maior eficácia da escarificação biológica na ruptura da camada compactada e estabelecimento de poros condutores de água. Se o indicador utilizado for a resistência à penetração, a escarificação mecânica é mais eficiente.

Calonego e Rosolem (2010) avaliaram a resistência do solo à penetração em função da escarificação e das plantas de cobertura milheto, sorgo forrageiro e crotalária júncea. Após dois meses, a resistência à penetração do solo na camada de 0,07-0,12 m foi menor na escarificação. Entretanto, no terceiro ano após a escarificação não houve diferença entre os manejos.

O uso de plantas de cobertura no manejo da compactação é baseado nas diferenças que as espécies apresentam na susceptibilidade à impedância mecânica do solo. Em estudo com camadas compactadas, a crotalária júncea e a crotalária *spectabilis* apresentaram pouca ou nenhuma redução no crescimento radicular com a compactação, ao contrário do sorgo forrageiro e do milheto. Entretanto, mesmo mais afetados, o sorgo e o milheto apresentaram os maiores valores de densidade de comprimento radicular na camada compactada, formando maior quantidade de bioporos (ROSOLEM et al., 2002). Clark e Barraclough (1999) avaliaram a máxima pressão de crescimento radicular ( $\sigma_{max}$ ) de algumas

culturas, que é um indicativo da capacidade das raízes em penetrar em solos compactados, e os valores oscilaram entre 0,58 MPa para a ervilha e 0,24 MPa para o girassol.

#### **4.4. Avaliação do sistema radicular**

Atualmente existe consenso acerca da importância de estudos com observações de raízes a campo, para o manejo das lavouras; quando associados aos fatores edafoclimáticos, eles são fundamentais para a otimização das práticas da adubação, irrigação, entre outros (ZONTA et al., 2006). Os mesmos autores salientam que os estudos das raízes são ainda fundamentais para o entendimento das relações de absorção de água e nutrientes, necessários aos avanços das pesquisas básicas que norteiam estudos aplicados.

O estudo do sistema radicular pode ser realizado por várias técnicas, desde aquelas mais simples até as de recursos avançados, variando em função do objetivo do trabalho a ser realizado, das características avaliadas e principalmente dos recursos disponíveis. As técnicas comumente empregadas avaliam diretamente o sistema radicular da planta com grande mobilização de solo e significativa amostragem de material vegetal, caracterizando métodos trabalhosos e que requerem muito tempo (ENCIDE-OLIBONE et al., 2008).

Existem muitos desafios para a quantificação de sistemas radiculares, entre eles: a complexa arquitetura dos sistemas radiculares; a ampla faixa de variação no tamanho e no diâmetro; o rápido crescimento e decomposição de raízes finas; as diferenças na atividade fisiológica entre raízes de diferentes idades; os complexos processos microbiológicos que ocorrem na interface raiz-solo; as relações simbióticas na rizosfera e; as variações químicas, físicas e biológicas que ocorrem no solo (DOURADO-NETO et al., 1998).

As técnicas de análise radicular podem ser divididas em métodos diretos e indiretos (BÖHM, 1979). Entre os métodos diretos, podem ser citados: trincheira, monólito, placa com pregos, trado, sacos telados, rhizotron e minirhizotron (POLOMSKI; KUHN, 2002). Além dos métodos acima citados, existem métodos diretos que são realizados em laboratórios, sob condições controladas, entre eles: hidroponia (POLOMSKI; KUHN, 2002), cultura de tecidos (DE KLERK, 2002) e aeroponia (WAISEL, 2002), sendo este último

um dos métodos mais modernos, apresentando mínimas restrições ao desenvolvimento radicular.

Os métodos diretos que necessitam de escavação, como placa com pregos, monólito e trincheira, são mais comumente usados. Nesses métodos, as raízes são expostas e depois contadas e registradas, diferindo-se cada método em algumas particularidades de amostragem e avaliação. No entanto, nessas técnicas ocorrem grande perdas de parcela do experimento por causa do volume de solo mobilizado (ENCIDE-OLIBONE et al., 2008). O método do trado também é muito utilizado, contudo dispensa a remoção de grande volume de solo, uma vez que são retiradas apenas pequenas amostras de solo, sem destruição da área amostrada (BÖHM, 1979; FUJIWARA et al., 1994).

Os métodos de estudo radicular indiretos são baseados na determinação de taxas de mudança de água ou elementos no perfil do solo, inferindo-se a distribuição e a atividade radicular (BÖHM, 1979). Este tipo de técnica pode complementar ou substituir as técnicas diretas de avaliação de raízes (POLOMSKI; KUHN, 2002). Os mesmos autores citam alguns métodos indiretos, entre eles: elemento marcado ou radioativo ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{32}\text{P}$ , etc.), isótopos estáveis ( $^{15}\text{N}$ ,  $^{41}\text{K}$ ,  $^{42}\text{Ca}$ , etc.), e corantes (TTC, iodo, corante fluorescente).

Além dos métodos citados acima, existe a técnica do elemento não marcado, que diferentemente do elemento marcado, apresenta simplicidade e baixo nível tecnológico, entretanto, possui alguns problemas como fitotoxicidade e distribuição irregular na planta, dependendo do elemento usado (ENCIDE-OLIBONE et al., 2008).

Para um elemento não marcado ser adequado para estimar a atividade radicular, as plantas devem absorvê-lo similarmente a um nutriente essencial, não pode ser tóxico na concentração em que é determinado, não ser facilmente lixiviável e apresentar baixa concentração natural no solo (PINKERTON; SIMPSON, 1979). Os elementos que cumprem estes requerimentos em muitos solos são o estrôncio e o rubídio, análogos ao cálcio e ao potássio, respectivamente. Estrôncio e rubídio foram usados com sucesso para determinar a distribuição da atividade radicular no solo, por O'Sullivan (2008) e Encide-Olibone et al. (2008), respectivamente. Para os últimos autores, o uso do rubídio nos estudos de raízes é muito viável, por ser disponível nas formas de cloreto, fosfato, sulfato e nitrato, tornando as doses mais exatas, uma vez que o elemento não faz parte dos fertilizantes e corretivos e não é essencial às plantas, além de ser não radioativo, reduzindo os riscos ecológicos.

Em uma revisão sobre a atividade radicular de espécies arbóreas, Lehmann (2003) salienta que a distribuição vertical da absorção de água e nutrientes pelas plantas é um importante tópico de estudo, pois os recursos são mal distribuídos no perfil do solo. Alguns trabalhos relacionaram a atividade radicular com parâmetros morfológicos, como massa e comprimento radicular, contudo, encontraram-se variações nas relações encontradas, dependendo das condições experimentais. O autor salienta que a atividade radicular é o parâmetro mais adequado para avaliar sistemas radiculares, pois quanto mais profunda a atividade radicular das plantas utilizadas, menores são as perdas de nutrientes por lixiviação, representando maior reciclagem de nutrientes e sustentabilidade do sistema.



## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1. Caracterização da área experimental**

As avaliações foram realizadas em experimento instalado na Fazenda Experimental Lageado, Faculdade de Ciências Agronômicas/UNESP, em Botucatu-SP, no período de março de 2009 a abril de 2010. O experimento está sendo conduzido desde 2003.

A localização da área experimental está definida pelas coordenadas geográficas: 22°49' Sul e 48°25' Oeste, com altitude média de 770 metros e declividade variável de 0 a 3%. O clima de acordo com a classificação de Köppen é do tipo Cwa, caracterizado como mesotérmico úmido, com precipitação média anual em torno de 1400 mm e temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e a do mês mais frio entre 3 a 18 °C. O solo da área experimental é classificado como Nitossolo Vermelho distroférico, estruturado, de textura argilosa (EMBRAPA, 1999), com relevo suave ondulado.

### **5.2. Delineamento experimental e tratamentos**

O experimento foi delineado em blocos ao acaso com parcelas subdivididas, com quatro repetições. As parcelas foram constituídas pelas culturas de inverno triticale (*X Triticosecale* Wittmack) e girassol (*Helianthus annuus* L.), e as subparcelas pelo manejo de primavera, com a semeadura do milheto (*Pennisetum glaucum* L.), sorgo forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e crotalária júncea (*Crotalaria juncea* L.), além da

escarificação, realizada em 2003 e repetida neste experimento, em 2009. Na safra de verão foi cultivada a soja (*Glycine max* L. (Merril), em todas as 32 subparcelas.

As dimensões da área útil das subparcelas foram de 8 x 5 m (40 m<sup>2</sup>). Carreadores de 4 m foram locados entre os blocos, parcelas e subparcelas, totalizando a área experimental em 2944 m<sup>2</sup>. Os carreadores foram semeados e considerados como bordaduras.

### **5.3. Instalação e condução do experimento**

#### **5.3.1. Culturas de inverno**

No dia 01/04/09 realizou-se a semeadura do triticale, cultivar IAC 5 Canindé, e do girassol, cultivar Catissol, com aplicação prévia (26/03/2009) do herbicida Glyphosate. O triticale foi semeado com espaçamento entre linhas de 0,17 m e densidade de semeadura de 250 sementes m<sup>-2</sup>. Para o girassol, o espaçamento entre linhas foi de 0,51 m, com densidade de semeadura de 14 sementes m<sup>-2</sup>. Ambas as culturas foram implantadas sem adubação, com uma semeadora de fluxo contínuo, marca Semeato, modelo Personale-DRILL-13, equipada com discos de corte de palha e discos sulcadores defasados para a deposição das sementes. As sementes foram tratadas com os fungicidas Carboxin e Thiram.

Devido à falhas no estande do girassol, este foi semeado novamente de forma manual, apenas onde ocorreram as maiores falhas, com o intuito de aumentar o aporte de matéria seca pela cultura. Como houve desuniformidade no estande e estágio do girassol, não foi realizada a colheita de grãos em ambas as culturas, apenas a determinação da massa de matéria seca. Esta avaliação foi realizada coletando-se 4 linhas de 2 m de comprimento em cada subparcela, aproximadamente aos 90 DAE. O material foi seco em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C, até massa constante. Posteriormente a área foi dessecada com o herbicida Glyphosate e roçada mecanicamente.

A produção de massa de matéria seca foi de 1858 e 6661 kg ha<sup>-1</sup>, para o girassol e o triticale, respectivamente.

### 5.3.2. Manejo de primavera

Na primavera foi realizada a semeadura das plantas de cobertura milheto, sorgo forrageiro e crotalária, além da escarificação. Todos os manejos foram realizados em sentido transversal à semeadura das culturas de inverno. Para determinar a profundidade da escarificação, foi avaliada a resistência do solo a penetração com um penetrômetro de impacto (STOLF, 1991), até a profundidade de 0,40 m, em 16 camadas de 0,025 m (Figura 1a), com duas repetições por subparcela. A operação foi realizada com um escarificador da marca Jan, modelo Jumbo Matic, equipado com sete hastes e conjugado com discos de corte inseridos à frente de cada haste e cilindro destorroador na parte posterior. A profundidade de trabalho foi de 0,30 m, com espaçamento entre hastes de 0,35 m. No momento da operação o solo apresentava consistência friável. Três dias depois da primeira chuva após a escarificação, avaliou-se novamente a resistência do solo a penetração (Figura 1b).

Após a escarificação e antes da semeadura das plantas de cobertura, realizou-se uma amostragem de solo para análise química em toda a área experimental na camada de 0,0 – 0,2 m (Tabela 1).

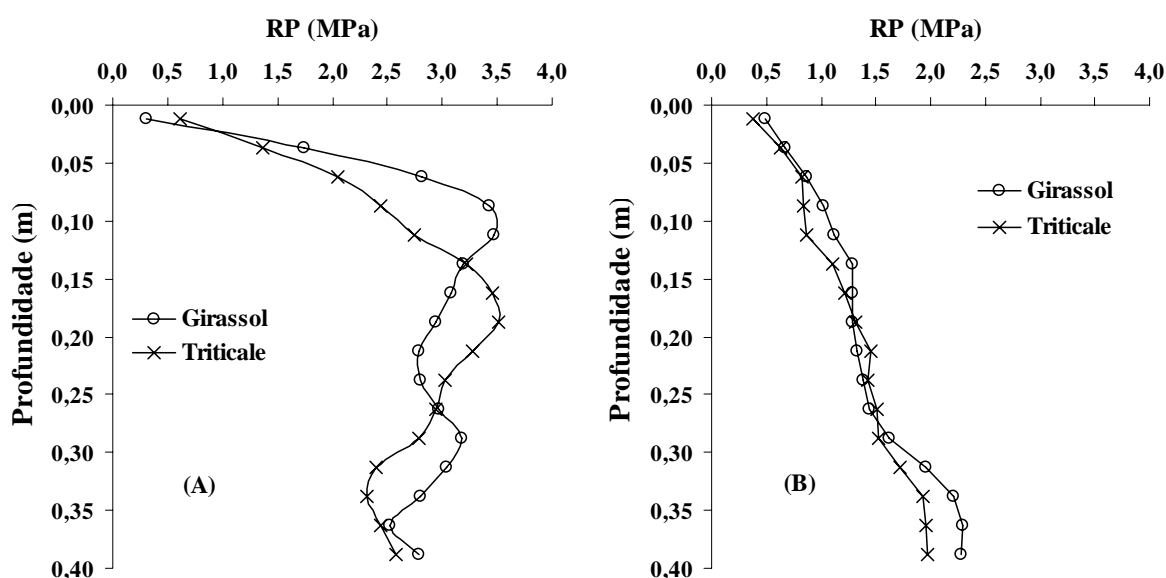


Figura 1 – Resistência do solo a penetração sob cultivo de girassol e triticale, antes (a) e após (b) a escarificação (Setembro/2009).

Tabela 1 – Análise química da área experimental antes do manejo de primavera, na camada de 0,0 – 0,2 m (Agosto/2009).

pH	M.O. (CaCl <sub>2</sub> ) (g dm <sup>-3</sup> )	P <sub>resina</sub> (mg dm <sup>-3</sup> )	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V
			----- (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )						(%)
4,2	28,0	25,0	74,4	3,4	21,0	16,0	40,5	114,9	35,2

Para elevar a saturação por bases a 60%, visando a cultura da soja, seriam necessários 2967 kg ha<sup>-1</sup> de calcário (96% PRNT). Com o intuito de evitar excesso de calagem nas camadas superficiais do solo, a foram aplicados apenas 1800 kg ha<sup>-1</sup> de calcário dolomítico (96% PRNT), no dia 25/09/2009. A aplicação foi realizada em superfície e sem incorporação, com distribuidor de calcário de área total em faixa com fundo móvel, marca Nevoeiro, modelo 5002 S.

A semeadura do milheto, sorgo e crotalária foi realizada no dia 28/09/2009, com espaçamento entre linhas de 0,17 m e densidade de semeadura a fim de atingir uma população de 200 plantas m<sup>-2</sup>, para todas as culturas. A operação foi realizada com uma semeadora de fluxo contínuo, marca Semeato, modelo Personale-DRILL-13, equipada com discos de corte de palha e discos sulcadores defasados para a deposição das sementes. Assim como para as culturas de inverno, não foi realizada adubação.

As parcelas escarificadas foram mantidas sem a presença de plantas daninhas durante o período de desenvolvimento das plantas de cobertura. No dia 21/11/2009 foram coletadas amostras para a determinação da massa de matéria seca (Tabela 2) e posteriormente as mesmas foram dessecadas com o herbicida Glyphosate.

Tabela 2 – Massa de matéria seca (kg ha<sup>-1</sup>) das plantas de cobertura de primavera, cultivadas em sucessão ao girassol ou triticale (Outubro/2009).

Plantas de cobertura	Cultura de inverno	
	Girassol	Triticale
Milheto	3528	3030
Sorgo forrageiro	2621	2838
Crotalária júncea	1587	1310

### 5.3.2. Cultura da soja

No dia 30/11/2009 foi semeada a cultura da soja, cultivar superprecoce CD 216 (Coodetec 216) de ciclo indeterminado, com uma semeadora de precisão, marca Semeato, modelo Personale-DRILL-13, equipada com discos de corte de palha, facão para a deposição de fertilizante e discos sulcadores defasados para a deposição das sementes. O espaçamento entre linhas foi de 0,45 m. As sementes foram depositadas a 0,05 m de profundidade, com densidade de semeadura de 18,5 sementes  $m^{-1}$  (germinação 90%). As sementes foram tratadas com fungicida Carboxin+Thiran, inseticida Thiamethoxam, inoculante *Bradyrhizobium* sp. e micronutrientes cobalto e molibdênio. A adubação de semeadura foi de 300 kg  $ha^{-1}$  da formulação 2-20-20.

No dia 23/12/2009 foi realizada uma aplicação de Fluazifop+Fomesafen para o controle de plantas daninhas. Nos dias 20/01/2010 e 10/02/2010 foram aplicados o inseticida Metamidofós e o fungicida Piraclostrobina+Epoxiconazol. No dia 24/02/2010 foi realizada uma aplicação do inseticida Metamidofós e do fungicida Tebuconazole. No dia 31/03/2010 foi realizada a colheita manual da soja. As condições climáticas durante a condução da cultura da soja estão apresentadas na Figura 2.

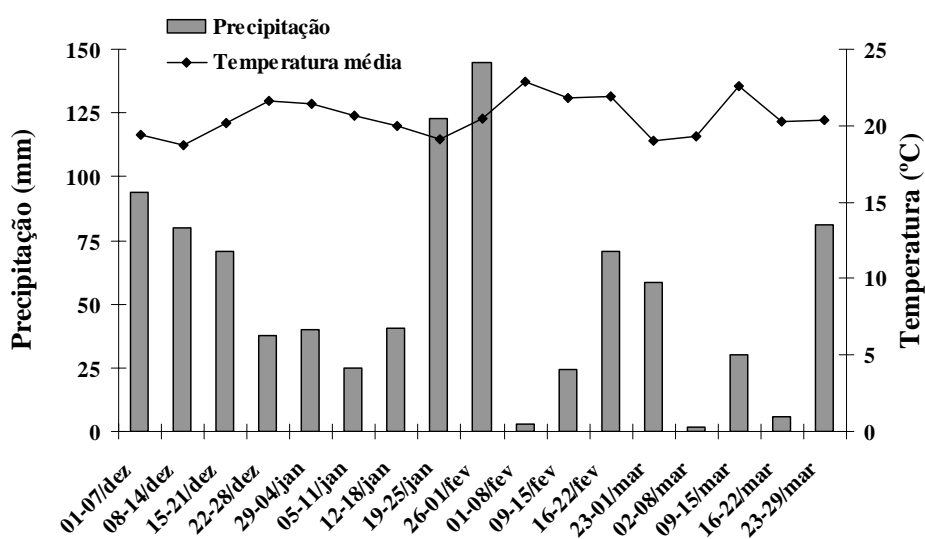


Figura 2 – Temperatura média e precipitação acumulada semanal durante o ciclo da cultura da soja, safra 2009/2010.

## 5.4. Avaliações

### 5.4.1. Atividade radicular da soja

A atividade radicular da soja foi realizada conforme metodologia descrita por Encide-Olibone et al., (2008). Nos dias 01 e 02/02/2010, quando a soja encontrava-se no estágio R4, foi realizada a aplicação de 3 mL de nitrato de rubídio ( $\text{RbNO}_3$ ) na concentração de  $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  de Rb, com auxílio de um cateter e uma seringa graduada, às distâncias 0,0; 0,11 e 0,22 m da planta de referência e nas profundidades 0,05; 0,10; 0,20; 0,40 e 0,60 m. Para cada ponto de aplicação, foram realizadas duas repetições. A aplicação foi realizada em condição de alta umidade no solo, um dia após a ocorrência de uma precipitação.

Para a aplicação da solução de  $\text{RbNO}_3$ , foram confeccionadas cinco hastes cilíndricas (10 mm de diâmetro), uma para cada profundidade de amostragem, as quais continham uma ponta cônica (12 mm de diâmetro), uma base reforçada para receber impactos no momento da penetração no solo e um limitador de profundidade.

Para a aplicação do  $\text{RbNO}_3$ , não foram utilizadas plantas que se encontravam próximas a falhas de estande, tanto na linha, como nas linhas adjacentes, tampouco plantas muito próximas ou com problemas fitossanitários. Um ponto de aplicação não distanciou-se a menos de 0,75 m de outro ponto, tanto na linha, como na linha adjacente. As plantas avaliadas foram identificadas com antecedência, primeiramente com a colocação de um palito de madeira posicionado na distância correspondente (0,0; 0,11 ou 0,22 m) e identificado com a profundidade correspondente. Posteriormente, as plantas escolhidas foram identificadas com dois barbantes de cores diferentes, um para a distância e outro para a profundidade.

Após quatro dias da aplicação do  $\text{RbNO}_3$ , a parte aérea das plantas foi coletada, seca em estufa com circulação forçada de ar a  $60^\circ \text{ C}$  por 72 horas. Posteriormente as amostras foram moídas e submetidas a digestão nitroperclórica e determinação do teor de Rb através da absorção atômica (MALAVOLTA et al., 1997).

#### 5.4.2. Avaliações diretas do sistema radicular da soja

Após a coleta das plantas para a análise da atividade radicular, entre 08 e 13/02/2010, foram coletadas amostras de raízes da soja pelo método do trado (FUJIWARA et al., 1994), às distâncias 0,0; 0,11 e 0,22 m da planta de referência e nas camadas de 0,00-0,05; 0,05-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, em três pontos por subparcela.

Para amostragem de raízes até 0,10 m de profundidade, utilizou-se um trado coletor composto por um cilindro de aço com 100 mm altura, com diâmetro interno de 69 mm. Esse cilindro era fixado a uma haste de aço maciça com 30 mm de diâmetro. Para a amostragem das camadas de 0,10-0,20; 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m foi utilizado um tubo de aço com 49 mm de diâmetro.

Após a coleta, o solo contendo as raízes foi acondicionado em sacos plásticos identificados e congelado a  $-4^{\circ}\text{C}$ . Para a lavagem das raízes, as amostras foram colocadas em bacias contendo água para acelerar o descongelamento. Após o descongelamento e o destorroamento manual, a água sobrenadante, contendo a maior parte das raízes, foi despejada em peneira com malha de 1 mm. Esse processo foi repetido até a separação de todas as raízes. Utilizou-se pinça para separar as raízes de impurezas mais grosseiras, como pedras, caules e folhas. Em seguida, as raízes, ainda contendo impurezas, foram colocadas em bandejas com água, para a retirada de impurezas mais finas, como raízes de culturas antecessoras e material orgânico não decomposto. Após a limpeza, as amostras foram acondicionadas em recipientes plásticos contendo solução aquosa contendo 30% de álcool etílico para aumentar o tempo de conservação, e armazenadas sob refrigeração a  $2^{\circ}\text{C}$ .

As amostras de raízes foram submetidas a um *scanner* de leitura ótica, na resolução de 300 dpi, e tiveram suas imagens digitalizadas e analisadas com o programa WinRhizo versão 3.8-b (Regent Instrument Inc.), para determinar a densidade de comprimento e área superficial radicular, baseados no método de Tennant (1975). Em seguida as amostras de raízes foram colocadas em sacos de papel e secas em estufa com circulação forçada de ar a  $60^{\circ}\text{C}$  por 48 h, para determinação da massa de matéria seca.

### 5.4.3. Produtividade da soja

Para a determinação da produtividade da soja foram coletadas 5 sub-amostras de 1,0 m de comprimento, perfazendo uma área total de 2,25 m<sup>2</sup>. Amostrou-se uma pequena área devido à grande movimentação dentro das parcelas no decorrer das demais avaliações e algumas falhas no estande. As amostras foram trilhadas mecanicamente, limpas e pesadas. O teor de umidade dos grãos foi ajustado para 13% a base seca e os valores convertidos em kg ha<sup>-1</sup>.

### 5.5. Análise dos resultados

Os dados de produtividade e densidade de comprimento radicular da soja (para cada distância da planta de referência e camada de solo) foram submetidos a análise de variância pelo teste F e suas médias comparadas pelo teste t (DMS) a 5% de probabilidade, utilizando o programa estatístico Sisvar, versão 5.3 (FERREIRA, 2000).

Para os dados de atividade radicular, foi convencionado que o maior teor de Rb observado dentro de cada tratamento correspondeu a 100 %. Desta forma a atividade radicular foi estimada para as demais distâncias da planta de referência e profundidades de aplicação.

Após essa análise inicial, foi realizada uma análise da distribuição vertical dos dados de densidade de comprimento e atividade radicular, através da análise de regressão. Os dados de cada unidade experimental, em cada distância da planta de referência, foram convertidos em notação decimal, e calculados suas frações cumulativas até somar o valor 1, na última camada ou profundidade amostrada. Os dados convertidos foram delineados em blocos ao acaso com parcelas subdivididas, sendo as culturas de inverno as parcelas, os manejos de primavera as subparcelas e as profundidades as subsubparcelas. Os dados foram submetidos a análise de variância pelo teste F e as profundidades comparadas pela análise de regressão, utilizando a equação assintótica não linear  $Y = 1 - \beta^p$ , proposta por Gale e Grigal (1987), que descreve a distribuição vertical de variáveis radiculares (Figura 3). Para utilizar essa equação, os dados de profundidade devem estar em centímetros. Quanto maior o valor do coeficiente  $\beta$ , mais homogênea é a distribuição do sistema radicular no perfil do solo, e quanto



menor, mais concentrado próximo da superfície. A partir do coeficiente  $\beta$ , foi utilizada a equação inversa (logaritmo) para calcular a profundidade correspondente ao acúmulo de 80% dos atributos radiculares. A análise de regressão foi realizada utilizando-se o programa Sigma-Plot, versão 10.0 (2006), através da opção “user defined equation”.

Posteriormente, foram realizadas análises de correlação de Pearson entre os dados de atividade, densidade de comprimento, área superficial e massa de matéria seca radicular, com duas origens de dados: proporção de cada camada em relação ao total (valores percentuais) e valores absolutos (atividade radicular: teor de Rb; densidade de comprimento radicular:  $\text{cm cm}^{-3}$ ; área superficial radicular:  $\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$ ; massa de matéria seca radicular:  $\text{g dm}^{-3}$ ). Os coeficientes de correlação foram submetidos ao teste t, a 5% de probabilidade. A análise de correlação foi executada no programa BioEstat, versão 5.0 (AYRES et al., 2007).

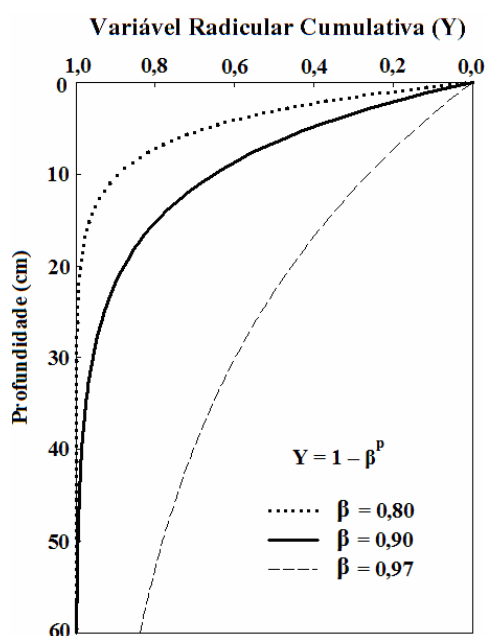


Figura 3 – Distribuição vertical de uma variável radicular hipotética, para diferentes  $\beta$ 's segundo a equação  $Y = 1 - \beta^p$ , descrevendo a fração radicular cumulativa (Y) pela profundidade (p). Adaptado de Gale e Grigal (1987).

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Os dados de área superficial e massa de matéria seca radicular foram utilizados apenas na análise de correlação, pois apresentaram comportamento muito semelhante à densidade de comprimento, que será utilizada para representar as determinações diretas do sistema radicular da soja.

### **6.1. Densidade de comprimento radicular da soja**

Não houve interação significativa entre cultura de inverno e manejo de primavera para densidade de comprimento radicular da soja, em nenhuma das camadas do solo e distâncias da planta de referência, exceto para a camada de 0,20 – 0,40 m, na distância 0,00 m (Tabela 3), dessa forma, os dados não foram desdobrados. As culturas de inverno influenciaram o crescimento radicular da soja de forma muito semelhante (Figura 4). No primeiro ano de condução do experimento (2003), a densidade de comprimento radicular da soja após o cultivo do girassol foi inferior ao triticales (CALONEGO; ROSOLEM, 2010). Esse resultado pode estar relacionado ao baixo valor de máxima pressão de crescimento radicular do girassol, que é de 0,24 MPa, comparado com o trigo e a cevada, espécies semelhantes ao triticales, que apresentam o valor de 0,49 MPa (CLARK; BARRACLOUGH, 1999). Dessa forma, o cultivo do girassol em longo prazo, dentro de sistemas de rotação de culturas, pode ser utilizado sem prejuízo ao crescimento radicular da soja.

Tabela 3 – Nível de significância (*P*) para densidade de comprimento radicular da soja, em diferentes camadas e distâncias da planta de referência.

Camada (m)	Distância (m)	Cultura de inverno (CI)	Manejo de primavera (MP)	CI x MP
<b>0,00 - 0,05</b>	<b>0,00</b>	0,067	0,000	0,404
	<b>0,11</b>	0,200	0,000	0,782
	<b>0,22</b>	0,563	0,001	0,863
<b>0,05 - 0,10</b>	<b>0,00</b>	0,766	0,028	0,681
	<b>0,11</b>	0,846	0,001	0,371
	<b>0,22</b>	0,061	0,354	0,742
<b>0,10 - 0,20</b>	<b>0,00</b>	0,197	0,106	0,473
	<b>0,11</b>	0,261	0,090	0,358
	<b>0,22</b>	0,030	0,155	0,191
<b>0,20 - 0,40</b>	<b>0,00</b>	0,130	0,000	0,004
	<b>0,11</b>	0,200	0,085	0,329
	<b>0,22</b>	0,818	0,177	0,593
<b>0,40 - 0,60</b>	<b>0,00</b>	0,012	0,198	0,441
	<b>0,11</b>	0,255	0,009	0,609
	<b>0,22</b>	0,667	0,583	0,302

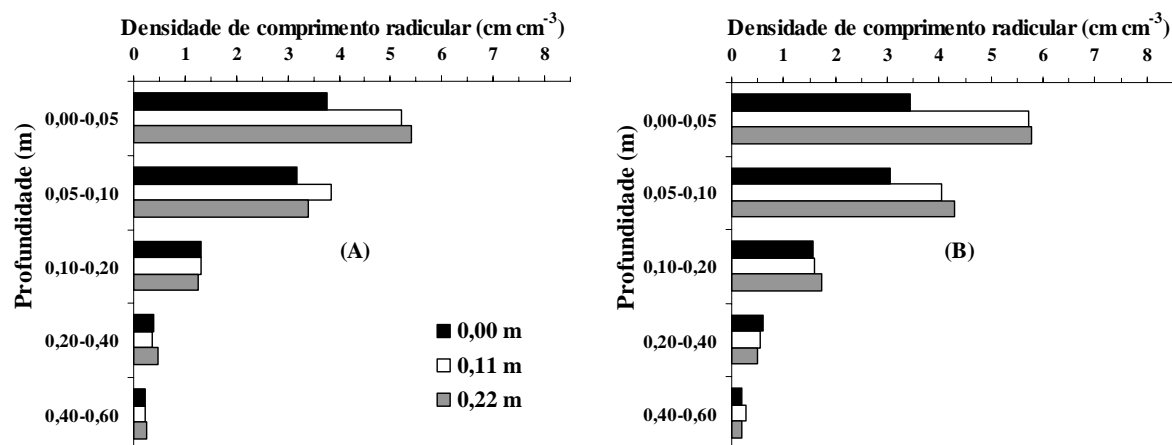


Figura 4 – Densidade de comprimento radicular da soja após as culturas de inverno, girassol (A) ou triticale (B).

Entre os manejos de primavera, puderam-se notar dois grupos distintos, com o milho e o sorgo apresentando maiores valores de densidade de comprimento radicular da soja, enquanto a crotalária e a escarificação os menores (Figura 5).

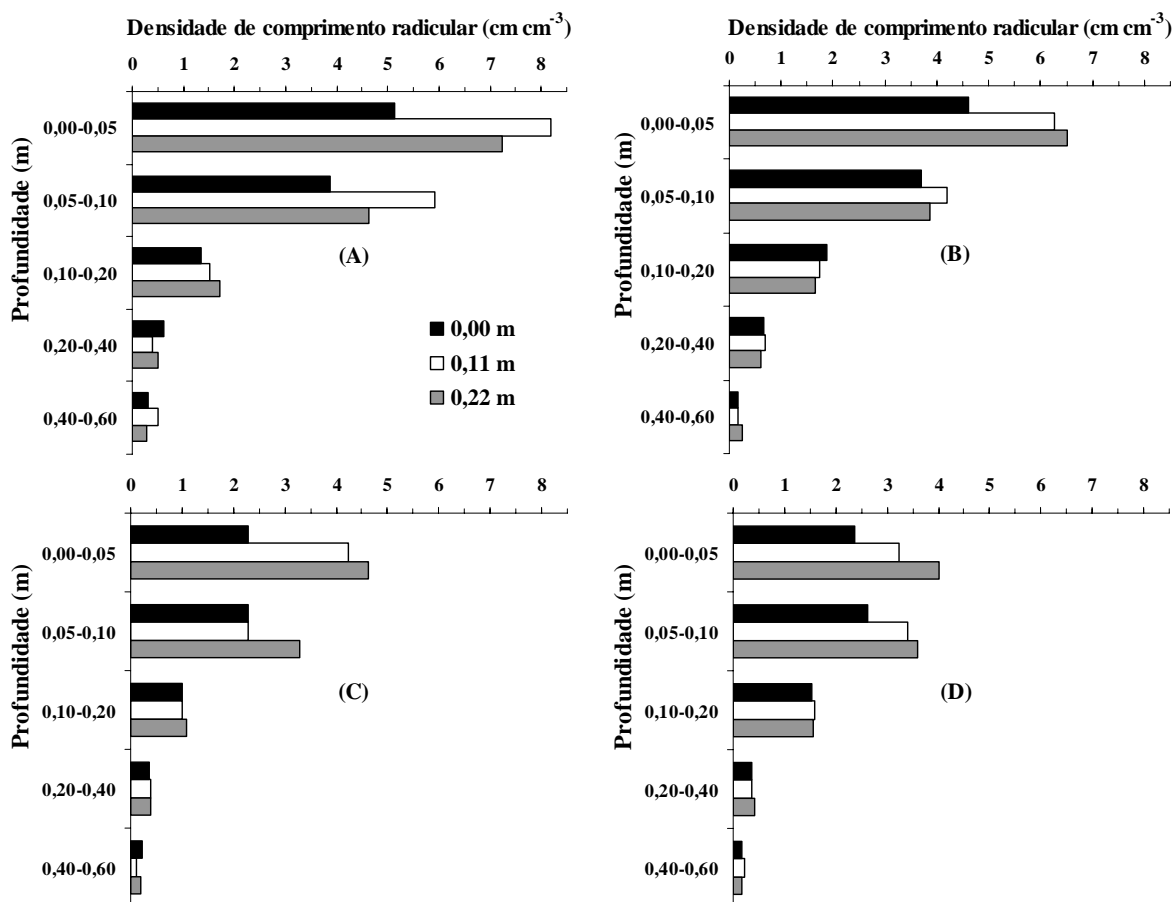


Figura 5 – Densidade de comprimento radicular da soja, após os manejos de primavera, milho (A), sorgo forrageiro (B), crotalária júncea (C) ou escarificação (D).

O maior crescimento radicular da soja em sucessão ao sorgo ou ao milho está relacionado à maior densidade de comprimento radicular apresentada por essas espécies em relação à crotalária, formando grande quantidade de bioporos (CALONEGO; ROSOLEM, 2010). O efeito do sorgo e do milho sobre as raízes da soja ocorreu inclusive nas camadas mais profundas, com superioridade significativa do sorgo na camada de 0,20 – 0,40 m e do milho na camada 0,40 – 0,60 m. O menor crescimento radicular da crotalária júncea em relação ao sorgo e ao milho também foi demonstrado em estudo com camadas compactadas, mesmo sendo as gramíneas as mais afetadas pela compactação (ROSOLEM et al., 2002).

Com o revolvimento recente do solo, poderia se esperar que a escarificação promovesse um maior crescimento radicular da soja, pelas melhorias de algumas

propriedades físicas, como redução da densidade e aumento da macroporosidade do solo, o que não ocorreu. Esse efeito pode estar relacionado com o tempo de adoção dos sistemas sem revolvimento, caracterizando um sistema de semeadura direta estabilizado, e pela redução na agregação do solo, como observado na primeira escarificação, em 2003 (CALONEGO; ROSOLEM, 2008), que também ocasionou redução do crescimento radicular da soja (CALONEGO; ROSOLEM, 2010). Collares et al. (2008) avaliou a escarificação após seis anos de semeadura direta e observou menor crescimento radicular do feijoeiro com o revolvimento do solo.

## **6.2. Atividade radicular da soja**

Independente do tratamento, o valor de 100% de atividade radicular ocorreu na posição mais próxima ao colo da planta, ou seja, na profundidade de 0,05 m e na distância 0,00 m (Figuras 6 e 7). Assim como para a densidade de comprimento, a atividade radicular da soja foi similar entre as culturas de inverno (Figura 6). Uma pequena diferença ocorreu na profundidade de 0,10 m, na linha de semeadura, onde após o girassol, a soja apresentou 78,6% de atividade, enquanto após o triticales 65,3%. No restante dos pontos aplicados, a soja manteve atividade radicular em torno de 20 a 30%.

Entre os manejos de primavera, a escarificação apresentou a maior atividade na distância 0,00 m e profundidade 0,10 m, com 91,3%, enquanto o milho resultou em 60,6%, o sorgo 59,4% e a crotalária 70,5% (Figura 7). Entretanto, considerando os pontos na distância 0,00 m abaixo de 0,10 m e para as outras distâncias, a escarificação apresentou atividades inferiores a 20%, enquanto as plantas de cobertura mantiveram atividades próximas a 30%.

A concentração da atividade radicular encontrada na linha de semeadura e mais próxima da superfície, observada em todos os tratamentos, relaciona-se às ótimas condições de pluviosidade durante todo o ciclo da cultura, associada também com o local de deposição do fertilizante pela semeadora. Em condições de umidade e nutrição favoráveis, a planta dá preferência em manter mais ativas as raízes próximas ao colo, no intuito de reduzir os gastos energéticos em transporte de fotoassimilados, pela redução na distância fonte-dreno.

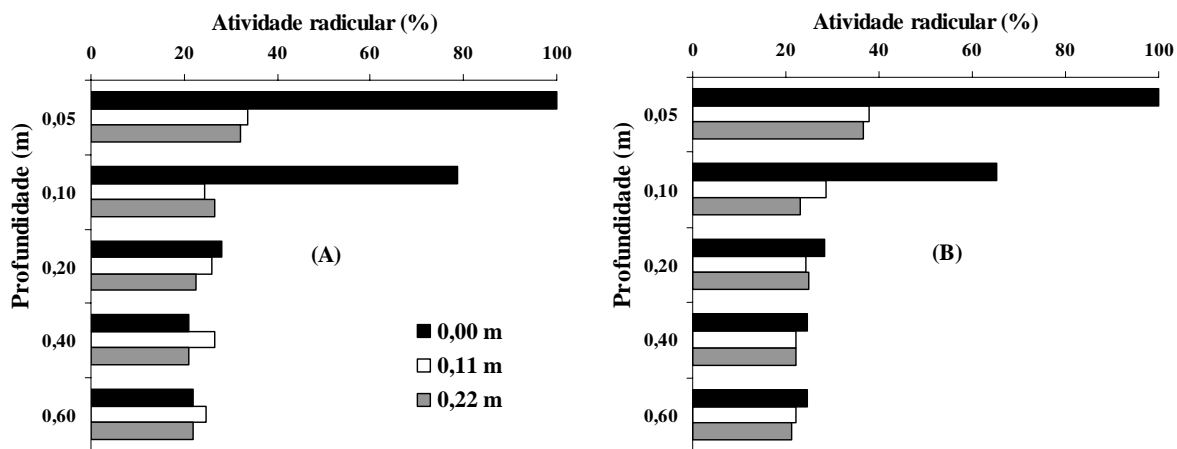


Figura 6 – Atividade radicular da soja após as culturas de inverno, girassol (A) ou triticale (B).

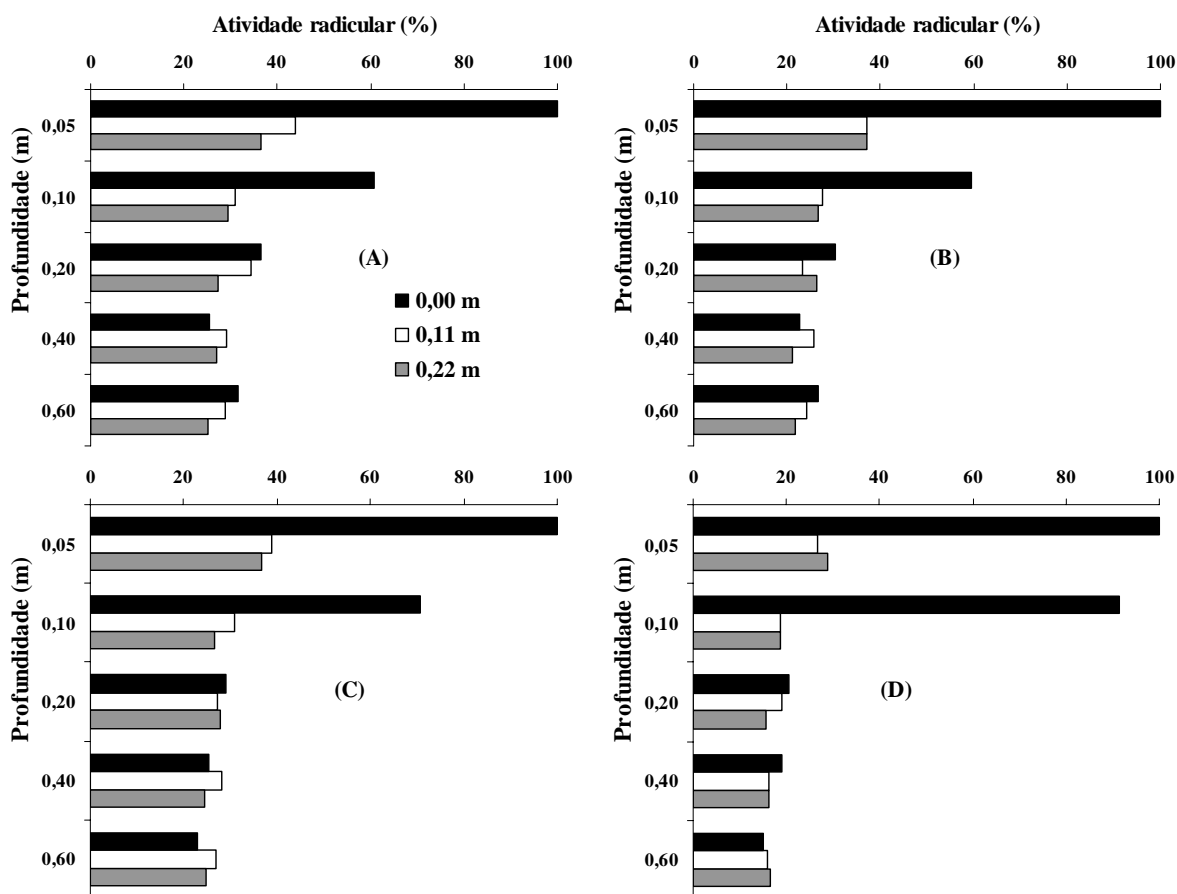


Figura 7 – Atividade radicular da soja, após os manejos de primavera, milho (A), sorgo forrageiro (B), crotalária júncea (C) ou escarificação (D).

Kulmatiski et al. (2010) avaliaram a distribuição da atividade radicular de gramíneas e espécies florestais nativas da África do Sul, utilizando como marcador a água deuterada ( $D_2O$  ou  $^2H_2O$ ), e encontraram para as gramíneas resultados semelhantes. O marcador foi aplicado em 100 pontos dentro de um círculo de  $1m^2$ , no meio da parcela. As distâncias avaliadas foram: dentro do círculo, 0-2, 2-3 e 3-5 m de distância do círculo. As profundidades avaliadas foram 0,05; 0,20; 0,50 e 1,20 m. Entre as distâncias de aplicação, a atividade no interior do círculo correspondeu a 98%. Entre as profundidades 0,05; 0,20; 0,50 e 1,20 m, as atividades foram de 61, 29, 9 e 0,3%, respectivamente. Os autores realizaram a avaliação em quatro épocas do ano, todas coincidindo com altas precipitações.

A maior atividade radicular nas camadas superficiais em épocas chuvosas também foi verificada por Lehman (2003), em uma revisão abordando várias espécies florestais. O autor salienta que a atividade radicular é uma característica muito dinâmica, pois quando a umidade do solo está alta, se concentra próximo da superfície. Quando se inicia a estação seca, a planta ajusta-se rapidamente, aumentando a absorção em camadas mais profundas.

### **6.3. Análise da distribuição vertical do sistema radicular da soja**

De certa forma, a distribuição vertical do sistema radicular da soja pôde ser observada nos itens 6.1 e 6.2, entretanto, o uso da análise de regressão torna a interpretação menos subjetiva.

Independentemente do tratamento, a distribuição da densidade de comprimento apresentou menores valores do coeficiente  $\beta$  que a atividade, ou seja, a soja distribuiu a atividade de maneira mais uniforme entre as camadas do solo do que a presença física das raízes, que apresentou grande concentração próxima à superfície (Tabela 4). Isso pode ser observado mais claramente pelo fato de nenhum tratamento apresentar acúmulo de 80% de densidade de comprimento radicular abaixo de 10 cm de profundidade, enquanto que para a atividade isso ocorre em todos os tratamentos, variando de 13,6 (escarificação na distância 0,00 m) a 31,7 cm (girassol na distância 0,11 m).

Entre as culturas de inverno, a distribuição foi bem homogênea, tanto para o crescimento como para a atividade radicular. Entre os manejos de primavera, as

principais diferenças ocorreram entre o milho e a escarificação, principalmente na distância 0,00 m da planta de referência, tanto para densidade de comprimento como para atividade radicular, enquanto que a crotalária e o sorgo apresentaram distribuições intermediárias.

Tabela 4 – Valores do coeficiente  $\beta$  obtido a partir do modelo  $Y = 1 - \beta^P$ , proposto por Gale e Grigal (1987), e profundidade correspondente ao acúmulo de 80% (P80), para densidade de comprimento e atividade radicular da soja, em três distâncias da planta de referência.

<b>Densidade de comprimento radicular</b>									
Distâncias	0,00 m			0,11 m			0,22 m		
<b>Inverno</b>	$\beta$	R <sup>2</sup>	P80 (cm)	$\beta$	R <sup>2</sup>	P80 (cm)	$\beta$	R <sup>2</sup>	P80 (cm)
Girassol	0,819	0,99**	8,1	0,787	0,97**	6,7	0,779	0,95**	6,5
Triticale	0,836	0,98**	9,0	0,797	0,95**	7,1	0,795	0,97**	7,0
<b>Primavera</b>									
Milheto	0,797	0,95**	7,1	0,764	0,95**	6,0	0,766	0,92**	6,0
Sorgo	0,821	0,98**	8,2	0,788	0,94**	6,8	0,782	0,93**	6,5
Crotalária	0,835	0,97**	8,9	0,768	0,93**	6,1	0,783	0,97**	6,6
Escarificação	0,850	0,99**	9,9	0,835	0,97**	8,9	0,814	0,99**	7,8
<b>Atividade radicular</b>									
Distâncias	0,00 m			0,11 m			0,22 m		
<b>Inverno</b>	$\beta$	R <sup>2</sup>	P80 (cm)	$\beta$	R <sup>2</sup>	P80 (cm)	$\beta$	R <sup>2</sup>	P80 (cm)
Girassol	0,903	0,94**	15,8	0,951	0,96**	31,7	0,946	0,97**	28,8
Triticale	0,907	0,92**	16,4	0,944	0,95**	28,0	0,945	0,97**	28,3
<b>Primavera</b>									
Milheto	0,916	0,90**	18,3	0,948	0,97**	30,1	0,947	0,97**	29,7
Sorgo	0,908	0,92**	16,6	0,949	0,91**	30,9	0,943	0,96**	27,6
Crotalária	0,906	0,91**	16,4	0,948	0,95**	30,1	0,947	0,98**	29,5
Escarificação	0,889	0,93**	13,6	0,944	0,96**	28,1	0,943	0,93**	27,5

\*\*regressão significativa a  $P < 0,01$ .

A distribuição de densidade de comprimento radicular da soja após o milho foi mais concentrada na superfície, com  $\beta$  de 0,797 na distância 0,00 m, enquanto que a escarificação proporcionou uma distribuição mais equilibrada, com  $\beta$  de 0,850 na mesma distância. Para a atividade radicular o comportamento foi o inverso. O milho promoveu uma distribuição mais uniforme, com  $\beta$  de 0,916 e 80% da atividade até 18,3 cm, contra um  $\beta$  de 0,889 e 80% da atividade até 13,6 cm para a escarificação.



Lehman (2003) utilizou uma regressão semelhante à proposta por Gale e Grigal,  $Y = \text{Ativ}_{\max}(1 - \beta^P)$ , apenas adicionando ao modelo a atividade máxima, sempre com valor 100. O coeficiente  $\beta$  gerado possui a mesma interpretação do utilizado neste trabalho. O autor comparou os valores de  $\beta$  para atividade radicular, obtidos a partir de 21 experimentos em vários biomas com espécies florestais, com os valores de  $\beta$  para massa de matéria seca radicular, também de vários biomas, apresentados por Jackson et al. (1996), e observou que o valor de  $\beta$  para a atividade radicular é muito maior do que para massa de matéria seca, comportamento semelhante ao encontrado para a cultura da soja neste trabalho.

#### 6.4. Comparação entre as metodologias

A interpretação dos valores dos coeficientes de correlação de Pearson (Tabela 5) será conforme Andriotti (2003): correlação nula = 0; fraca = 0,01-0,29; moderada = 0,30-0,59; forte = 0,60-0,89; muito forte = 0,9-0,99; perfeita = 1.

Tabela 5 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre as variáveis radiculares da soja, a partir de duas origens de dados: proporção de cada camada em relação ao total (valores percentuais) e valores absolutos.

<b>Valores percentuais</b>			
	Atividade	Densidade de comprimento	Área superficial
Densidade de comprimento	0,55**		
Área superficial	0,54**	0,99**	
Massa de matéria seca	0,54**	0,93**	0,95**
<b>Valores absolutos<sup>1</sup></b>			
	Atividade	Densidade de comprimento	Área superficial
Densidade de comprimento	0,25**		
Área superficial	0,26**	0,99**	
Massa de matéria seca	0,41**	0,86**	0,90**

\*\*significativo a  $P < 0,01$

<sup>1</sup> atividade radicular: teor de Rb; densidade de comprimento radicular:  $\text{cm cm}^{-3}$ ; área superficial radicular:  $\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$ ; massa de matéria seca radicular:  $\text{g dm}^{-3}$

Independentemente da origem dos dados, as variáveis densidade de comprimento, área superficial e massa de matéria seca radicular foram positivas e muito

fortemente correlacionadas, exceto para os valores absolutos de massa de matéria seca e densidade de comprimento radicular, com um  $r$  de 0,86.

As correlações entre a atividade radicular e os valores obtidos pelo método do trado apresentaram resultados distintos conforme a origem de dados utilizada. Considerando os valores percentuais, as correlações foram positivas e moderadas, com  $r$  em torno de 0,54. Para os valores absolutos a correlação foi positiva e fraca entre atividade e densidade de comprimento e área superficial, e positiva e moderada entre atividade e massa de matéria seca.

Os baixos valores dos coeficientes de correlação entre a atividade e as demais variáveis estão relacionados a algumas características intrínsecas dos métodos utilizados. Pelo rubídio foi estimada a distribuição da atividade radicular de plantas isoladas, ao contrário do método do trado, onde são amostradas raízes de várias plantas. Comparando a densidade de comprimento radicular entre as distâncias da planta de referência (Figuras 4 e 5), nota-se que praticamente em todas as camadas do solo os maiores valores são encontrados nas distâncias 0,11 e 0,22 m, onde há maior mistura de raízes das linhas adjacentes, ao contrário da atividade (Figuras 6 e 7), que sempre apresentou seu valor máximo na linha de semeadura. Isso também é comprovado pelo maior valor de  $\beta$  na distância 0,00 para densidade de comprimento radicular e menor valor do coeficiente para a atividade, na mesma distância (Tabela 4). Considerando então apenas as distâncias, o comportamento se equipara a uma correlação negativa. Entretanto, tanto a atividade radicular como as medidas diretas apresentam redução com o aumento da profundidade, inferindo uma correlação positiva. Ao agrupar todos os dados, a correlação se torna fraca.

Uma alternativa para amenizar esse efeito seria a aplicação do marcador em vários pontos próximos e a coleta de algumas plantas, como utilizado por Kulmatiski et al. (2010) em gramíneas nativas da África do Sul, que aplicou água deuterada ( $D_2O$  ou  $^2H_2O$ ) em 100 pontos em  $1m^2$ , melhorando a comparação com o método do trado.

Outra distinção dos métodos que pode ter contribuído para as baixas correlações é relacionada às profundidades de amostragem. Pelo trado são coletadas camadas de solo e pelo método indireto o marcador é aplicado em profundidades específicas, ou seja, não é estimada a absorção em todo o volume do solo.

Dependendo do elemento utilizado para determinar a atividade radicular ocorre variação nos resultados. Göransson et al. (2007) avaliou a distribuição vertical da absorção de N, K e P, utilizando os respectivos marcadores  $^{15}\text{N}$ ,  $^{86}\text{Rb}$ ,  $^{32}\text{P}$ , em amostras de raízes de mesmo diâmetro de carvalho (*Quercus robur*). A absorção de  $^{15}\text{N}$  e  $^{86}\text{Rb}$  concentrou-se nas amostras retiradas próximas a superfície, enquanto a absorção de  $^{32}\text{P}$  foi similar em todas as profundidades. O potássio, nitrato, amônio e o fosfato podem ser absorvidos em toda a superfície radicular, entretanto, em muitas espécies, os pêlos radiculares são mais ativos na absorção de fosfato (TAIZ; ZEIGER, 2004). O'Sullivan (2008) encontrou maior absorção do marcador estrôncio nas extremidades de raízes jovens, devido a esse elemento ser análogo ao cálcio. Dessa forma, de acordo com o marcador utilizado, a correlação da atividade com a amostragem direta do sistema radicular pode ser maior.

Entretanto, mesmo que as formas de coleta e aplicação dos métodos se assemelhem, a atividade é uma característica muito mais dinâmica do que a distribuição real do sistema radicular, reduzindo a correlação entre ambas. Em determinadas condições, como baixa disponibilidade de nutrientes, as raízes das plantas apresentam muitas adaptações morfológicas, mas tais respostas são lentas quando comparadas às mudanças fisiológicas que podem ser iniciadas dentro de horas (GLASS, 2002).

Hansen (1974) demonstrou em macieiras que em condições de drenagem a 0,9 m de profundidade, mesmo com a presença física de raízes, a atividade foi praticamente nula a partir de 1,3 m, enquanto que com drenagens a 1,3 e 1,7 m as plantas apresentaram atividade radicular, até 1,6 m, de 40 e 20% respectivamente.

Aspectos práticos de execução também devem ser considerados na escolha da metodologia. O método do trado foi muito mais trabalhoso, especialmente na limpeza das raízes. Após a retirada do solo, as amostras das camadas superficiais das parcelas sem escarificação ainda apresentavam muitas impurezas, principalmente resíduos vegetais não decompostos, além da maior quantidade de raízes, dificultando a sua separação. Além das impurezas, foi necessário retirar raízes das culturas antecessoras e raízes de soja mortas, tornando a avaliação muito minuciosa, subjetiva, lenta e mais suscetível a erros. Todos esses aspectos contribuíram para a alta variabilidade dos dados apresentada pelo método do trado.

## 6.5. Produtividade da soja

A produtividade da soja não foi afetada pelas culturas de inverno e pelos manejos de primavera (Tabela 6). A ausência de resposta da escarificação sobre a produtividade da soja foi verificada por outros autores, mesmo quando este manejo apresentou melhoria das propriedades físicas (CÂMARA; KLEIN, 2005b; SECCO et al., 2005; KLEIN; CÂMARA, 2007; LANÇA RODRIGUES et al., 2009; SECCO et al., 2009).

Tabela 6 – Produtividade da soja após culturas de inverno e manejos de primavera.

<b>Culturas de inverno</b>	<b>Produtividade (kg ha<sup>-1</sup>)</b>
Girassol	3918
Triticale	3824
<b>Manejo de primavera</b>	
Milheto	3963
Sorgo	3780
Crotalária	3849
Escarificação	3891
	<b>Valor de P&gt;F</b>
Cultivo de inverno (CI)	0,747
Manejo de primavera (MP)	0,799
CI x MP	0,112

O aumento da produtividade das culturas com o uso da escarificação é associado à quebra de camadas compactadas encontradas em áreas sob semeadura direta, aumentando o crescimento radicular, importante em condições de déficit hídrico. Entretanto, o surgimento da compactação nesse sistema geralmente ocorre nos primeiros anos de implantação ou em áreas com manejo inadequado, como a ausência de rotação de culturas.

Como o experimento possui um histórico de 7 anos, o sistema de semeadura direta já se encontra estabilizado, demonstrado pela maior densidade de comprimento radicular da soja após as plantas de cobertura de primavera, mesmo após a escarificação recente.

As diferenças de densidade de comprimento e atividade radicular da soja após a escarificação e o milheto, que foram os tratamentos que apresentaram os resultados mais contrastantes, podem ajudar a entender a ausência de resposta em produtividade. A

escarificação proporcionou os menores valores de crescimento radicular, entretanto, maior atividade na camada superficial, coincidindo com o local de deposição do fertilizante. O milho promoveu as maiores densidades de comprimento radicular, contudo, a atividade foi mais distribuída no perfil do solo.

A ausência de diferenças na produtividade da soja entre os tratamentos está relacionada com a distribuição satisfatória das precipitações durante todo o ciclo da cultura (Figura 2), o que proporcionou também altas produtividades. A média geral do experimento foi de  $3871 \text{ kg ha}^{-1}$ , enquanto no estado de São Paulo foi de  $2775 \text{ kg ha}^{-1}$  e no Brasil de  $2941 \text{ kg ha}^{-1}$  (CONAB, 2010).

O adequado suprimento hídrico também impossibilitou uma melhor comparação entre as metodologias de análise radicular, pois na ocorrência de um déficit hídrico e uma possível diferença em produtividade, poder-se-ia diferenciar melhor os métodos, demonstrando se a produtividade estaria mais relacionada com a distribuição física das raízes ou com a distribuição da atividade radicular.

Apesar dos métodos de avaliação radicular apresentarem comportamentos distintos, é difícil apontar qual é mais adequado, pois isso também é dependente das características inerentes a cada experimento.

Se uma pesquisa é mais voltada a propriedades do solo que limitam ou impeçam o crescimento radicular ou afetem a sua distribuição física, como camadas de alta resistência a penetração ou com presença de alumínio tóxico, a avaliação direta pode ser mais adequada.

Reciprocamente, se para avaliar o objeto de estudo não basta apenas que as raízes estejam presentes, mas que estejam vivas e ativas, absorvendo água e nutrientes e contribuindo para a produção da planta, como localização de fertilizantes ou profundidade de drenagem, nesses casos, a avaliação da atividade pode ser mais apropriada.

## 7. CONCLUSÕES

A produtividade da soja não foi influenciada pelas culturas de inverno ou manejos de primavera.

As culturas de inverno não se diferenciaram em nenhuma das variáveis.

Entre os manejos de primavera, a escarificação e a crotalária promoveram menor crescimento radicular da soja.

A escarificação proporcionou maior atividade radicular da soja na profundidade 0,10 m, entretanto, nas demais posições a atividade foi menor.

A medida direta do sistema radicular da soja, pelo método do trado, apresentou baixa correlação com a atividade radicular.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 519-531, maio/jun. 2004.

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Unisinos, 2003. 165 p.

AYRES, M. et al. **BioEstat: aplicações estatísticas nas áreas das ciências bio-médicas**. Belém: Universidade Federal do Pará. 2007. 364 p.

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**, Campinas, v. 21, n. 3, p. 409-418, mar./abr. 1997.

BÖHM, W. **Methods of studying root system**. Berlin: Springer-Verlag, 1979. 188 p.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de culturas e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1399-1407, jul./ago. 2008.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 33, n. 3, p. 242-249, Oct. 2010.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Escarificação em plantio direto como técnica de conservação do solo e da água. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 789-796, set./out. 2005a.

CAMARA, R. K.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 4, p. 813-819, jul./ago. 2005b.

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

CARVALHO FILHO, A. et al. Métodos de preparo do solo: alterações na rugosidade do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 229-237, jan./abr. 2007.

CASTRO, O. M. et al. Sistemas convencionais e reduzidos de preparo do solo e as perdas por erosão. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, n. 2, p. 167-171, maio/ago. 1986.

CLARK, L. J.; BARRACLOUGH, P. B. Do dicotyledons generate greater maximum axial root growth pressures than monocotyledons? **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 50, n. 336, p. 1263-1266, Jul. 1999.

CLARK, L. J.; WHALLEY, W. R.; BARRACLOUGH, P. B. How do roots penetrate strong soil? **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 255, n. 1, p. 93-104, Aug. 2003.

COLLARES, G. L. et al. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 3, p. 933-942, maio/jun. 2008.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira**: grãos, safra 2009/2010: nono levantamento, junho 2010. Brasília, DF: CONAB, 2010. 42 p.

DE KLERK, G. Rooting of micropropagules. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Orgs.). **Plant roots: the hidden half**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 349-358.



DE MARIA, I. C.; CASTRO, O. M.; SOUZA DIAS, H. 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, jul./set. 1999.

DOURADO-NETO, D. et al. Principles of crop modelling and simulation III: modeling of root growth and other belowground processes, limitations of the models, and the future of modeling in agriculture. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 55, p. 58-61, ago. 1998. Número especial.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.

ENCIDE-OLIBONE, A. P.; OLIBONE, D.; ROSOLEM, C. A. Atividade radicular da soja: definição de um método. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 899-903, mar./abr. 2008.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Screening crop genotypes for mineral stresses. In: WORKSHOP ON ADAPTATION OF PLANTS TO SOIL STRESS, 1993, Lincoln. **Proceedings...** Lincoln: University of Nebraska, 1993. p. 142-159.

FANTE JÚNIOR, L. et al. Distribuição do sistema radicular do milho em terra roxa estruturada latossólica I: comparação de metodologias. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 51, n. 3, p. 513-518, set./dez. 1994.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H. Manejo da compactação do solo no Sistema Plantio Direto na Palha. In: SIMPÓSIO SOBRE PLANTIO DIRETO NA PALHA, 1., 2009, Foz do Iguaçu. **Palestras...** Ponta Grossa: FEBRAPDP, 2009. 1 CD-ROM.

FUJIWARA, M. et al. A técnica de estudo de raízes pelo método do trado. **Boletim Técnico do Instituto Agrônomo de Campinas**, Campinas, n. 153, 1994. 9 p.

GALE, M. R.; GRIGAL, D. F. Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 17, n. 8, p. 829-834, Aug. 1987.

GLASS, A. D. M. Nutrient absorption by plant roots: Regulation of uptake to match plant demand. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Orgs.). **Plant roots: the hidden half**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 571-586.

GLINSKI, J.; LIPIEC, J. **Soil physical conditions and plant roots**. Boca Raton: CRC, 1990. 250 p.

GÖRANSSON, H.; FRANSSON, A. M.; JÖNSSON-BELYAZID, U. Do oaks have different strategies for uptake of N, K and P depending on soil depth? **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 297, n. 1/2, p. 119-125, Aug. 2007.

HANSEN, P. Drainage depth for apple trees. **Tidsskrift for Planteavl**, Copenhagen, v. 78, p. 46-52, 1974.

JACKSON, R. B. et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. **Oecologia**, Berlin, v. 108, n. 3, p. 389-411, Nov. 1996.

KLEIN, V. A.; BOLLER, W. Avaliação de diferentes manejos de solo e métodos de semeadura em áreas sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 395-398, set./dez. 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. 31, n. 2, p. 221-227, mar./abr. 2007.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de aplicação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, n. 3, p. 395-401, set./dez. 1995.

KOCHHANN, R. A.; DENARDIN, J. E. **Implantação e manejo do sistema plantio direto**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000. 36 p.

KULMATISKI, A. et al. A depth-controlled tracer technique measures vertical, horizontal and temporal patterns of water use by trees and grasses in a subtropical savanna. **New Phytologist**, Lancaster, v. 188, n. 1, p. 199-209, Oct. 2010.

LAL, R. Soil management in the developing countries. **Soil Science**, New Brunswick, v. 165, n. 1, p. 57-72, Jan. 2000.

LANÇA RODRÍGUES, J. G. et al. Effects of different soil tillage systems and coverages on soybean crop in the Botucatu Region in Brazil. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v. 7, n. 1, p. 173-180, jan./mar. 2009.

LEAL, A. J. F. et al. Aplicação de calcário e culturas de cobertura na implantação do sistema plantio direto em cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2771-2777, out./dez. 2008. Número especial.

LEHMANN, J. Subsoil root activity in tree-based cropping systems. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 255, n. 1, p. 319-331, Aug. 2003.

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

MALAVOLTA, E. A.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafós, 1997. 201 p.

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

MUZILLI, O. Manejo do solo em sistema plantio direto. In: CASÃO JÚNIOR, R. et al. (Orgs.). **Sistema plantio direto com qualidade**. Londrina: IAPAR; Foz do igauçu: ITAIPU Binacional, 2006. p. 9-27.

O'SULLIVAN, J. N. Root distribution of yam (*Dioscorea alata*) determined by strontium tracer. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v. 44, n. 2, p. 223-233, Apr. 2008.

PINKERTON, A.; SIMPSON, J. R. The use of stable strontium as a chemical tracer for root penetration. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 30, n. 2, p. 239-250, Mar./Apr. 1979.

POLOMSKI, J.; KUHN, N. Root Research methods. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Orgs.). **Plant roots: the hidden half**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 295-322.

RAVEN, P. H.; EVERT, R. F.; CURTS, H. **Biologia vegetal**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1996. 728 p.

ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; TIRITAN, C. S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, n. 1, p. 109-115, Apr. 2002.

SECCO, D. et al. Atributos físicos e produtividade de culturas em um Latossolo vermelho argiloso sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 407-414, maio/jun. 2005.

SECCO, D. et al. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, p. 58-64, jan./fev. 2009.

SIGMA PLOT. **Scientific graphing software**. versão 10.0. San Rafael: Hearne Scientific Software, 2006. 1 CD-ROM.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, DF, v. 37, n. 6, p. 855-860, jun. 2002.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, n. 3, p. 229-235, set./dez. 1991.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, Oxford, v. 63, n. 3, p. 995-1001, Nov. 1975.

VERNETTI JÚNIOR, F. de J.; GOMES, A. da S. **Plantio direto: uma opção de manejo para a produção agrícola sustentável**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. 69 p. (Documentos, 58).

WASEL, Y. Aeroponics: A tool for root research under minimal environmental restrictions. In: WASEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. (Orgs.). **Plant roots: the hidden half**. New York: Marcel Dekker, 2002. p. 323-332.

ZONTA, E. et al. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNANDES, M. S. (Org.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 7-52.