

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**SUPRIMENTO E ABSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS
SUBMETIDOS A DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO**

Tese de Doutorado

Alaerto Luiz Marcolan

Porto Alegre (RS), Brasil
Junho de 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**SUPRIMENTO E ABSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS SUBMETIDOS A
DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO**

ALAERTO LUIZ MARCOLAN
Engenheiro Agrônomo (UFSC)
Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)

Tese apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de
Doutor em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS), Brasil
Junho de 2006

ALAERTO LUIZ MARCOLAN
Engenheiro Agrônomo – UFSM
Mestre em Ciência do Solo - UFRGS

TESE

Submetida como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de

DOUTOR EM CIÊNCIA DO SOLO

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovada em: 20.06.2006
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 26.06.2006
por

IBANOR ANGHINONI
Professor Orientador
PPG-Ciência do Solo

CIMÉLIO BAYER
Coordenador do PPG-Ciência
do Solo

ANTONIO NOLLA
Departamento de Solos-UFU

DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS
Departamento de Solos-UFSM

EGON JOSÉ MEURER
PPG-Ciência do Solo

GILMAR A. B. MARODIN
Diretor da Faculdade de
Agronomia

MARINO JOSÉ TEDESCO
PPG-Ciência do Solo

Aos meus amados pais, Lourdes Largo Marcolan e Luiz Marcolan Primo, e aos meus adorados irmãos, Geisebel Erecilda Marcolan e Aluisio Marques Marcolan, pelo exemplo de vida, pela dedicação e pelos ensinamentos. Pois, com unidade familiar, amor e compreensão, souberam transmitir-me a força necessária para a realização desta tarefa.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter tornado tudo possível.

Ao professor Ibanor Anghinoni, pela amizade e confiança, pelo estímulo intelectual, pela generosidade de dividir comigo o seu imenso saber, pela disponibilidade constante na orientação e pelo exemplar trabalho de Mestre.

Aos pesquisadores Amando Dalla Rosa e João Becker da COTRISA, José Eloir Denardin e Rainoldo Alberto Kochhann da EMBRAPA-Trigo e Elio Marcolin e Vera Regina Mussoi Macedo do IRGA, pela liberação das áreas experimentais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e ao Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pela oportunidade.

Aos professores e funcionários do Departamento de Solos-UFRGS que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial ao funcionário Adão Luis R. dos Santos pela amizade, atenção e auxílio.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Aos meus amigos(as) do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela amizade, companheirismo e colaboração durante o curso.

Ao amigo Jefferson Horn Kunz, pela amizade e convivência.

À minha família, pelo exemplo de garra, amor, apoio, paciência e compreensão durante a minha vida.

À Francieli Ficanha, minha namorada, que esteve sempre presente, pelo amor, carinho, compreensão e incentivo ao ideal, transmitindo-me muita força para enfrentar esta etapa da vida.

Ao Allen Riel, meu afilhado e sobrinho, pelo carinho e pelos momentos felizes de descontração.

Agradeço, por fim, a todos aqueles que, de um modo ou de outro, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUPRIMENTO E ABSORÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS SUBMETIDOS A DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO^{1/}

Autor: Alaerto Luiz Marcolan
Orientador: Prof. Ibanor Anghinoni

RESUMO

A absorção de fósforo é determinada por processos e mecanismos que integram o seu fluxo no sistema solo-planta que, por sua vez, são afetados por fatores de solo e de planta, os quais podem ser descritos por modelos de simulação. Este trabalho teve por objetivo verificar o efeito dos fatores de solo e de planta que atuam na liberação, no suprimento e na absorção de fósforo e no crescimento da soja, em solos com diferentes características difusivas em plantio direto e preparo convencional, e sua verificação pelo modelo mecanístico de Barber e Cushman. O experimento foi realizado em câmara de crescimento do Departamento de Solos da UFRGS, em colunas indeformadas de solos submetidos a diferentes sistemas de preparo por longo período. Foram determinados os parâmetros de solo e de planta necessários para atender os objetivos propostos. A aplicação superficial dos adubos fosfatados e o não revolvimento do solo no sistema plantio direto resultaram em maior biodisponibilidade de fósforo em relação ao preparo convencional. A umidade volumétrica e o fator de impedância, de maneira geral, não diferiram entre os sistemas de preparo de solo, porém a maior concentração de fósforo na solução do solo e o menor poder tampão, no sistema plantio direto determinaram um maior suprimento de fósforo às raízes em relação ao preparo convencional. As plantas cultivadas no sistema plantio direto apresentaram maior crescimento radicular, predominantemente na camada de 0-10 cm, devido ao maior suprimento de fósforo. Estes dois parâmetros, maior suprimento e maior crescimento de raízes, determinaram maior absorção de fósforo e produção de matéria seca nas plantas de soja cultivadas no sistema plantio direto, em relação às cultivadas em preparo convencional. O modelo utilizado mostrou-se satisfatório para descrever a absorção de fósforo pela soja e possibilitou quantificar a contribuição de parâmetros e fatores que atuam no fluxo de fósforo no sistema solo-planta.

^{1/} Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. (107p.) - Junho, 2006.

PHOSPHORUS SUPPLY AND UPTAKE IN DIFFERENT SOILS UNDER TILLAGE SYSTEMS^{1/}

Author: Alaerto Luiz Marcolan
Adviser: Prof. Ibanor Anghinoni

SUMMARY

Phosphorus uptake by plant is determined by processes and mechanisms responsible by the soil-plant continuum flux, that are affected by soil and plant factors and can be described by simulation nutrient uptake models. This research was then conducted to verify the effect of soil and plant factors that influence phosphorus release, supply and uptake and soybean growth in soils with different diffusive characteristics under no and conventional tillage, and its evaluation by the Barber & Cushman mechanistic model. The experiment was conducted in growth chamber of the Department of Soils/UFRGS in undeformed soil columns with soils under different tillage systems for long time, with the determination of soil and plant parameters. Surface application of phosphate fertilizer and no soil mobilization under no-tillage showed higher phosphorus bioavailability in relation to conventional tillage. Volumetric water and impedance factor, in general, were not affected by tillage systems, but the higher phosphorus concentration in soil solution and the lower buffer power in no-tillage system, determined higher phosphorus supply to plant roots, as compared to conventional tillage. Soybean plants grown in no-tillage system presented higher root growth in the 0-10 cm soil layer, due to the higher phosphorus supply. These two parameters, higher phosphorus supply and higher root growth, increased the phosphorus uptake and the soybean dry matter production in no-tillage system. The uptake simulation model used describes satisfactorily phosphorus uptake by soybean and allows evaluate the contribution of parameters and factors involved in the soil-plant continuum phosphorus flux.

^{1/} Doctoral Thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. (107p.) - June, 2006.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. CAPÍTULO I – Revisão Bibliográfica	3
2.1. Eficiência de uso de fósforo pelas plantas.....	3
2.2. Formas, reações e dinâmica de fósforo no solo.....	5
2.3. Fluxo de fósforo no sistema solo-planta.....	8
2.4. Conteúdo volumétrico de água, textura do solo e suprimento de fósforo.....	11
2.5. Modo de adubação e suprimento e absorção de fósforo pelas plantas.....	13
2.6. Dinâmica de fósforo em sistemas de preparo do solo.....	15
2.7. Modelos mecanísticos de simulação de absorção de nutrientes.....	18
2.8. Problematização.....	20
3. CAPÍTULO II - Estudo 1: Suprimento e absorção de fósforo pela soja em solos submetidos a diferentes sistemas de preparo	23
3.1. Introdução.....	23
3.2. Material e métodos.....	25
3.2.1. Descrição dos experimentos de campo.....	26
3.2.1.1. Métodos de preparo de solo e modos de aplicação de adubo (MPSA).....	26
3.2.1.2. Sistemas de cultivo de arroz irrigado (SCAR).....	27
3.2.1.3. Diferentes sistemas de preparo do solo, rendimento da cevada e população de insetos subterrâneos (DSPS).....	28

3.2.1.4. Práticas mecânicas e culturais na recuperação de solos degradados pelo cultivo (PMCR).....	30
3.2.2. Coleta das amostras de solo.....	31
3.2.3. Experimento em câmara de crescimento.....	32
3.2.3.1. Tratamentos.....	32
3.2.3.2. Cultivo.....	33
3.2.4. Análises e determinações.....	33
3.2.4.1. No solo.....	33
3.2.4.2. Nas plantas de soja.....	35
3.2.5 Análise estatística.....	37
3.3. Resultados e discussão.....	38
3.3.1. Atributos físicos do solo.....	38
3.3.2. Atributos químicos do solo.....	43
3.3.3. Parâmetros que afetam o suprimento de fósforo às raízes....	50
3.3.4. Parâmetros de planta que afetam a absorção de fósforo.....	58
3.3.5. Fluxo de água, absorção de fósforo e crescimento de soja.	63
3.4. Conclusões.....	67
4. CAPÍTULO III - Estudo 2: Utilização de modelo mecanístico na predição da absorção de fósforo.....	69
4.1. Introdução.....	69
4.2. Material e métodos.....	70
4.2.1. Parâmetros do modelo.....	71
4.2.1.1. Parâmetros de solo.....	71
4.2.1.2. Parâmetros de planta.....	72
4.2.2. Parâmetros cinéticos de absorção.....	72
4.2.3. Verificação do modelo de Barber-Cushman.....	74
4.2.4. Simulações com o modelo utilizado.....	74
4.3. Resultados e discussão.....	74
4.3.1. Verificação do modelo utilizado.....	74
4.3.2. Simulações.....	79
4.4. Conclusões.....	87
5. CONCLUSÕES GERAIS.....	88

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
7. APÊNDICES.....	99
8. RESUMO BIOGRÁFICO.....	107

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Caracterização da camada de solo (0-20 cm) dos experimentos utilizados no presente estudo.....	25
2. Contribuição da camada superficial (0-10 cm) na absorção de fósforo total (0-20 cm) predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981), por plantas de soja cultivadas em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo.....	79
3. Parâmetros de solo e de planta (média de três repetições) utilizados como referência nas simulações e obtidos experimentalmente no Latossolo Vermelho distroférico 1 cultivado com soja no sistema plantio direto.....	80

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Densidade em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	39
2. Porosidade total em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	39
3. Macroporosidade em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	41
4. Microporosidade em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	41
5. Índice de estabilidade de agregados em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	42
6. Carbono orgânico total em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	44
7. pH em H ₂ O em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	45

8. Cálcio trocável em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	46
9. Magnésio trocável em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	46
10. Fósforo extraível por Mehlich-1 em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	48
11. Fósforo extraível por Resina em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	48
12. Relação entre fósforo extraível por Mehlich-1 e por Resina nas camadas de 0-10 e 10-20 cm em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo.....	50
13. Umidade volumétrica em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Não significativo pelo teste de Tukey a 5%.....	51
14. Perda d'água por evaporação em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	52
15. Água transpirada por plantas de soja, cultivadas em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	52
16. Fator de impedância em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	53
17. Fósforo na solução em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	54
18. Poder tampão do fósforo em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	56

19. Coeficiente de difusão do fósforo em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Não significativo pelo teste de Tukey a 5%	56
20. Comprimento de raiz de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	58
21. Área superficial da raiz de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	59
22. Raio médio da raiz de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Não significativo pelo teste de Tukey a 5%.....	59
23. Taxa de crescimento da raiz de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	61
24. Meia distância entre raízes de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	62
25. Influxo médio de água na superfície das raízes de soja em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	63
26. Fósforo contido nas raízes de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	64
27. Matéria seca de raízes de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	64
28. Fósforo absorvido pela soja (contido nas raízes, parte aérea e total) em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	65
29. Matéria seca de soja, raízes, parte aérea e total, em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	65

30. Relação entre fósforo absorvido por plantas de soja e a absorção predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) em cinco solos cultivados em diferentes sistemas de preparo.....	75
31. Relação entre fósforo absorvido por plantas de soja e a absorção predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) em um Latossolo Vermelho distrófico cultivado em diferentes sistemas de preparo.....	76
32. Relação entre fósforo absorvido por plantas de soja e a absorção predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) em quatro solos cultivados em diferentes sistemas de preparo.....	77
33. Relação entre o conteúdo volumétrico de água no solo e a absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) no Latossolo Vermelho distroférico 1 cultivado no sistema plantio direto.....	82
34. Relação entre a concentração inicial de fósforo na solução do solo e a absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) no Latossolo Vermelho distroférico 1 cultivado no sistema plantio direto.....	84
35. Relação entre o crescimento de raiz e a absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) no Latossolo Vermelho distroférico 1 cultivado no sistema plantio direto.....	86

RELAÇÃO DE APÊNDICES

	Página
1. Alumínio trocável em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	100
2. CTC efetiva em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.....	100
3. Extensão de depleção de fósforo (d) na solução do solo em torno das raízes de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo.....	101
4. Parâmetros de solo usados no modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) para predizer o fósforo absorvido pelas plantas de soja, em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo.....	102
5. Parâmetros morfológicos de plantas de soja usados no modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) para predizer o fósforo absorvido pelas plantas de soja, em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo.....	103
6. Absorção de água (influxo de água na superfície da raiz - v_0) e de fósforo e massa de matéria seca de plantas de soja em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo.....	104
7. Parâmetros cinéticos de plantas de soja usados no modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) para predizer o fósforo absorvido por plantas de soja cultivadas em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo (média de cinco repetições).....	105
8. Absorção de fósforo, observada e predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981), por plantas de soja cultivadas em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo (média de três repetições).....	105

9. Absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981), em função da variação do conteúdo volumétrico de água (θ) no Latossolo Vermelho distroférico 1 cultivado no sistema plantio direto.....	106
10. Absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981), em função da variação da concentração inicial de fósforo na solução (C_{ii}) no Latossolo Vermelho distroférico 1 cultivado no sistema plantio direto.....	106
11. Absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981), em função da variação do crescimento de raiz (L) no Latossolo Vermelho distroférico 1 cultivado no sistema plantio direto.....	106

1. INTRODUÇÃO

A eficiência de uso de fósforo em sistemas de preparo do solo tem significativa importância para a sustentabilidade do sistema produtivo e está diretamente relacionada à presença do nutriente na solução do solo. É dela que as raízes das plantas vão absorvê-lo, translocá-lo e utilizá-lo para a produção de biomassa vegetal (matéria seca, grãos e frutos). Essa eficiência depende de vários fatores, de natureza química, física e biológica, que podem estar relacionados ao fertilizante, ao tipo e manejo do solo e da cultura e ao ambiente (Baligar & Fageria, 1999; Anghinoni, 2004).

A absorção de fósforo do solo pelas plantas depende de seu suprimento às raízes que, devido à sua baixa concentração na solução e sua relativa imobilidade, é altamente dependente do mecanismo da difusão e, por conseguinte, das características das raízes e do ambiente circundante dessas raízes. Boa parte das características das raízes é variável conforme a idade da planta e depende da heterogeneidade, à curta distância, das propriedades do solo em que a planta cresce e se desenvolve (Novais & Smyth, 1999).

No sistema plantio direto, ocorrem alterações nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo em relação ao cultivado no preparo convencional. O fósforo, normalmente, é aplicado no sulco de semeadura ou a lanço, na camada superficial do solo, que não é revolvido, diminuindo os sítios de adsorção de fósforo. Assim, a disponibilidade desse nutriente no solo é alterada e, conseqüentemente, o mesmo ocorre com a distribuição do sistema radicular das plantas.

No sistema plantio direto, o cultivo sem revolvimento mantém o solo coberto com resíduos vegetais e apresenta uma taxa de decomposição, desses resíduos, bem menor, em relação ao preparo convencional, e mais constante

no tempo. A deposição dos resíduos na superfície do solo diminui as perdas de água por evaporação resultando em maior umidade no solo. Esses fatores, somados à baixa mobilidade do fósforo no perfil do solo e à redução das perdas por erosão levam, com o passar do tempo, ao aumento dos teores de fósforo disponível na camada superficial do solo.

O aumento na disponibilidade de fósforo, no sistema plantio direto, tem sido verificado em análises de fósforo disponível, Mehlich e resina de troca aniônica, e nos estudos de fracionamento do fósforo no solo (Sá 1999; 2004; Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Tokura et al., 2002; Rheinheimer et al., 2003; Schindwein, 2003). Entretanto, estudos com enfoque nos processos e nos mecanismos que determinam o suprimento desse nutriente às raízes são escassos na literatura. Diante disso, fica evidente a necessidade de pesquisas que contemplem o assunto, inclusive com a quantificação dos fatores de influência, especialmente as alterações em relação ao preparo convencional.

O melhor entendimento dos processos e dos mecanismos que integram o fluxo do fósforo no sistema solo-planta pode ser também obtido através do uso de modelos mecanísticos de absorção de nutrientes. Esses modelos, quando devidamente validados, possibilitam verificar ou prever os efeitos dos fatores de solo e de planta na absorção de nutrientes pelas raízes das plantas. Com isso, haverá uma contribuição ao desenvolvimento de métodos mais eficientes na avaliação da biodisponibilidade de nutrientes para as plantas e na utilização mais eficiente dos fertilizantes adicionados ao solo.

A realização do presente trabalho teve por objetivos gerais, verificar o efeito dos fatores de solo e de planta que atuam na liberação, no suprimento e na absorção de fósforo e no crescimento da soja em solos do Rio Grande do Sul com diferentes características difusivas e sistemas de preparo, e sua verificação pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981). Para isso, a Tese foi estruturada em capítulos; um de revisão bibliográfica (Capítulo I) e dois estudos: o Estudo 1, abordando o suprimento e a absorção de fósforo pela soja em solos submetidos a diferentes sistemas de preparo (Capítulo II); e o Estudo 2, tratando da utilização do modelo mecanístico, de Barber & Cushman (1981), na predição da absorção de fósforo e na verificação da importância de parâmetros de solo e de planta no suprimento e na absorção de fósforo por plantas de soja (Capítulo III).

2. CAPÍTULO I – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Eficiência de uso de fósforo pelas plantas

O termo “eficiência” é utilizado para diferenciar espécies de plantas, seus genótipos e cultivares em relação à sua habilidade para absorver e utilizar nutrientes ou para relacionar a produtividade das culturas em função da unidade de nutriente aplicado na forma de adubo (Baligar & Fageria, 1999). Sob o ponto de vista fisiológico, a eficiência de uso de fósforo pelas plantas pode ser definida como a quantidade de biomassa (matéria seca, grãos e frutos) produzida por unidade de nutriente absorvido da solução. Sob o ponto de vista agrônomo, a eficiência é expressa pelo rendimento de biomassa produzido por unidade de nutriente aplicado ao solo. Sob o ponto de vista econômico, trata-se da receita financeira gerada por unidade de nutriente aplicado como adubo (Anghinoni, 2004).

O estudo da eficiência de uso de fósforo deve, necessariamente, estar direcionado ao suprimento de fósforo do solo para as raízes, com ênfase na solução do solo, pois é nela que ocorre a absorção do nutriente para, depois, haver a translocação e a utilização para a produção de biomassa vegetal. Nesta situação, a eficiência de uso de fósforo resultará da eficiência de absorção, de translocação e de utilização, tendo-se como base a mesma quantidade do nutriente aplicada ao solo.

A eficiência de absorção é expressa pelo conteúdo de fósforo total presente na planta (quantidade de fósforo absorvido). A eficiência de translocação reflete a partição do fósforo nas raízes e na parte aérea, ou seja, a fração de fósforo absorvido que é transferida para a parte aérea. A eficiência de utilização corresponde à capacidade de produção de matéria seca (ou de

produto econômico) por unidade de fósforo absorvido (Baligar & Fageria, 1999; Abichequer et al., 2003).

A eficiência de uso de fósforo pelas plantas, se desenvolvendo em solos com diferentes características difusivas, é determinada pela capacidade do solo em suprir fósforo e pela capacidade das plantas para absorvê-lo, translocá-lo e utilizá-lo. Esses processos podem variar com o tipo e o preparo do solo, a espécie de planta, os seus genótipos e cultivares e com o ambiente (Baligar & Fageria, 1999; Anghinoni, 2004), envolvendo um sincronismo no sistema solo-planta-raiz.

A eficiência de uso do nutriente depende, assim, de parâmetros de planta (características morfológicas e funções fisiológicas) relacionados com a absorção de nutrientes, da interação solo-raiz (exsudatos radiculares e enzimas, fluxo de nutrientes no solo, características das raízes e tipo de solo), da relação raiz-parte aérea (absorção pelas raízes, translocação e subsequente redistribuição entre órgãos da planta) e da interação da planta com fatores bióticos (espécies espontâneas, insetos e doenças) e abióticos (temperatura do solo, umidade, pH, nutrientes e compactação do solo) (Baligar & Fageria, 1999).

A seleção de materiais genéticos que tenham boa adaptação a condições de baixa fertilidade do solo pode aumentar sensivelmente a eficiência dos adubos fosfatados. Essa eficiência é, também, influenciada pela dose, pela fonte e pelo método de aplicação ao solo. Melhorá-la está se tornando pré-requisito para diminuir o custo da produção, para a proteção ambiental e para o aumento do rendimento das culturas. Altas aplicações de adubos aumentam o custo da produção e podem deteriorar a qualidade da água (Baligar & Fageria, 1999).

Espera-se que diferentes tipos de preparos e de solos criem diferentes condições que possam influenciar a eficiência da adubação fosfatada, principalmente, devido à dinâmica e às reações do fósforo no solo, que resultam em diferente biodisponibilidade do mesmo.

2.2. Formas, reações e dinâmica de fósforo no solo

O fósforo total dos solos é composto de diferentes formas, orgânicas e inorgânicas, que apresentam diferentes graus de labilidade. Segundo Barber (1995), o fósforo no solo pode ser dividido em quatro categorias: fósforo na forma iônica e em compostos na solução do solo; fósforo adsorvido nas superfícies dos constituintes minerais do solo; minerais cristalinos e amorfos de fósforo; e fósforo componente da matéria orgânica. As concentrações na solução do solo são usualmente baixas, variando entre 0,01 e 1 mg L⁻¹ de fósforo e a forma H₂PO₄⁻ é a que predomina em pH abaixo de 6,0 (Larsen, 1967).

Em solos mais intemperizados, as formas orgânicas contabilizam cerca de 20-35% do fósforo total. Entre as formas de fósforo inorgânico, a metade delas constituem-se de fósforo residual, um quarto são formas pouco lábeis e o restante são formas inorgânicas de fósforo ligado a cálcio e aquelas extraídas pela resina de troca aniônica e pela solução de NaHCO₃, sendo apenas estas duas últimas formas inorgânicas de fósforo (lábeis) prontamente disponíveis (Cross & Schlesinger, 1995). Isso evidencia a participação de poucas formas inorgânicas no suprimento de fósforo às plantas e que formas de fósforo orgânico, uma vez mineralizadas, podem atender boa parte da demanda desse nutriente às plantas, especialmente com pouca ou nenhuma adição de fertilizante fosfatado, pelo menos nos primeiros cultivos.

Em grande parte dos solos, aproximadamente metade do fósforo total está na forma de compostos orgânicos. Porém, a variação entre solos é muito grande, podendo o fósforo orgânico representar apenas 4% do fósforo total em solos com teor de matéria orgânica muito baixo, enquanto, em solos orgânicos, pode constituir aproximadamente 90% do fósforo total (Anghinoni & Bissani, 2004). Em solos brasileiros, a concentração de fósforo orgânico total variou entre 7 e 272 mg kg⁻¹, tendo o fósforo orgânico lábil preponderante sobre o fósforo inorgânico lábil (Guerra et al., 1996). Em solos das Regiões Sul e Planalto do RS, o teor médio estimado de fósforo orgânico foi respectivamente de 57 e 53% e, nas formas ativas inorgânicas, foi de 30 e 13% do fósforo total (Machado et al., 1993).

A liberação de fósforo orgânico para a solução do solo é controlada pela taxa de mineralização da matéria orgânica e depende da atividade microbiana (Barber, 1995). Entretanto, o fósforo liberado na solução do solo, mediante a mineralização do fósforo orgânico, poderá ser adsorvido pela fase mineral do solo e tornar-se indisponível para as plantas (Novais & Smyth, 1999).

O suprimento de fósforo até as raízes no solo ocorre principalmente pelo mecanismo da difusão. A absorção desse nutriente pelas plantas cria uma zona de depleção em volta da raiz e os íons se difundem em decorrência de gradiente de concentração até a superfície radicular (Barber, 1995). Enquanto o fósforo da solução vai sendo exaurido pela absorção, o estoque de fósforo lábil irá recompor o fósforo da solução, pelo menos parcialmente, estabelecendo um novo equilíbrio para o sistema solo. O fósforo lábil indica o tamanho do estoque de fósforo que irá recompor as retiradas de fósforo da solução em curto prazo. O aumento do fósforo na solução implica aumento do fósforo lábil, e vice-versa.

Os solos diferem quanto à sensibilidade do fósforo lábil a alterações do fósforo da solução; essa resistência é denominada poder tampão (b) ou fator capacidade (FC) de fósforo do solo. Solos com maior poder tampão, como os mais intemperizados e argilosos, mantêm mais constantes os valores de fósforo da solução quando submetidos à retirada de fósforo. O fósforo lábil atua tamponando o sistema, isto é, procurando controlar os excessos e as carências, dentro dos limites de cada solo.

Solos argilosos, compostos predominantemente por oxihidróxidos de ferro e de alumínio e caulinita apresentam alta capacidade de adsorção de fósforo. O fósforo adicionado é rapidamente adsorvido pelo solo, principalmente quando cultivado no preparo convencional, uma vez que há maior exposição a novos sítios de adsorção, devido ao revolvimento do solo, exigindo maiores doses de fósforo para manter a mesma concentração na solução do solo. Assim, mesmo quando os teores de fósforo no solo forem relativamente elevados, em relação à quantidade necessária ao crescimento das plantas, apenas uma pequena fração tem baixa energia de ligação, que possibilita sua dessorção e, por conseguinte, sua disponibilidade às plantas.

Kurtz & Quirk (1965) observaram pequena ou nula diminuição na capacidade máxima de adsorção de fósforo em solos que receberam grandes doses de fósforo, por muitos anos. Em contrapartida, para solos que receberam grandes doses de fósforo mais recentemente foi observada redução na sua adsorção. Assim, os autores concluíram que o fósforo aplicado parece não ocupar permanentemente os sítios de adsorção, convertendo-se em outras formas, independentemente das superfícies das argilas. O que pode ser, em parte, justificada pela lenta difusão de fósforo para o interior das partículas de solo.

A adsorção de fósforo ocorre em duas fases, uma de rápida adsorção, onde há apenas uma atração eletrostática entre os íons e a superfície de carga oposta, ou seja, há a interposição de pelo menos uma molécula de água entre o grupo funcional de superfície e o íon ou molécula da solução do solo. Essa adsorção é chamada de complexo de esfera-externa (Meurer et al., 2004). Essa fase, mais rápida, é seguida de outra, mais lenta; assim, após a aproximação do fósforo à superfície adsorvente, há troca de ligantes, como OH^- e OH_2^+ , da superfície dos óxidos, por fosfato da solução (H_2PO_4), com a formação de ligações coordenadas simples, como componente externo da estrutura do oxidróxido, ou seja, nenhuma molécula de água se interpõe entre o grupo funcional de superfície e o íon ou molécula que se liga a ele, essa adsorção é chamada de complexo de esfera-interna (Meurer et al., 2004). É provável que a formação de uma ligação adicional à primeira (Parfitt, 1978) seja dependente do tempo. Essa fase mais lenta de adsorção de fósforo pelo solo é, também, caracterizada pela difusão do fosfato para o interior das partículas de solo (Barrow, 1983; 1985), tornando-se cada vez menor o equilíbrio com o fósforo da solução e, por conseguinte, a disponibilidade para as plantas.

A fração predominante de acúmulo de fósforo no solo, resultante da adição de adubos fosfatados, é a inorgânica, especialmente a moderadamente lábil (Conte et al., 2003; Rheinheimer & Anghinoni, 2003). Os acúmulos nas frações mais lábeis são dependentes do grau de intemperização, das características químicas e físicas do solo, da atividade biológica e da vegetação predominante, entre outras (Guerra et al., 1996). O acúmulo no compartimento biológico pode ocorrer em solos com menores teores de argila e

de óxidos de ferro, cultivados no sistema plantio direto e com a utilização de plantas com alta adição de biomassa (Rheinheimer & Anghinoni, 2003).

A absorção de fósforo pelas plantas em solos que acumularam fósforo, pela adição de fertilizantes fosfatados, sem posterior reposição, desencadeia um processo contínuo de depleção com o decorrer do tempo, inicialmente das formas lábeis (inorgânicas e orgânicas), depois, das moderadamente lábeis e, finalmente, até as mais recalcitrantes (de menor labilidade), de forma a dessorver a maior parte do fósforo adicionado (Rheinheimer et al., 2000). Entretanto, o fornecimento de fósforo pelas formas menos lábeis ocorre em taxas inferiores às necessárias para o crescimento adequado das plantas (Gatiboni, 2003).

2.3. Fluxo de fósforo no sistema solo-planta

O fósforo adicionado ao solo através dos adubos fosfatados provoca reações que tendem ao equilíbrio entre as fases sólida e líquida do solo. As plantas absorvem fósforo da solução do solo e a fase sólida passa a ser a fonte potencial de fósforo. O fluxo de fósforo inicia na fase sólida, com sua liberação para a solução do solo, sendo suprido até a superfície das raízes e, uma vez absorvido, acaba no interior da planta, onde será redistribuído entre seus órgãos, determinando o desenvolvimento e o rendimento da parte vegetal.

O fósforo é liberado da fase sólida, predominantemente, através de reações de dessorção que ocorrem na superfície das partículas de solo, mas também pela dissolução de minerais primários e secundários e pela decomposição da matéria orgânica. Sua liberação da fase sólida para a solução pode, ainda, aumentar ou diminuir, dependendo do pH, potencial redox, temperatura do solo e força iônica da solução.

A solubilidade dos minerais depende do pH, assim como as formas dominantes dos íons em solução, as reações de adsorção-dessorção e a atividade microbiana, responsável pela decomposição dos compostos orgânicos. Os fosfatos de cálcio têm sua solubilidade aumentada em condições mais ácidas (pH baixo), enquanto os fosfatos de ferro e alumínio têm a

solubilidade aumentada com o aumento do pH e, portanto, diminuição da acidez.

A concentração de fósforo na solução (C_l) depende diretamente da concentração na fase sólida (C_s) em rápido equilíbrio (lábil) com o fósforo da solução. A absorção de fósforo pelas plantas depende da concentração de fósforo em solução e do seu deslocamento até a superfície da raiz. Este suprimento, ocorre por fluxo de massa, decorrente do gradiente hídrico, e, principalmente, mais de 90% do fósforo absorvido, por difusão (Equação 1), em decorrência de gradiente de concentração de fósforo (dc/dx) na solução em relação à concentração na superfície da raiz (Equação 2). Assim, para a determinação da quantidade de fósforo que chega às raízes (dq/dt), além dos fatores que afetam a concentração na solução, são também importantes os fatores que afetam o coeficiente de difusão (D_e) (Equação 3), e a superfície e a distribuição de raízes (A) (Barber, 1995):

$$dq / dt = A D_e dc / dx \quad (1)$$

O gradiente de concentração de fósforo (dc/dx) pode ser obtido pela equação (Corey & Schulte, 1973):

$$dc / dx = (C_1 - C_2) / L \quad (2)$$

em que, C_1 é a concentração do nutriente na solução do solo (não influenciada pelo processo de difusão e a uma distância L da raiz); C_2 é a concentração do nutriente na solução do solo na superfície da raiz; e L é a distância entre C_1 e C_2 , que pode variar de 0,5 a 4,0 mm, ou mais (Anghinoni & Meurer, 2004).

O coeficiente de difusão de fósforo no solo (D_e) pode ser calculado por (Nye & Tinker, 1977):

$$D_e = D_1 \theta f / b \quad (3)$$

em que, D_1 é o coeficiente de difusão de fósforo em água ($8,9 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$), θ é o conteúdo volumétrico de água, f é o fator de impedância (tortuosidade) e b é o poder tampão de fósforo do solo.

O fator de impedância, adimensional, variável conforme a tortuosidade da trajetória da difusão, é calculado através das seguintes equações (Barraclough & Tinker, 1981):

$$f = 1,58 \theta - 0,172 \text{ (solos francos e arenosos)} \quad (4)$$

$$f = 0,99 \theta - 0,172 \text{ (solos argilosos)} \quad (5)$$

Assim, o conteúdo volumétrico de água (θ) determina o valor do fator de impedância (f - Equações 4 e 5), e juntamente com ele, atua diretamente no coeficiente de difusão de fósforo (D_e - Equação 3), mostrando, desta forma, a sua importância na difusão do fósforo no solo. Além da composição do solo (teor de argila, óxidos e matéria orgânica) e dos fatores climáticos, o conteúdo volumétrico de água (θ) pode ser afetado pelo manejo do solo e de culturas.

A capacidade do solo repor o fósforo na solução (poder tampão), à medida que é absorvido pelas plantas, depende da concentração na fase sólida (C_s) em equilíbrio com o fósforo da solução (C_l) (Barber, 1995):

$$b = C_s / C_l \quad (6)$$

O poder tampão (b) exerce um efeito de diminuir a difusão efetiva (D_e - Equação 3) de íons na solução do solo em direção às raízes, principalmente daqueles que são fortemente adsorvidos às partículas de solo (Nye & Tinker, 1977). O suprimento de nutrientes às raízes (dq/dt) apresentam grande dependência da concentração inicial do nutriente na superfície da raiz e da capacidade do solo em manter essa ou determinada concentração (Barber, 1974).

A quantidade de fósforo absorvida pelas plantas depende, ainda, da taxa de absorção e da magnitude do sistema radicular (A). A taxa de absorção é função da concentração de fósforo na superfície das raízes (que determina a magnitude de dc/dx - Equação 1), a qual é controlada por características fisiológicas que variam com as espécies, seus cultivares e genótipos. O fósforo absorvido transloca-se para regiões de maior atividade celular, para ser utilizado na produção vegetal (forragem, grãos ou frutos). Já, a magnitude do

sistema radicular pode ser afetada por fatores de solo. Solos compactados, mal arejados, deficientes em nutrientes e com presença de elementos tóxicos, como alumínio, diminuem o crescimento do sistema radicular (Valor A – Equação 1). A presença de substâncias tóxicas ao metabolismo vegetal e a falta de oxigênio bloqueiam a liberação de energia necessária ao processo de absorção de nutrientes (Hodges, 1973).

A etapa mais limitante para o fósforo, desde o fluxo inicial na fase sólida até sua utilização pela planta, pode ser a sua baixa mobilidade no solo, podendo não atingir a superfície radicular no período de crescimento da cultura, mesmo sem deficiência de umidade. O fluxo de fósforo e a absorção pelas raízes das plantas são alterados pelas modificações na rizosfera, provocadas pelas próprias raízes, devido à absorção seletiva de íons e de água e a liberação de exsudatos. A morfologia e a distribuição das raízes são alteradas pelo modo de aplicação do fósforo no solo (localizado ou não), havendo maior estímulo ao seu crescimento nas regiões fertilizadas, especialmente em solos com alta capacidade de retenção de fósforo, baixo teor disponível e aplicação de doses baixas desse nutriente (Anghinoni, 2004).

2.4. Conteúdo volumétrico de água, textura do solo e suprimento de fósforo

A difusão de fósforo (dq/dt) tem relação direta com o conteúdo volumétrico de água no solo (θ) (Olsen et al., 1961; Hira & Singh, 1977), uma vez que, com o aumento deste, o filme de água ao redor dos colóides fica mais espesso, diminuindo a interação íon-colóide e aumentando a sua difusividade no solo. Além dessas conseqüências diretas do aumento do conteúdo volumétrico de água no solo (θ), ocorre um conseqüente aumento no fator de impedância (f), devido à diminuição da tortuosidade e da viscosidade da água, que representa valor mais próximo daquele da água pura, por sua maior distância dos colóides do solo.

Para um mesmo conteúdo volumétrico de água (θ), os solos argilosos, com menor fator de impedância (f – Equação 5) e maior interação íon-colóide, terão menor difusão. Porém, quando se iguala o potencial de água,

a difusão será maior no solo mais argiloso, uma vez que apresenta maior conteúdo volumétrico de água, para uma mesma energia de retenção. O aumento do fator de impedância supera a maior interação entre íon e colóide nos solos argilosos (Ruiz et al., 1988b).

Solos mais argilosos possuem maior quantidade de fósforo na fase sólida (C_s) do que os mais arenosos, para uma mesma concentração na solução (C_l). No entanto, com a aplicação de doses crescentes de fósforo em um solo, verifica-se que, após o equilíbrio, o poder tampão (b - Equação 6) diminui porque, proporcionalmente, maior quantidade de fósforo permanece na solução. Com isso, ocorre incremento no fluxo difusivo (dq/dt) até a superfície das raízes pelo aumento do gradiente (dc/dx).

Solos arenosos terão mais fósforo em solução, para uma mesma dose de fósforo aplicada, do que os argilosos. Como maiores valores de fósforo na solução induzem a um maior gradiente de fósforo (dc/dx) e esses são mais facilmente conseguidos nos solos arenosos, por terem menor adsorção, o que significa mais fósforo na solução e menos adsorvido (menor poder tampão). Assim, a difusão de fósforo (dq/dt) é mais facilitada nos solos arenosos do que nos argilosos.

Além do efeito na concentração do nutriente na solução (valor dc/dx da Equação 1), alterações em algumas propriedades ou condições específicas do solo refletirão sobre o coeficiente de difusão do fósforo (D_e) pelo efeito no conteúdo volumétrico de água (θ) e na interação dos colóides do solo (Ruiz et al., 1988b). A água é de fundamental importância como veículo para a difusão do fósforo (dq/dt), independentemente do teor do nutriente no solo (Ruiz et al., 1988a). Entretanto, em solos intemperizados, com maior poder tampão (b), a difusão do fósforo (dq/dt) é praticamente interrompida quando o potencial matricial de água do solo é inferior a $-0,04$ MPa (Ruiz et al., 1988a). Assim, a absorção é paralisada muito antes da planta ser submetida a um estresse hídrico *per se* ($-1,5$ MPa).

Para Novais & Smyth (1999), quando o conteúdo volumétrico de água no solo (θ) é alto, próximo à capacidade de campo, períodos de intensa absorção são alternados com outros em que a umidade do solo decresce a valores críticos para o transporte, embora, ainda, satisfatórios para a manutenção da planta em crescimento, sem estresse hídrico *per se*. Além do

conteúdo volumétrico de água (θ), a elevada adsorção de fósforo ou o elevado poder tampão (b) dos solos mais intemperizados parece ser a causa para a interrupção da difusão do fósforo. Assim, fica evidente a grande importância do conteúdo volumétrico de água (θ) e da textura do solo para o suprimento de fósforo (dq/dt) às plantas.

2.5. Modo de adubação e suprimento e absorção de fósforo pelas plantas

A eficiência da adubação fosfatada pode estar relacionada ao modo de adubação utilizado. Em geral, as adubações são feitas a lanço, com incorporação do adubo ao solo no sistema convencional, ou na superfície, no sistema plantio direto, ou aplicações no sulco de semeadura, em ambos os sistemas. Há, também, aplicações intermediárias (adubação feita em parte da área, intermediária entre a adubação a lanço, toda a área, e a na linha, concentrada), como, por exemplo, em faixa, em torno da linha de semeadura, que podem propiciar maior eficiência, principalmente em culturas com grande espaçamento entre linhas de semeadura. Diferentes modos de adubação representam diferentes proporções e intensidades de mistura do adubo com o solo.

Anghinoni & Barber (1980a; b), Borkert & Barber (1985) e Lu & Barber (1985) realizaram pesquisas para avaliar o efeito de doses de fosfato solúvel em diferentes frações de solo nos parâmetros que afetam a difusão do fósforo no solo e nos parâmetros morfológicos de raízes, bem como, em solução nutritiva, para avaliar o suprimento de fósforo a frações do sistema radicular nos parâmetros cinéticos de absorção. Os resultados mostraram que o suprimento de fósforo a apenas parte do sistema radicular aumenta a eficiência de absorção por unidade de raiz devido ao aumento do Influxo máximo (I_{max}) e diminuição da constante de Michaelis-Menten (K_m) e da concentração mínima (C_{min}). Há, também, aumento no crescimento radicular nas frações adubadas de solo, de modo a aumentar a eficiência da adubação em relação à mistura do adubo com todo o solo.

A localização de pequenas doses de fosfato solúvel em solos com alta capacidade de adsorção de fósforo é benéfica (Fox & Kang, 1978) e foi demonstrada por Anghinoni & Barber (1980b) e Zhang & Barber (1992), em ensaios de curta duração em vasos. Por outro lado, no campo, em experimento com milho, as vantagens da adubação localizada tenderam a diminuir quando a cultura foi submetida a um longo período de crescimento (Anghinoni, 1992). Neste caso, a disponibilidade de água (θ) e o fator de impedância (f) têm alta importância para as plantas, devido à elevada demanda evapotranspirativa. A alta densidade de raízes na camada superficial do solo (0-5 cm), devido às adubações localizadas, pode propiciar rápido secamento do solo nesta camada, restringindo o processo difusivo de fósforo em períodos de alta demanda hídrica (Klepker & Anghinoni, 1993).

Adubações em pequenos volumes de solo (5 a 10 %) tendem a favorecer a absorção de fósforo nos estágios iniciais de crescimento da planta, quando a taxa de absorção é maior (Mengel & Barber, 1974). Além disso, as raízes, em geral, se desenvolvem mais densamente nos pontos em que há maior suprimento de fósforo (Klepker & Anghinoni, 1993) e a absorção máxima de fósforo ocorre quando uma fração intermediária do volume de solo, entre lanço e sulco, for adubado (Anghinoni & Barber, 1980c). Entretanto, Klepker & Anghinoni (1996) relatam que a adubação a lanço pode proporcionar um maior acúmulo de fósforo nas plantas no estágio final de crescimento do milho, em relação às aplicações em faixa e sulco, por uma melhor distribuição do fósforo e das raízes no perfil do solo. À medida que aumenta a proporção de solo fertilizado com fósforo, a absorção total aumenta porque maior volume de raízes entra em contato com o fósforo fertilizante, até que a taxa de absorção atinge um máximo e, então, diminui, pois o teor de fósforo no solo adubado diminui mais do que o aumento da área radicular.

A eficiência de absorção de fósforo pelas plantas também é dependente da interação entre a dose de fósforo, a fração de solo fertilizado, o teor de fósforo no solo e a capacidade de retenção de fósforo (Anghinoni, 2004). Assim, doses menores de fósforo são mais eficientes quando misturadas com pequenas frações de solo e, à medida que as doses aumentam, frações intermediárias de mistura com o solo são mais eficientes.

Já para doses elevadas de fósforo, o efeito da mistura deixa de ser importante (Anghinoni, 2004).

A distribuição de raízes no perfil do solo está relacionada com a disponibilidade de nutrientes, principalmente a do fósforo. A aplicação localizada de fósforo reduz a superfície de contato com os constituintes do solo. Entretanto, a fração fertilizada não deve ser muito pequena a ponto de restringir o crescimento radicular pela limitação de água e de nutrientes. O decréscimo de umidade do solo, causada pela alta demanda das raízes, aumenta a salinidade e diminui a intensidade do processo de difusão (Anghinoni & Meurer, 1999).

O modo de adubação, independentemente do sistema de preparo do solo, influencia nas proporções e intensidades de misturas dos adubos com o solo, determinando diferentes graus de reação e, conseqüentemente, afetando a disponibilidade do fósforo e a distribuição das raízes no perfil do solo, bem como a sua absorção e a de água.

2.6. Dinâmica de fósforo em sistemas de preparo do solo

A dinâmica de fósforo no solo é influenciada pelos diferentes sistemas de preparo. No sistema plantio direto, a adubação fosfatada localizada, no sulco de semeadura ou a lanço na superfície, como visto, diminui a superfície de contato com os constituintes do solo. Embora menor porção de raízes entre em contato com o nutriente, espera-se um maior efeito residual, pois as regiões de maior concentração, tanto pela granulação como pela adubação em sulcos, são mantidas no tempo.

No sistema plantio direto, mesmo utilizando-se o mesmo modo de adubação fosfatada, lanço ou sulco, a disponibilidade de fósforo no solo é alterada devido ao não revolvimento do solo, em relação ao preparo convencional, e, conseqüentemente, o mesmo ocorre com a distribuição de raízes. No sistema plantio direto, o fósforo, normalmente, é aplicado no sulco de semeadura e o solo não é revolvido, mantendo-se coberto com resíduos vegetais e apresentando uma taxa de decomposição, desses resíduos, bem menor e mais constante no tempo. Esses fatores, somados à baixa mobilidade

do fósforo no perfil do solo e à redução das perdas por erosão favorecem, com o passar do tempo, o aumento dos teores de fósforo disponível na camada superficial do solo. O acúmulo de fósforo no solo ocorre em diversas formas, inclusive orgânicas (Rheinheimer & Anghinoni, 2003). O fósforo acumulado redistribui-se em formas com baixa energia de ligação aos colóides e, assim, atua mais eficientemente. A ciclagem de nutrientes de camadas mais profundas para a superfície e a competição de compostos orgânicos hidrossolúveis pelos sítios de adsorção podem aumentar a sua disponibilidade.

Solos cultivados no sistema plantio direto apresentam, também, alta concentração de raízes na camada superficial; logo, o fósforo proveniente dessas raízes após sua decomposição também passa a ser importante fonte para as plantas. O aumento de fósforo orgânico na camada superficial pronuncia-se mais, quando do aporte de altas quantidades de biomassa vegetal e em solos com alta resiliência (Rheinheimer & Anghinoni, 2003).

No sistema plantio direto, os teores de matéria orgânica são mais elevados, cujas substâncias húmicas, ou mesmo ácidos orgânicos de baixo peso molecular, podem auxiliar na diminuição dos sítios de adsorção e da energia de ligação fosfato-solo. A adição de doses similares de fertilizantes fosfatados ao solo provoca maior acumulação de fósforo na camada superficial do solo sob sistema plantio direto do que no preparo convencional (Rheinheimer & Anghinoni, 2001). Assim, o fósforo concentra-se em uma menor camada de solo, o que somado à diminuição dos sítios de adsorção e da energia de ligação fosfato-solo, aumentam a disponibilidade de fósforo às plantas.

A localização do fósforo em parte do solo, principalmente, naqueles com baixos teores, freqüentemente, aumenta a absorção de fósforo pelas plantas (Barber, 1995). Assim, no caso do sistema plantio direto, o fósforo é aplicado em parte do volume do solo, na camada superficial, logo aumentaria a disponibilidade de fósforo no solo fertilizado, resultando em maior suprimento de fósforo do solo para as raízes e, assim, maior absorção, em relação ao preparo convencional.

Em solos não fertilizados e com adição de resíduos vegetais, o fósforo orgânico tampona a solução do solo, servindo como fonte de fósforo. Porém, quando fertilizados, o fósforo acumula-se, preferencialmente, em

formas inorgânicas que tamponam a solução do solo. Assim, o fósforo orgânico é utilizado em menor quantidade, podendo ser acumulado. Neste caso, compostos orgânicos atuam como dreno de fósforo no solo (Novais & Smyth, 1999).

Os resíduos culturais acumulados na superfície do solo em plantio direto proporcionam menor amplitude térmica na camada superficial do solo (Bragagnolo & Mielniczuk, 1990), diminuindo a perda de água por evaporação e favorecendo a sua subida até a camada superficial por capilaridade. Assim, em função da maior disponibilidade hídrica, deve haver maior difusão de fósforo, que poderá beneficiar o suprimento às raízes e a absorção pelas plantas.

O manejo inadequado do solo em plantio direto e a ocorrência sistemática do tráfego de máquinas podem ocasionar, com o passar do tempo, compactação do solo. A sua intensidade depende das técnicas de cultivo empregadas e das características intrínsecas do solo. Com a compactação do solo ocorre decréscimo da porosidade, da macroporosidade, da disponibilidade de água e de nutrientes e da difusão de gases no solo e um aumento da resistência do solo à deformação (Taylor & Brar, 1991). Essas alterações afetam o desenvolvimento das raízes que, por sua vez diminuem a área de solo explorado e, por conseguinte, a absorção de água e de nutrientes.

Na avaliação do efeito de três estados de compactação e escarificação em dois Latossolos sob plantio direto, nas safras de 1999/2000 e 2000/2001, Secco (2003) concluiu que os níveis de compactação existentes, mesmo o mais elevado, com resistência do solo à penetração de até 3,20 MPa e densidade do solo de $1,58 \text{ kg dm}^{-3}$, não promoveram decréscimos no rendimento da soja. Entretanto, o mesmo não ocorreu com as culturas de milho e de trigo, que tiveram suas produções diminuídas com a compactação. Isso evidencia que a cultura da soja apresenta melhor desempenho em solos compactados em relação às culturas de milho e de trigo, provavelmente, por possuir sistema radicular pivotante, podendo ser capaz de penetrar em solos compactados ou adensados.

Os limites de compactação do solo ao crescimento radicular são variáveis com os tipos de solo e plantas. Para Vomocil & Flocker (1961) e Grable & Siemer (1968), quando a macroporosidade de um solo for inferior a

0,10 $\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, poderá haver restrição ao crescimento radicular e, conseqüentemente, ao desenvolvimento das plantas. A resistência à penetração aumenta com a compactação do solo e, de maneira geral, é restritiva ao crescimento radicular acima de 2,0 MPa (Tormena et al., 1998). As condições físicas do solo e o crescimento das plantas apresentam estreita interação, uma vez que as raízes parecem dispor de mecanismos de detecção dessas condições, enviando sinais à parte aérea que controlam o crescimento e a expansão foliar (Taylor & Brar, 1991).

Os aumentos da densidade do solo, com conseqüente diminuição do volume de macroporos na camada superficial de solos cultivados no sistema plantio direto (Bertol et al., 2000), não têm prejudicado a infiltração de água (Schick et al., 2000; Petreire & Anghinoni, 2001) e o desenvolvimento de raízes das plantas no Sul do País (Sá & Petreire, 1995).

2.7. Modelos mecanísticos de simulação de absorção de nutrientes

Os modelos mecanísticos que descrevem a absorção de nutrientes representam um resumo do conhecimento sobre esse assunto, enfatizando os parâmetros, os mecanismos e os fatores envolvidos. Após serem desenvolvidos e validados, os mesmos podem estimar as conseqüências na absorção dos nutrientes resultantes de variações nos parâmetros de solo e de planta. Assim, o processo de absorção de nutrientes pode ser melhor entendido, contribuindo para o desenvolvimento de métodos mais eficientes na avaliação da disponibilidade de nutrientes para as plantas e no manejo da adubação fosfatada.

Os modelos mencionados descrevem o fluxo de nutrientes, por difusão e por fluxo de massa, do solo para a raiz e sua absorção em função da sua concentração na solução externa às raízes, combinando com a taxa de aumento da área superficial da raiz para obter a absorção predita total.

Um modelo mecanístico bastante utilizado, para simulação de absorção de nutrientes é o de Barber & Cushman (1981), versão 3.5, descrito por Oates & Barber (1987). Este modelo prediz com sucesso a absorção de

fósforo em solos (Barber 1995). Para a sua utilização são necessários onze parâmetros:

1. D_e = coeficiente de difusão efetiva ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$);
2. b = poder tampão;
3. C_{ji} = concentração inicial do elemento em solução ($\mu\text{mol L}^{-1}$);
4. v_0 = influxo médio de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$);
5. r_1 = meia distância entre raízes (cm);
6. r_0 = raio médio da raiz (cm);
7. L_0 = comprimento inicial de raiz (cm);
8. k = taxa de crescimento de raiz (cm s^{-1});
9. $I_{\text{máx}}$ = influxo máximo ($\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$);
10. K_m = constante de Michaelis-Menten ($\mu\text{mol L}^{-1}$); e
11. $C_{\text{mín}}$ = concentração mínima ($\mu\text{mol L}^{-1}$).

Os três primeiros parâmetros fornecem a capacidade do solo em suprir nutrientes. O parâmetro 4 está relacionado com o consumo de água pelas plantas. Os parâmetros 5, 6, 7 e 8 fornecem a magnitude de área superficial de raiz, sua geometria e sua evolução no tempo. Os três últimos parâmetros (9, 10 e 11) descrevem a taxa de absorção de nutrientes em função de sua concentração na superfície da raiz. Os valores de K_m e de $C_{\text{mín}}$ estão relacionados à capacidade das plantas em absorver nutrientes em baixas concentrações.

A absorção do nutriente na solução junto à raiz, descrita pela cinética de Michaelis-Menten (Claassen et al., 1986), resulta das interações entre suas características morfológicas e fisiológicas, da rizosfera imediatamente adjacente ao sistema radicular e de características de solo que determinam o fluxo de nutrientes para a interface solo-raiz (Gerloff & Gabelman, 1983).

Os modelos mecanísticos são úteis para investigar o efeito de vários fatores de solo e de planta no fluxo de nutrientes para o interior das raízes das plantas. Eles permitem avaliar a importância de cada um ou do conjunto de parâmetros e fatores de planta e/ou de solo na absorção dos nutrientes e, por conseguinte, no efeito do manejo do solo e da adubação através da medição dos parâmetros afetados por essas práticas.

A validação do modelo de Barber & Cushman (1981) tem sido feita com experimentos usando ampla variação das condições (nutriente, espécie de planta, tipo de solo e condições ambientais). A relação entre a absorção predita e a observada resultou em coeficientes de correlação (r) entre 0,89 e 0,99 e coeficientes angulares (b = declividade da reta) entre 0,79 e 1,19 (Barber, 1995), o que demonstra solidez e consistência em sua concepção.

A inclusão da contribuição dos pêlos radiculares no modelo contribuiu significativamente para a predição da absorção de fósforo pelo aumento da correlação entre a absorção predita e observada de fósforo para espécies de plantas com diferentes configurações do sistema radicular (Itoh & Barber, 1983). Em solos com baixo conteúdo de fósforo, os pêlos radiculares exercem um papel importante na absorção de fósforo, pois contribuíram com até 90% do conteúdo de fósforo em sete espécies (Föhse et al., 1991).

A elevada eficiência dos pêlos radiculares na absorção de fósforo é atribuída ao seu pequeno raio e seu crescimento perpendicular em relação ao eixo radicular (Föhse et al., 1991). Os pêlos aumentam a zona de depleção de fósforo ao redor das raízes. Todavia, a competição entre raízes e longos períodos de absorção tendem a reduzir a importância dos pêlos radiculares na absorção de nutrientes (Nye & Tinker, 1977). Pêlos radiculares pouco contribuem para absorção de fósforo quando a depleção $((2D_{et})^{1/2})$ é relativamente grande em relação ao seu comprimento, ou seja, quando a distância difundida de fósforo no solo for maior do que a zona de depleção ao redor de raízes e pêlos (Barber, 1995).

Assim, espera-se pouca contribuição dos pêlos radiculares para a absorção de fósforo em solos bem supridos com esse nutriente e em condições de umidade adequada, como também verificado em Barber (1995) em experimentos para a validação do modelo de Barber & Cushman (1981).

2.8. Problematização

Os solos cultivados no sistema plantio direto apresentam acúmulo de fósforo a partir da sua superfície, decorrentes da aplicação dos adubos na camada superficial, do não revolvimento e da deposição dos resíduos das

culturas na superfície do mesmo, sendo que com o tempo de cultivo evolui no perfil do solo. A magnitude desse processo depende de fatores como tipo de solo e sistema de preparo.

O aumento na disponibilidade do fósforo, no sistema plantio direto, tem sido verificado em análises de rotina para avaliar a sua disponibilidade, Mehlich e resina de troca aniônica, e nos estudos de fracionamento do fósforo no solo (Sá 1999; 2004; Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Tokura et al., 2002; Rheinheimer et al., 2003; Schlindwein, 2003). Entretanto, estudos com enfoque nos processos e nos mecanismos que determinam o suprimento desse nutriente às raízes das plantas são escassos na literatura.

Com o avanço das pesquisas e com a observação dos resultados obtidos em lavouras, sabe-se que no sistema plantio direto ocorrem mudanças nos fatores de solo (químicos, físicos e biológicos) e de planta que afetam a liberação, o suprimento e a absorção de fósforo. Diante disso, fica evidente a necessidade de estudos que contemplem o assunto, inclusive com a quantificação dos fatores de influência, especialmente as alterações verificadas em relação ao preparo convencional.

No sistema plantio direto, pela aplicação dos adubos fosfatados na camada superficial e pelo não revolvimento do solo, que resultam na diminuição das reações de insolubilização do fósforo, espera-se que ocorra um aumento na sua concentração na solução do solo (C_i), em relação ao preparo convencional. A manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo diminui a perda de água por evaporação que, aliada ao aumento no teor de matéria orgânica, podem resultar em maior umidade volumétrica (θ) que resultaria, também, em um maior valor para o fator de impedância (f). Como resultado haveria um maior suprimento de fósforo (dq/dt) à superfície das raízes e, por conseguinte, maior desenvolvimento radicular (A) das plantas. Assim, as plantas cultivadas no sistema plantio direto apresentariam maior absorção de fósforo em relação às cultivadas em preparo convencional.

Deve-se levar em consideração ainda que o fluxo do fósforo no sistema solo-planta é, também, determinado pelo tipo de solo, uma vez que, diferentes solos apresentam diferenças na textura, na estrutura, na interação íon-colóide, no conteúdo de água volumétrica e no fator de impedância e, conseqüentemente, na liberação, no suprimento e na absorção de fósforo.

Pelo exposto, fica evidente a necessidade de um melhor entendimento dos mecanismos e processos que integram o fluxo do fósforo no sistema solo-planta (liberação, suprimento e absorção) e do efeito das mudanças em fatores bióticos e abióticos neste processo.

3. CAPÍTULO II

ESTUDO 1 - SUPRIMENTO E ABSORÇÃO DE FÓSFORO PELA SOJA EM SOLOS SUBMETIDOS A DIFERENTES SISTEMAS DE PREPARO

3.1. Introdução

A magnitude da absorção do fósforo pelas plantas é determinada pelos mecanismos que integram o fluxo de fósforo no sistema solo-planta que, por sua vez, são afetados por fatores de solo, de planta e de ambiente.

O fluxo de fósforo no sistema solo-planta inicia na fase sólida, com sua liberação para a solução. A concentração na solução depende da quantidade desse nutriente na fase sólida em rápido equilíbrio (P-lábil) com o fósforo da solução. A sua absorção pelas plantas é determinada por seu suprimento às raízes (dq/dt – Equação 1) que, devido à sua baixa concentração na solução e sua relativa imobilidade, passa a ser altamente dependente do mecanismo da difusão, do crescimento e das características das raízes (área superficial) da planta e do ambiente circundante dessas raízes.

Com a absorção do fósforo pelas raízes das plantas, ocorre uma diminuição da sua concentração junto às raízes e os íons se difundem até a superfície radicular em decorrência de gradiente de concentração (dc/dx – Equação 2); uma vez absorvido, no interior da raiz, é redistribuído (translocado) em seus órgãos, sendo utilizado para o desenvolvimento e o rendimento vegetal.

A busca por uma maior eficiência da adubação fosfatada passa, então, obrigatoriamente pelo mecanismo de difusão, que regula o seu suprimento às raízes (dq/dt), e pelos fatores relacionados, físicos e químicos do solo, da planta e do ambiente, especialmente aqueles afetados pelos sistemas de preparo do solo.

Os atributos físicos do solo afetam a magnitude do sistema radicular (A) e o coeficiente de difusão do fósforo no solo (D_e - Equação 3), por meio do conteúdo volumétrico de água (θ) e do fator de impedância (f - Equações 4 e 5). Os atributos químicos, além da magnitude do sistema radicular afetam a disponibilidade do fósforo e assim, a concentração do fósforo na solução (C_i), o poder tampão (b) e o coeficiente de difusão (D_e). Mudanças nesses fatores afetam o suprimento do fósforo às raízes das plantas, ficando evidente a influência do sistema de preparo do solo neste processo.

Assim, espera-se que no sistema plantio direto, ocorra, em relação ao preparo convencional do solo, um aumento da concentração de fósforo na solução, especialmente na camada superficial do solo (0-10 cm), pela adubação localizada e pelo não revolvimento do solo, que resultam em menor quantidade de sítios de adsorção de fósforo, e pela maior umidade, proporcionada pela manutenção dos resíduos vegetais na superfície do solo. O maior conteúdo volumétrico de água (θ) resulta, também, em um maior valor para o fator de impedância. Como resultado, haverá um maior suprimento de fósforo à superfície das raízes e, conseqüentemente, um maior desenvolvimento radicular e uma maior absorção de fósforo pelas raízes das plantas, especialmente na camada superficial do solo, com maior densidade de raízes. Sendo assim, as plantas cultivadas no sistema plantio direto devem apresentar maior eficiência de absorção de fósforo em relação às cultivadas em preparo convencional.

Este estudo teve por objetivos verificar o efeito de sistemas de preparo em solos com diferentes características difusivas (a) nos seus atributos físicos e químicos, e (b) nos parâmetros de solo e de planta que atuam no suprimento e na absorção de fósforo e no crescimento da soja.

3.2. Material e métodos

Para atingir os objetivos propostos, foram selecionados experimentos cultivados por vários anos em diferentes tipos de solos e sistemas de preparo (plantio direto e preparo convencional) e que, em cada experimento, as quantidades de fósforo adicionadas por meio das adubações fossem as mesmas nos dois sistemas.

As áreas desses experimentos, conduzidos por diferentes instituições de pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, foram disponibilizadas para a coleta de amostras de solo utilizadas no trabalho. As características principais das áreas experimentais estão na Tabela 1.

TABELA 1. Caracterização da camada de solo (0-20 cm) dos experimentos utilizados no presente estudo

Característica	Experimento			
	MPSA ⁽¹⁾	SCAR ⁽²⁾	DSPS ⁽³⁾	PMCR ⁽⁴⁾
Instituição	UFRGS	IRGA	EMBRAPA	COTRISA
Local	Eldorado do Sul	Cachoeirinha	Passo Fundo	Santo Ângelo
Início	1988	1994	1983	1979
Classes de solo ⁽⁵⁾	Argissolo	Gleissolo	Latossolo	Latossolo
	Vermelho distrófico	Háplico TA distrófico	Vermelho distrófico	Vermelho distróférico
Unidades de mapeamento ⁽⁶⁾	São Jerônimo	Colégio	Passo Fundo	Santo Ângelo
Argila, g kg ⁻¹	220	320	530	680
Fe _d , g kg ⁻¹ ⁽⁷⁾	25	13	39	172
Carbono, g kg ⁻¹ ⁽⁸⁾	12	11	16	21

⁽¹⁾ Métodos de preparo de solo e modos de aplicação de adubo; ⁽²⁾ Sistemas de cultivo de arroz irrigado; ⁽³⁾ Diferentes sistemas de preparo do solo, rendimento da cevada e população de insetos subterrâneos; ⁽⁴⁾ Práticas mecânicas e culturais na recuperação de solos degradados pelo cultivo; ⁽⁵⁾ Embrapa (1999); ⁽⁶⁾ Brasil (1973); ⁽⁷⁾ Ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato de sódio; ⁽⁸⁾ Determinado por digestão úmida.

Assim, foram utilizados quatro solos de diferente classificação taxonômica com variação na textura (teor de argila de 220 a 680 g kg⁻¹), no teor de óxidos de ferro (13 a 172 g kg⁻¹) e no teor de carbono (11 a 21 g kg⁻¹),

cultivados no sistema plantio direto e em preparo convencional por longo período (10 a 26 anos), descritos a seguir.

3.2.1. Descrição dos experimentos de campo

3.2.1.1. Métodos de preparo de solo e modos de aplicação de adubo (MPSA)

O experimento foi instalado em 1988, na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA/UFRGS), no município de Eldorado do Sul, região fisiográfica da Depressão Central, do Estado do Rio Grande do Sul. A temperatura média anual é de 19,2°C, com médias mensais variando entre 9 e 25°C. A precipitação média anual é de 1446 mm. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é o subtropical úmido (Cfa) (Bergamaschi et al., 2003). O local do experimento apresenta relevo ondulado a suave ondulado, em solo de textura franco-argilo-arenosa e de origem granítica.

Em maio de 1988, foram aplicados 3,4 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico (PRNT 100%) sobre a área, com pastagem nativa por 15 anos, para elevar o pH a 6,0, incorporando-o por meio de uma aração e duas gradagens e, em julho, aveia preta (*Avena strigosa*, S.) foi semeada. Em outubro, antes de estabelecer a cultura do milho (*Zea mays*, L.), foram aplicados, em faixas, os tratamentos de preparo convencional (uma aração até 17 cm de profundidade e duas gradagens), preparo em faixas e sem preparo (plantio direto) e os modos de adubação (a lanço, em faixa e em linha ou sulco) nas subparcelas. A área experimental foi cultivada por quatro anos com milho, no verão, e aveia preta, no inverno. As adubações de nitrogênio, de fósforo e de potássio para o milho e de nitrogênio para a aveia preta foram efetuadas com base na análise do solo das parcelas de preparo convencional com incorporação do adubo no solo, conforme a Comissão de Fertilidade do Solo (Siqueira et al., 1987; CFS-RS/SC, 1995).

Em setembro de 1992, efetuou-se a primeira reaplicação de calcário dolomítico (3,7 Mg ha⁻¹, PRNT 100%), tendo sido as parcelas revolvidas, para

incorporar o calcário, ou não, em cada metade da parcela. O experimento foi, então, conduzido, por mais quatro anos, com revolvimento do solo somente no tratamento com preparo convencional contínuo. Em outubro de 1996, realizou-se a segunda reaplicação de calcário dolomítico ($2,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, PRNT 100%), em outubro de 2000, a terceira ($4,1 \text{ Mg ha}^{-1}$, PRNT 100%), e, em outubro de 2004, a quarta ($1,7 \text{ Mg ha}^{-1}$, PRNT 100%), seguindo os mesmos procedimentos adotados nas reaplicações anteriores. Os tratamentos estavam distribuídos de forma casualizada em três blocos, com os tratamentos de preparo de solo nas parcelas principais e os modos de adubação nas subparcelas.

A partir de 1997, foi introduzida a ervilhaca comum (*Vicia sativa*) à aveia preta, formando uma mistura forrageira. No verão, continuou o cultivo de milho sempre, com espaçamento dentro da linha de 0,2 m e entre as linhas de 1,0 m. A semeadura era feita com matraca, e a população, após desbaste, de 50.000 plantas ha^{-1} . Após a colheita para a avaliação do rendimento de grãos (16 m^2 por parcela), as plantas de milho eram manejadas com rolo faca para o cultivo de aveia preta + ervilhaca comum, semeadas em espaçamento entrelinhas de 17 cm e sulco para semeadura de aproximadamente 2 cm de profundidade.

Para o trabalho, foram coletadas amostras de solo das unidades experimentais com sistema plantio direto, e adubação a lanço na superfície, e com preparo convencional, e adubação a lanço previamente ao preparo (com incorporação), durante 17 anos.

3.2.1.2. Sistemas de cultivo de arroz irrigado (SCAR)

O experimento foi instalado na primavera de 1994, na Estação Experimental do Arroz do Instituto Rio Grandense do Arroz (EEA/IRGA), no município de Cachoeirinha, região fisiográfica da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul. A temperatura média anual é de 20°C , com médias anuais de mínima e de máxima de 14 e 26°C , respectivamente. A precipitação média anual é de 1394 mm (Fepagro, 2003). O clima predominante, segundo a classificação de Köppen, é o subtropical úmido (Cfa). O local do experimento

apresenta relevo plano e área sistematizada, em solo de textura franco argilosa e origem de sedimentos aluviais.

Os tratamentos são constituídos por três sistemas de cultivo de arroz (*Oriza sativa*, L.) irrigado por alagamento: cultivo convencional, pré-germinado e plantio direto. O preparo do solo no sistema convencional é de três gradagens: uma gradagem aradora e duas gradagens niveladoras, efetuadas em torno de 30 dias antes da semeadura. No sistema pré-germinado utilizam-se as mesmas operações do preparo convencional, sendo que, de 1994 a 2003, foi feito preparo no seco e acabamento com água e, de 2003 a 2005, preparo no seco com entrada d'água quatro dias antes da semeadura. Durante o período de inverno, a área experimental é mantida com azevém (*Lolium multiflorum*, L.), o qual é dessecado com glifosato antes da semeadura do arroz. Os sistemas de cultivo estão dispostos a campo em blocos ao acaso, com três repetições.

A semeadura é feita no início de novembro, sendo, no preparo convencional e no plantio direto, em linhas espaçadas entre si com 17,5 cm e, no pré-germinado, a lanço. Os cultivares utilizados no experimento foram BR-IRGA 410, de 1994/2000, IRGA 422CL, de 2001/2004 e IRGA 417, em 2004/2005.

As adubações de nitrogênio, de fósforo e de potássio usadas a partir da instalação do experimento seguiram a recomendação técnica específica da cultura do arroz irrigado sendo efetuadas em cada cultivo com base na análise do solo.

Para o trabalho, foram coletadas amostras das unidades experimentais com sistema plantio direto e preparo convencional durante 10 anos, com cultivo de azevém, no inverno, e arroz irrigado, no verão.

3.2.1.3. Diferentes sistemas de preparo do solo, rendimento da cevada e população de insetos subterrâneos (DSPS)

O experimento foi instalado em 1983, na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA - Trigo), no município de Passo Fundo, região fisiográfica do Planalto Médio do Estado do Rio Grande do Sul. A

temperatura média anual é de 17,5°C, com temperatura média do mês mais frio (julho) de 12,7°C e a do mês mais quente (janeiro) de 22,1°C. A precipitação média anual é de 1788 mm. O clima predominante, segundo a classificação de Köppen, é o subtropical úmido (Cfa) (Embrapa, 2006). O local do experimento apresenta relevo ondulado, em solo de textura argilosa e substrato basalto.

O experimento apresenta três tratamentos envolvendo métodos de preparo do solo: convencional (uma aração e duas gradagens antecedendo a implantação das culturas), cultivo mínimo (escarificação e uma gradagem) e sistema plantio direto (semeadura sem preparo do solo); e uma seqüência de culturas alternadas no tempo, envolvendo ervilhaca, milho, aveia preta, soja (*Glycine max*, L.), cevada (*Hordeum vulgare*, L.) e sorgo (*Sorghum bicolor*, L.).

Foi aplicado calcário dolomítico na implantação do experimento e, em junho de 1989, reaplicado na dose recomendada para elevar o pH até 6,0, com incorporação ao solo em todas as parcelas, inclusive no sistema plantio direto. Em todos os cultivos usaram-se fertilizantes (N, P e K) observando-se as análises do solo e as recomendações técnicas (Siqueira et al., 1987; CFS-RS/SC, 1995), sendo aplicados, em média, 17,5 kg ha⁻¹ de fósforo (Selles et al., 1997).

Para o trabalho, as amostras de solo foram coletadas nos tratamentos sistema plantio direto e preparo convencional, nas parcelas onde haviam sido cultivadas, a partir da reaplicação do calcário, ervilhaca (1990), milho (1990/91), aveia preta (1991), soja (1991/92), cevada (1992), soja (1992/93), ervilhaca (1993), milho (1993/94), aveia preta (1994), soja (1994/95), cevada (1995), soja (1995/96), ervilhaca (1996), sorgo (1996/97), aveia preta (1997), soja (1997/98), cevada (1998), soja (1998/99), ervilhaca (1999), sorgo (1999/00), aveia preta (2000), soja (2000/01), cevada (2001), soja (2001/02), ervilhaca (2002), sorgo (2002/03), aveia preta (2003), soja (2003/04), cevada (2004) e soja (2004/05).

3.2.1.4. Práticas mecânicas e culturais na recuperação de solos degradados pelo cultivo (PMCR)

O experimento foi instalado em 1979, no Centro de Atividades Agrícolas e Florestais da Cooperativa Triticola de Santo Ângelo (COTRISA), no município de Santo Ângelo, região fisiográfica das Missões do Estado do Rio Grande do Sul. A temperatura média anual é de 21,2°C, com temperatura média do mês mais frio (julho) de 8,8°C e a do mês mais quente (janeiro) de 32,5°C. A precipitação média anual é de 1713 mm (Ipagro, 1989). O clima predominante, segundo a classificação de Köppen, é o subtropical úmido (Cfa). O local do experimento apresenta relevo suave ondulado a ondulado, em solo de textura muito argilosa e substrato basalto. A área do experimento tinha sido anteriormente cultivada com a sucessão trigo (*Triticum aestivum*, L.)/soja por 15 anos em preparo convencional e apresentava avançado processo de degradação física.

Inicialmente, o experimento apresentava quatro métodos de preparo do solo: convencional, com arado de discos e duas gradagens, convencional, com arado pé-de-pato e uma gradagem, cultivo mínimo, com escarificador e sistema plantio direto, em cultivo contínuo com trigo e soja. Apresentava, também, sete rotações de culturas no sistema plantio direto. Todos esses tratamentos eram conduzidos com e sem a descompactação mecânica do solo (Dalla Rosa, 1981; Merten, 1988).

No decorrer dos anos, o experimento foi reformulado. Em 1985, foi eliminado o tratamento de compactação e o de preparo do solo com arado pé-de-pato e foi introduzida a cultura do milho e os tratamentos com nitrogênio. Assim, as parcelas principais passaram a apresentar três métodos de preparo de solo, sistema plantio direto (semeadura sem preparo do solo), sistema de cultivo convencional (uma aração e duas gradagens) e sistema de cultivo mínimo (uma escarificação seguida por gradagem leve). As subparcelas eram constituídas de duas sucessões: trigo/soja e aveia/milho, e as subsubparcelas, duas doses de nitrogênio (0 e 120 kg ha⁻¹), aplicadas no trigo e no milho. No sistema plantio direto tem-se, adicionalmente, três rotações de culturas e três leguminosas que precedem a cultura do milho. A partir de 1999, todas as parcelas passaram a integrar um sistema de rotação onde foram cultivados

trigo/soja, trigo/milho, aveia/soja, nabo (*Rhaphanus raphanistrum*)/milho, trigo/soja, e nabo/soja, respectivamente para os anos de 1999 a 2004.

Na implantação do experimento (1979), foi adicionado calcário, na dose de 4,7 Mg ha⁻¹, com reaplicação de 2 Mg ha⁻¹ de calcário + 1 Mg ha⁻¹ de gesso agrícola em 1985 e, em 1992, 4 Mg ha⁻¹, para elevar o pH até 6,0 (método SMP). A adubação usada a partir da instalação do experimento seguiu as recomendações técnicas para as culturas comerciais (Siqueira et al., 1987; CFS-RS/SC, 1995), sendo aplicados, na linha de semeadura à, aproximadamente, 5 cm de profundidade, 22, 26 e 22 kg ha⁻¹ de fósforo em cada cultivo de soja, de milho e de trigo, respectivamente (Rheinheimer, 2000).

Para o trabalho, foram coletadas amostras de solo das unidades experimentais com a adição de nitrogênio no sistema plantio direto e preparo convencional, com diferentes sucessões culturais, trigo/soja e aveia/milho, entre as safras de 1986/87 e 1998/99. A sucessão trigo/soja foi cultivada de 1979 até a safra de 1999. Já, na sucessão aveia/milho cultivou-se trigo/soja de 1979 até a safra de 1985/86 e aveia/milho de 1986 até 1999. Para os anos subseqüentes (1999/05), independentemente da sucessão anterior (trigo/soja ou aveia/milho), foram cultivados trigo/soja (1999/00), trigo/milho (2000/01), aveia/soja (2001/02), nabo/milho (2002/03), trigo/soja (2003/04) e nabo/soja (2004/05).

Portanto, ressalta-se que foram coletadas amostras de solo em ambos os sistemas de preparo, em áreas com diferentes sucessões de culturas entre as safras de 1986/87 e 1998/99, sendo cultivado em uma área a sucessão trigo/soja e na outra a sucessão aveia/milho. Para os demais anos, foram cultivadas as mesmas culturas em ambas as áreas. Assim, para diferenciar os diferentes sistemas de cultivos, o solo proveniente da sucessão trigo-soja será chamado de Latossolo Vermelho distroférico 1 e o solo da proveniente da sucessão aveia-milho de Latossolo Vermelho distroférico 2.

3.2.2. Coleta das amostras de solo

A amostragem de solo, nas diferentes áreas experimentais, para sua caracterização química e física foi feita em fevereiro e março de 2005, nas

profundidades de 0-10 e 10-20 cm. Foram coletadas amostras indeformadas, para a determinação da estabilidade de agregados, em anéis volumétricos, para a determinação da densidade e porosidade do solo, amostras indeformadas de solo em colunas de PVC com tamanho de 5 x 10 cm, para a determinação do fósforo na solução do solo, e amostras de solo, para as determinações químicas.

Foram também coletadas, em cada experimento, juntamente e ao lado das amostras antes descritas, doze amostras indeformadas de solo em colunas de PVC (9,6 x 20 cm), seis no sistema plantio direto e seis no preparo convencional, totalizando sessenta colunas, as quais foram utilizadas para o cultivo de soja em câmara de crescimento e para estimar a capacidade de retenção de água pelo solo (capacidade de campo) e a perda de água por evaporação.

3.2.3. Experimento em câmara de crescimento

O experimento foi realizado em colunas de PVC (9,6 x 20 cm), contendo amostras indeformadas de solo, em condições em câmara de crescimento do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

3.2.3.1. Tratamentos

O experimento constou de dez tratamentos, sendo eles resultantes da combinação de quatro solos, um com duas sucessões de culturas, originando cinco, incluindo solos e sistemas de cultura, e dois sistemas de preparo, plantio direto e preparo convencional, com três repetições (5 tratamentos envolvendo solo x 2 sistemas de preparo = 10 tratamentos x 3 repetições = 30 colunas de solo).

3.2.3.2. Cultivo

Soja foi cultivada na câmara de crescimento, utilizando-se um comprimento de dia de 14 horas e uma temperatura diurna de 26° C e noturna de 20° C. A umidade do ar permaneceu em torno de 80% à noite, decrescendo para 75% durante o dia.

As sementes foram germinadas em papel toalha, colocado em forma de cartucho em vaso contendo água destilada. Após oito dias, as plantas foram selecionadas quanto à uniformidade, as raízes uniformizadas quanto ao tamanho e transferidas três plantas para cada coluna com solo. O suprimento mineral aos solos, nas colunas, foi de 60 mg de K kg⁻¹, na forma de cloreto de potássio, e de 100 mg de N kg⁻¹, na forma de uréia, ambos aplicados em solução em três aplicações, uma em cada semana de desenvolvimento das plantas.

As colunas de solo foram mantidas em capacidade de campo durante o cultivo, com reposição d'água por pesagem. Das 60 colunas coletadas, 30 foram utilizadas para o cultivo de soja e 30 como colunas testemunhas, sem planta, três para cada tratamento, as quais foram utilizadas no cálculo do consumo de água por evaporação.

O experimento foi concluído 20 dias após o transplante das plântulas para as colunas com solo. Foram efetuadas as determinações de solo e planta necessárias para atender os objetivos do trabalho, conforme descrito a seguir.

3.2.4. Análises e determinações

3.2.4.1. No solo

a) Atributos físicos

Os atributos avaliados nas amostras indeformadas e nos anéis volumétricos foram: estabilidade de agregados, conforme método descrito por Tisdall et al. (1978) adaptado por Carpenedo & Mielniczuk (1990); densidade de solo, segundo Blake & Hartge (1986); porosidade total, pelo método descrito

por Danielson & Sutherland (1986); microporosidade, correspondente à umidade retida na tensão 6 kPa; e macroporosidade por diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

b) Atributos químicos

Os atributos avaliados nas amostras de solo coletadas nos experimentos foram: potássio, cálcio, magnésio e alumínio trocáveis e pH em água, conforme descrito em Tedesco et al. (1995); fósforo na solução do solo, com extração da solução do solo, das colunas indeformadas (5 x 10 cm) coletadas no campo, efetuada pelo método de centrifugação, com aparato modificado por Nolla (2003) e determinado colorimetricamente, usando o método Murphy & Riley (1962); fósforo extraível do solo, pelo método da resina de troca aniônica em membranas, segundo Bissani et al. (2002), e pelo método Mehlich-1, segundo Tedesco et al. (1995); e carbono orgânico total, por digestão úmida com posterior titulação, de acordo com o método de Walkley & Black, descrito em Tedesco et al. (1995).

c) Parâmetros de suprimento de fósforo no solo

Foram determinados os parâmetros de suprimento de fósforo no solo até as raízes constantes das Equações 1 e 2 (item 2.3.). O poder tampão de fósforo no solo (b) foi calculado pela Equação 6 (item 2.3.): $b = C_s / C_{ii}$, em que, C_{ii} é a concentração inicial de fósforo na solução do solo e C_s o fósforo extraído por resina (lábil).

O coeficiente de difusão efetiva (D_e), foi obtido pela equação de Nye & Tinker (1977) (Equação 3, item 2.3.): $D_e = D_1 \theta f / b$, em que, D_1 é o coeficiente de difusão do fósforo em solução (água) pura a 25°C, esse valor é igual a $8,9 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Parsons, 1959; Schenk & Barber, 1980); θ é o conteúdo volumétrico de água do solo na capacidade de campo, em $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; f é o fator de impedância, calculado pelas equações de Barraclough & Tinker (1981) (Equações 4 e 5, item 2.3.): $f = 1,58 \theta - 0,172$ (solos francos e arenosos) e $f = 0,99 \theta - 0,172$ (solos argilosos).

3.2.4.2. Nas plantas de soja

a) Parâmetros morfológicos

As plantas de soja foram cortadas rente ao solo 20 dias após o transplante. As raízes foram separadas do solo em duas camadas nas colunas, 0-10 e 10-20 cm. Após a separação das raízes mais grossas, que são facilmente visualizadas, foi retirada uma subamostra de solo para cada camada, pesada e guardada sob refrigeração para posterior separação das raízes finas. As raízes mais grossas foram lavadas em água e secas em papel toalha para retirar a água aderida. Depois de determinada a massa de matéria úmida, as raízes foram guardadas sob refrigeração, para posterior determinação do comprimento.

Para separar as raízes finas do solo, as subamostras de solo foram dispersas por solução de hexametáfosfato de sódio e agitação. Cada subamostra foi fracionada em quatro, sendo estas colocadas em potes, contendo solução de hexametáfosfato de sódio a 1%, numa relação de, aproximadamente, 1 para 3, e colocadas para agitar durante 3 horas em agitador horizontal. Após, foi feita peneiragem úmida, utilizando-se peneira com malha de 0,50 mm de abertura. As raízes finas foram, então, catadas com auxílio de lupa e pinça, para posterior determinação do comprimento. A massa de matéria úmida total das raízes finas na subamostra foi obtida por pesagem, e ajustada à massa total da amostra de solo, pela relação entre a massa de solo em que as raízes foram catadas e a massa de solo total da camada, pesadas no momento da coleta da amostra.

O volume de raízes foi calculado admitindo-se que as raízes úmidas têm densidade radicular igual a 1 g cm^{-3} (Halmark & Barber, 1981). O comprimento radicular foi determinado pelo método de Tennant (1975), e resultou da soma da contribuição das raízes grossas e finas. A taxa de crescimento, o raio médio, a meia distância entre raízes, a área superficial e a extensão de depleção do fósforo em torno das raízes foram calculados conforme descrito em Baligar & Barber (1979), em Halmark & Barber (1981) e em Barber (1995). A taxa de crescimento de raízes foi calculada por:

$$k = \ln (L_2 - L_1) / t_2 - t_1 \quad (7)$$

em que, L_1 e L_2 são o comprimento das raízes (cm) nos tempos t_1 e t_2 (s), respectivamente. O raio médio da raiz foi calculado pela seguinte equação:

$$r_0 = (V / \pi L)^{1/2} \quad (8)$$

em que, V é o volume das raízes (cm^3) e L o comprimento (cm). Esta equação pressupõe que a raiz tem a forma cilíndrica. A meia distância média entre raízes foi obtida por:

$$r_1 = 1 / (\pi L_v)^{1/2} \quad (9)$$

em que, L_v é o comprimento de raiz por unidade de volume de solo (cm cm^{-3}). A área superficial de raízes (cm^2) foi calculada por:

$$AS = 2 \pi r_0 L \quad (10)$$

em que, para r_0 e L ver Equação 8. A extensão de depleção do fósforo em torno das raízes (distância linear média percorrida - d) em um período de tempo (t) foi obtida por:

$$d = (2 D_e t)^{1/2} \quad (11)$$

em que, para D_e ver Equação 3, item 2.3.

b) Absorção de água e de fósforo e massa de matéria seca

O influxo de água na superfície da raiz (cm^3 de água por cm^2 de área superficial de raiz por segundo) foi calculado pela equação de Williams (1948):

$$v_0 = \{ \ln (AS_2 / AS_1) / (AS_2 - AS_1) \} \times (A_2 - A_1) / (t_2 - t_1) \quad (12)$$

em que, AS_1 e AS_2 são as áreas superficiais de raízes e A_1 e A_2 a água consumida até os tempos t_1 e t_2 , respectivamente. A água consumida (transpirada) foi obtida subtraindo-se a quantidade de água perdida por evaporação das colunas sem plantas, do total de água evapotranspirada das colunas com plantas.

Na parte aérea e nas raízes da soja, foram determinados a massa de matéria seca, após secagem em estufa com circulação de ar e a 65°C , por 72 horas, e o teor de fósforo no tecido por digestão úmida, segundo Tedesco et al. (1995). Para as raízes, foram pesadas as mesmas amostras utilizadas para a determinação da massa de matéria úmida, raízes grossas e finas.

3.2.5. Análise estatística

Foi realizada a análise da variância dos parâmetros de solo e de planta (morfológicos) para comparar os sistemas de preparo de solo, considerando-se o delineamento experimental de blocos ao acaso (experimentos no campo) para os parâmetros de solo e inteiramente casualizado para os parâmetros de planta (experimento na câmara de crescimento), utilizando-se o teste de Tukey ($P < 0,05$) para a comparação entre médias.

Nas análises dos parâmetros em que o valor na camada de 0-20 cm é igual ao da média das camadas de 0-10 e 10-20 cm (por exemplo: densidade, porosidade, carbono orgânico total e fósforo no solo) foi feita uma análise para as três camadas. Para os parâmetros em que o valor da camada de 0-20 cm resulta da soma das camadas de 0-10 e 10-20 cm, e não da média (por exemplo: crescimento de raiz, fósforo absorvido e matéria seca), foi feita uma análise para as camadas de 0-10 e 10-20 cm e outra análise separada para a camada de 0-20 cm.

3.3. Resultados e discussão

São apresentados, inicialmente, os resultados das análises dos atributos físicos e químicos dos solos das áreas experimentais nos dois sistemas de preparo. A seguir, é apresentada uma discussão sobre os efeitos do manejo do solo nos parâmetros e nos mecanismos que atuam nos processos de liberação e de suprimento de fósforo para as raízes das plantas e, ao final, são apresentados os respectivos reflexos na absorção de fósforo e no crescimento das plantas de soja cultivadas nessas condições (solos e preparos) em colunas indeformadas de solo em câmara de crescimento.

A interpretação dos dados foi direcionada para as comparações das mesmas camadas (0-10, 10-20 e 0-20 cm) entre sistemas de preparo. No caso em que houve interação preparo-camada ou somente efeito do preparo, os dados foram analisados na média dos solos; quando houve interação solo-preparo, os dados foram analisados somente para a camada de 0-20 cm; nas situações em que houve interação tripla (solo-preparo-camada), os dados foram analisados dentro de cada solo, porém também foram apresentados os valores médios das camadas para cada preparo; no caso de interação tripla, nos solos em que houve somente efeito de preparo as comparações foram dentro de cada solo somente para a camada de 0-20 cm.

3.3.1. Atributos físicos do solo

Os dois sistemas de preparo do solo não apresentaram, nas três camadas avaliadas, efeitos na densidade do solo (Figura 1) e na sua porosidade total (Figura 2) em parte e na média dos solos. Algumas diferenças nos valores de densidade entre as mesmas camadas ocorreram em dois solos, mas não foram consistentes com os sistemas de preparo. Assim, os valores desse atributo somente foram menores no sistema plantio direto, na camada de 0-10 cm, do Gleissolo Háplico TA distrófico, e foram maiores na camada de 10-20 cm, deste mesmo solo, na camada de 0-20 cm, do Latossolo Vermelho distroférico 1, e nas camadas de 10-20 e 0-20 cm, do Latossolo distroférico 2, em relação ao preparo convencional (Figura 1).

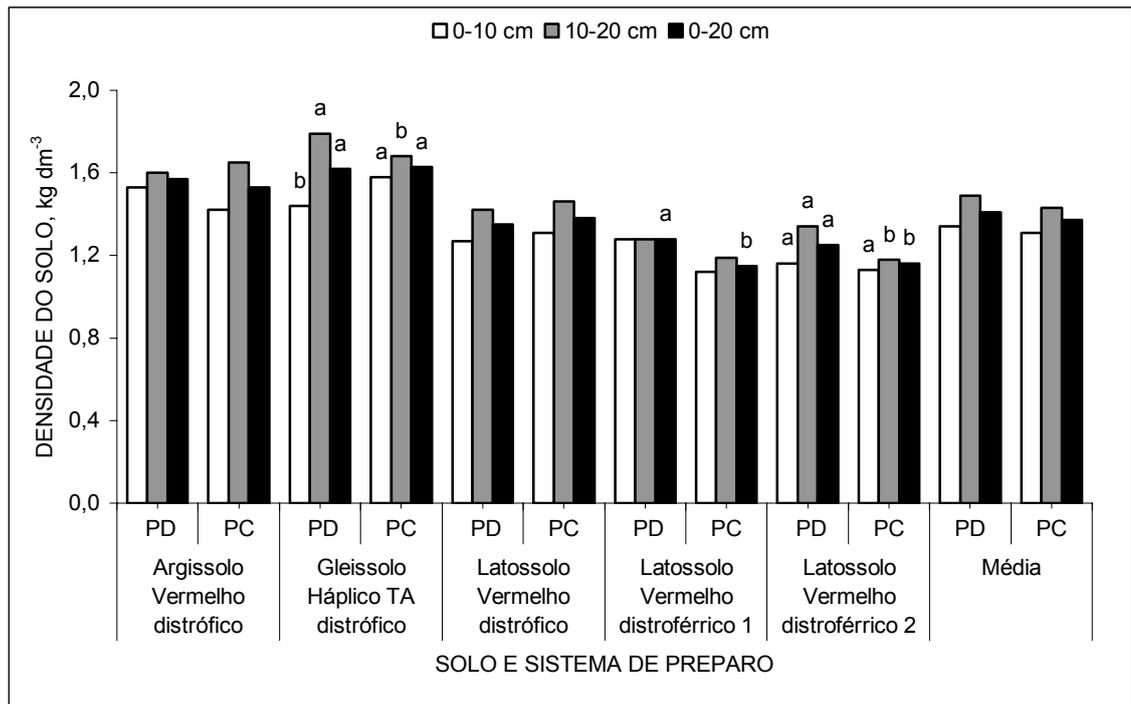


FIGURA 1. Densidade em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

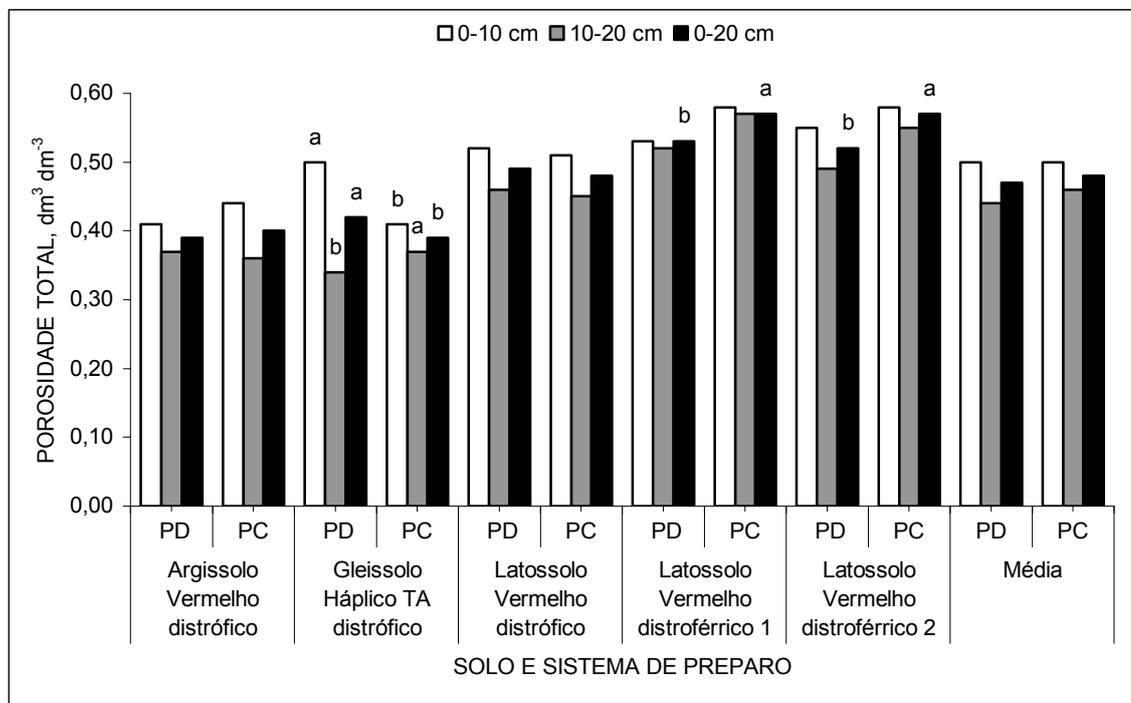


FIGURA 2. Porosidade total em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

Como esperado, os valores de porosidade total foram menores nos tratamentos que apresentaram maior densidade do solo, havendo também inconsistências entre camadas, solos e sistemas (Figura 2). Assim, no Gleissolo Háptico TA distrófico, a porosidade total foi maior nas camadas de 0-10 e 0-20 cm e menor na de 10-20 cm no sistema plantio direto. Já, nos Latossolos Vermelhos distroféricos 1 e 2, a porosidade total foi maior na camada 0-20 cm, no preparo convencional.

O comportamento da macroporosidade (Figura 3), de maneira geral, foi similar ao da porosidade total (Figura 2) e inverso ao da microporosidade (Figura 4). Ocorreu menor macroporosidade (Figura 3) e maior microporosidade (Figura 4) no Argissolo Vermelho distrófico e nos Latossolos Vermelhos distroféricos (1 e 2) (camada 0-20 cm), no sistema plantio direto em relação ao preparo convencional. Na média dos solos, a microporosidade apresentou interação preparo-camada ($P < 0,05$). Nesta situação, o sistema plantio direto, independentemente do solo, apresentou maior microporosidade nas camadas de 0-10 e 0-20 cm, em relação ao preparo convencional (Figura 4).

O efeito dos sistemas de preparo na qualidade estrutural do solo pode ser visualizado no índice de estabilidade de agregados (Figura 5). Considerando o método utilizado, quanto maior o valor da relação $DMPu/DMPs$ (mais próximo da unidade), maior é a estabilidade dos agregados do solo.

No sistema plantio direto verificou-se um maior índice de estabilidade de agregados na camada superficial (0-10 cm), independentemente do solo, em relação ao preparo convencional (Figura 5). Naquele sistema, a mobilização do solo é feita somente na linha de semeadura, enquanto que, no preparo convencional se faz revolvimento por meio de aração e gradagens; assim, além das forças disruptivas da ação mecânica, o solo revolvido fica exposto à desagregação pelo impacto das gotas da chuva que, somado à mineralização da matéria orgânica, diminui a estabilidade dos agregados. O revolvimento do solo favorece a ação dos microorganismos no rompimento das ligações entre agregados provocando a sua desestruturação.

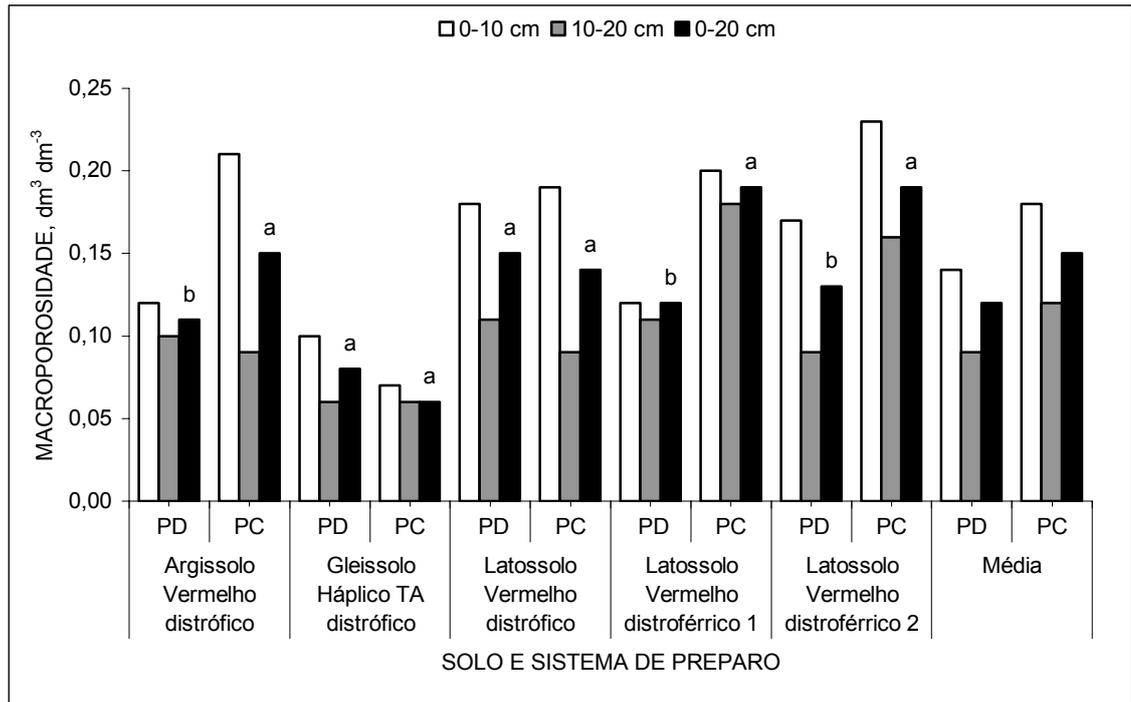


FIGURA 3. Macroporosidade em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

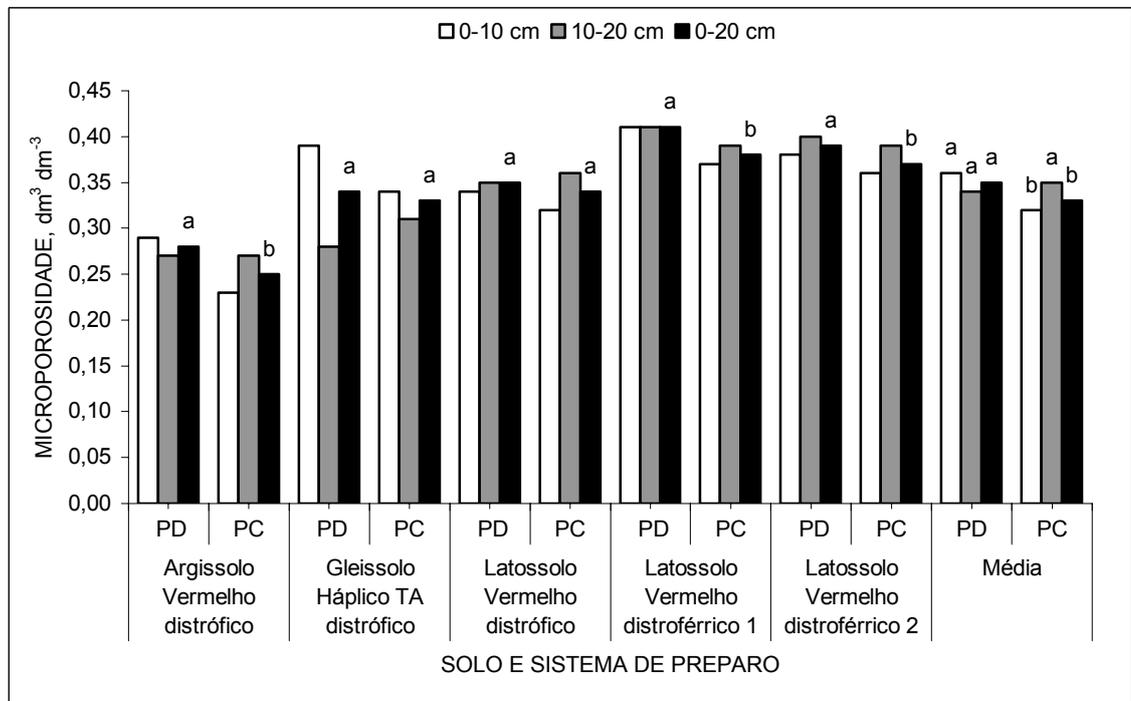


FIGURA 4. Microporosidade em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

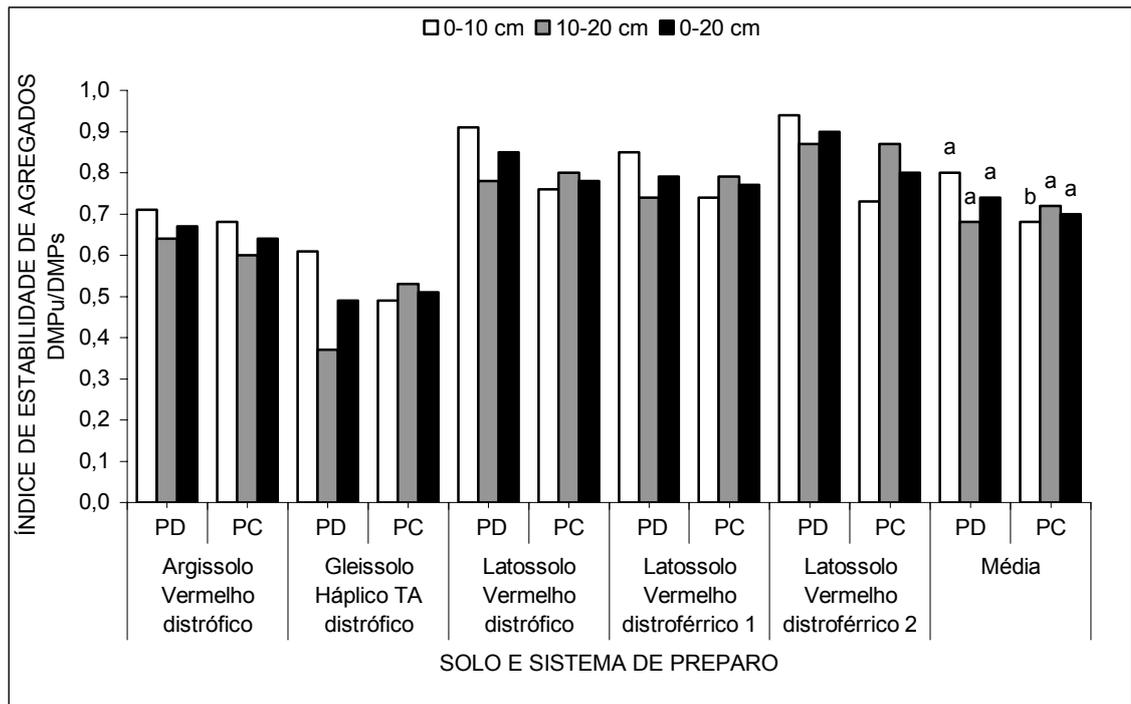


FIGURA 5. Índice de estabilidade de agregados em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

Deve-se salientar que os valores de macroporosidade para o Gleissolo Háplico TA distrófico foram baixos, principalmente, no preparo convencional, em que o solo é revolvido anualmente. Esses valores, menores que $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, podem restringir o crescimento radicular e o desenvolvimento das plantas por carência de oxigênio (Vomocil & Flocker, 1961; Grable & Siemer, 1968). Nesta situação, mudanças na magnitude do sistema radicular (A – Equação 1), resultariam em menor suprimento de fósforo às raízes das plantas (dq/dt) e, em consequência, em menor absorção do mesmo. Observa-se, também, que os baixos valores de macroporosidade se relacionam a valores mais baixos de índice de estabilidade dos agregados do Gleissolo Háplico TA distrófico (Figura 5), que se devem às suas características, inerentes ao cultivo de arroz irrigado por alagamento. Observa-se, porém, o efeito do sistema plantio direto na melhoria do estado de agregação na camada superficial (0-10 cm) deste solo (Figura 5), quando comparada à mesma camada do preparo convencional.

As poucas diferenças encontradas na densidade do solo (Figura 1) e, conseqüentemente, na porosidade total (Figura 2) se devem ao efeito dos sistemas de preparo do solo. O espaço poroso apresenta relação inversa à densidade, ou seja, quando a densidade do solo aumenta o espaço poroso diminui. A manutenção de uma boa porosidade, com boa relação entre macro e microporos, pode ter reflexos positivos no conteúdo volumétrico de água (θ) e no fator de impedância (f) do solo, aumentando o coeficiente de difusão de fósforo (D_e), e, também, na magnitude do sistema radicular das plantas (A). Tudo isso, se reflete em maior suprimento de fósforo (dq/dt) às raízes das plantas (Equação 1).

As diferenças encontradas entre os métodos de preparo de solo em alguns atributos físicos, podem não evidenciar, por si só, diferenças capazes de modificar o suprimento de fósforo às raízes ou o desenvolvimento das plantas. No entanto, a associação destes atributos pode resultar em diferentes condições estruturais, alterando os parâmetros de solo e de planta (Equações 1, 2 e 3), que assumem importância no suprimento e na absorção de fósforo e, em conseqüência, no crescimento das plantas.

3.3.2. Atributos químicos do solo

No sistema plantio direto, todos os solos apresentaram maior teor de carbono orgânico na camada de 0-10 cm, em relação ao preparo convencional, sendo que, no Argissolo Vermelho distrófico, esse teor independe da camada avaliada (Figura 6), o que caracteriza que o plantio direto já se encontra na fase consolidada.

Os solos menos reativos, Argissolo Vermelho distrófico e Gleissolo Háplico TA distrófico, apresentaram, no sistema plantio direto, maior teor de carbono, tanto na camada de 0-10 cm, como na de 0-20 cm, em relação ao preparo convencional, enquanto, nos mais argilosos esse aumento ocorreu somente na camada de 0-10 cm. Estes solos, em geral, apresentaram maior teor de carbono orgânico em relação àqueles (Figura 6). Comportamento semelhante foi verificado no índice de estabilidade de agregados (Figura 5) que também apresentou maiores valores nos solos mais argilosos. Os solos

arenosos apresentam maior resiliência, em relação aos argilosos, ou seja, os acúmulos e os declínios de carbono ocorrem com maior facilidade. Já, os solos mais argilosos apresentam maior quantidade de sítios de proteção ao carbono (teores de argila e óxido); assim, quando revolvidos apresentam menor taxa de decomposição do carbono, em relação aos arenosos. Isto, explica o comportamento diferenciado do teor de carbono para os solos com diferentes teores de argila.

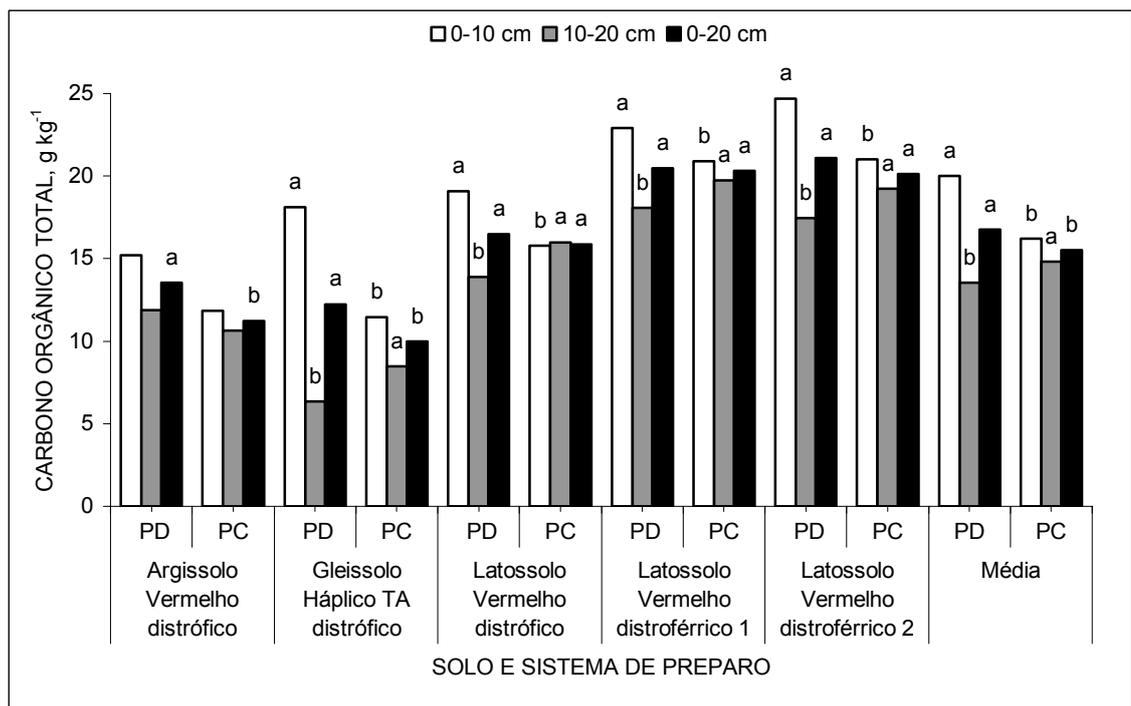


FIGURA 6. Carbono orgânico total em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

No sistema plantio direto, ocorre acúmulo de material vegetal na superfície do solo e menor decomposição desses resíduos e do carbono orgânico, devido ao não revolvimento do solo. Nesta situação, verifica-se a formação de gradiente no perfil do solo, ou seja, maior teor de carbono na camada superficial (Figura 6), caracterizando, assim, o sistema plantio direto e justificando o maior índice de estabilidade de agregados presente nessa mesma camada (Figura 5). No preparo convencional, ocorre uma maior homogeneidade no perfil, pelo revolvimento sistemático do solo.

O sistema plantio direto apresentou maior pH do solo em relação ao preparo convencional, não havendo interações envolvendo as variáveis solo,

preparo e camada (Figura 7). Na média dos solos, o pH, no sistema plantio direto, foi de 5,5 e 5,4, respectivamente para as camadas de 0-10 e 0-20 cm e, no preparo convencional, de 5,2, tanto na camada de 0-10 cm, como na de 0-20 cm. Nesta situação, mais importante do que a diferença de pH entre os sistemas de preparo, é que, no preparo convencional o valor se encontra bastante abaixo do pH de referência (6,0), o qual indica ser necessária a correção da acidez do solo, enquanto no sistema plantio direto, os valores de pH (5,5 na camada 0-10 cm) se encontram no pH de referência (CQFS-RS/SC, 2004).

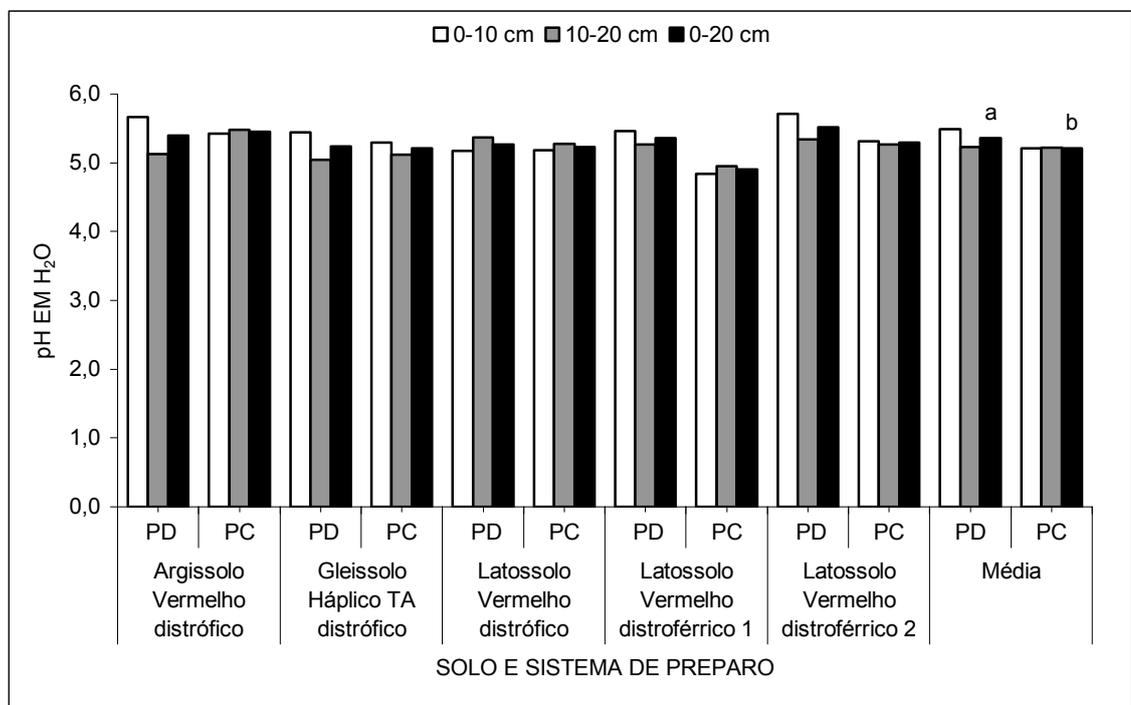


FIGURA 7. pH em H₂O em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

No sistema plantio direto, na média dos solos, os teores de cálcio e de magnésio trocáveis foram maiores nas camadas de 0-10 e 0-20 cm e não diferiram na camada de 10-20 cm, em relação às mesmas camadas do preparo convencional (Figuras 8 e 9). Na avaliação dentro de cada solo, houve diferença entre os sistemas de preparo, apenas no Latossolo Vermelho distroférico (1 e 2), com maior teor de cálcio e magnésio trocáveis no sistema plantio direto, em relação ao preparo convencional.

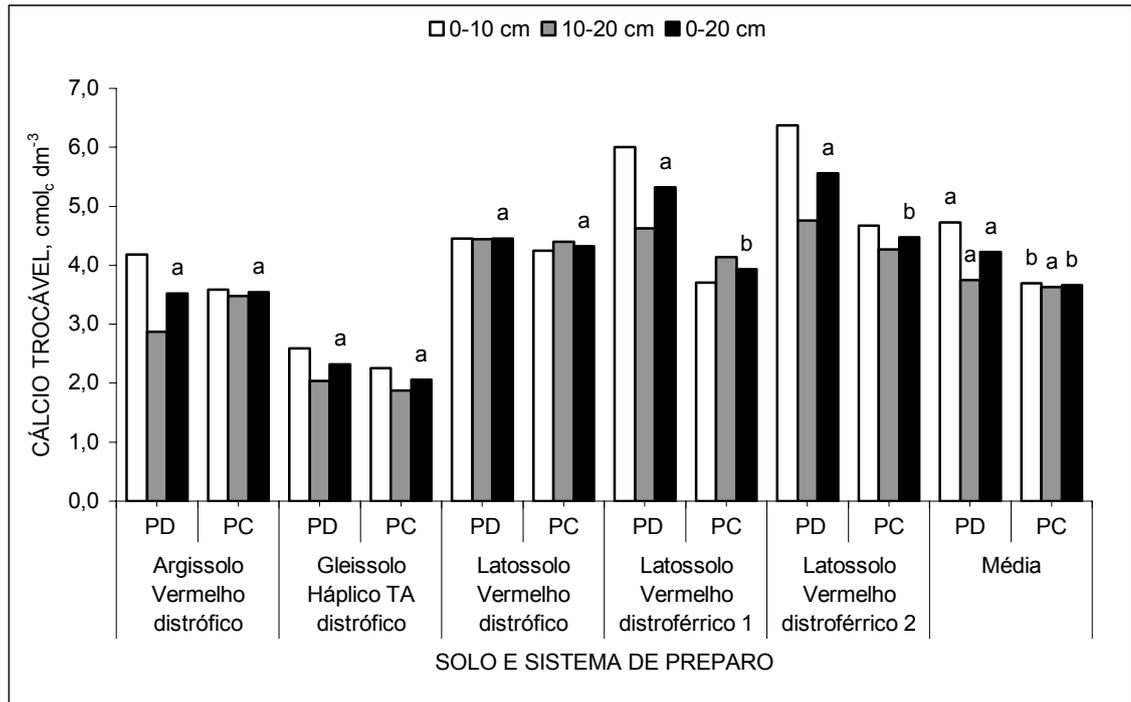


FIGURA 8. Cálcio trocável em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

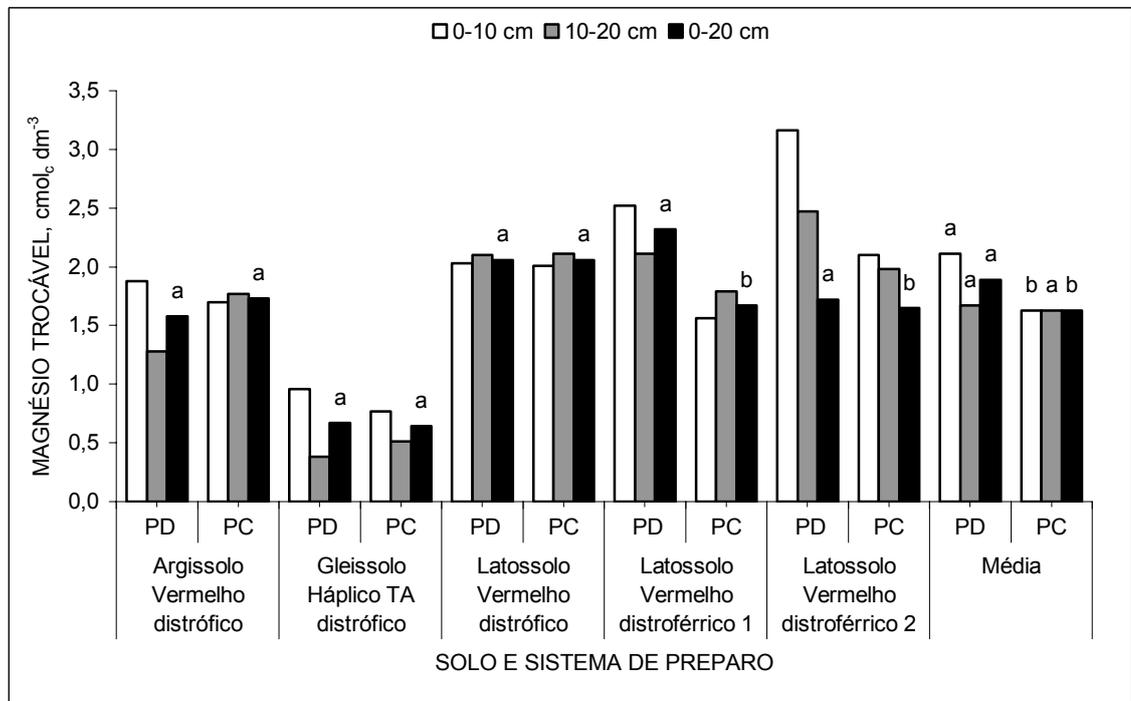


FIGURA 9. Magnésio trocável em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

As variações de pH e dos teores de cálcio e de magnésio trocáveis existentes entre os solos (Figuras 7, 8 e 9) eram esperadas, uma vez que, os mesmos apresentam, além das diferentes características intrínsecas de cada solo, manejos diferenciados (adubação, calagem, cultivos, etc.). Essas variações se refletiram, também, no teor de alumínio trocável (Apêndice 1), que teve comportamento, de maneira geral, inverso ao do pH, e na CTC efetiva do solo (Apêndice 2), que teve comportamento similar ao do cálcio e do magnésio trocáveis, responsáveis pela maior parte da CTC efetiva do solo.

Na interpretação dos teores de fósforo, extraível pelo método Mehlich-1 (Figura 10), verificou-se que, independentemente do sistema de preparo e do solo, os valores encontram-se na faixa Alto e Muito alto (camada de 0-10 cm no plantio direto e de 0-20 cm no preparo convencional), condição acima do teor de suficiência (nível crítico), em que não haveria limitações para o desenvolvimento das plantas (CQFS-RS/SC, 2004).

Os sistemas de preparo proporcionaram comportamento distinto entre o teor de fósforo dos solos mais arenosos e dos mais argilosos, extraído pelos métodos Mehlich-1 (Figura 10) e Resina (Figura 11). No Argissolo Vermelho distrófico e no Gleissolo Háptico TA distrófico não houve diferença entre os sistemas de preparo. Já, nos solos com textura argilosa e muito-argilosa (Latosolos), o teor de fósforo foi maior ou apresentou tendência ($P > 0,05$), a ser maior, no sistema plantio direto em relação ao preparo convencional (Figuras 10 e 11).

No sistema plantio direto, os teores de carbono orgânico são mais elevados (Figura 6), cujas substâncias húmicas, ou mesmo ácidos orgânicos de baixo peso molecular, podem auxiliar na diminuição dos sítios de adsorção e da energia de ligação fosfato-solo, principalmente nos solos argilosos por conterem teores elevados de óxidos de ferro e de alumínio, que insolubilizam o fósforo. Com o revolvimento do solo, no preparo convencional, ocorre aumento nos sítios de adsorção de fósforo, em relação ao sistema plantio direto, e, assim, maior diferença no teor de fósforo entre os sistemas de preparo desses solos, em relação aos mais arenosos.

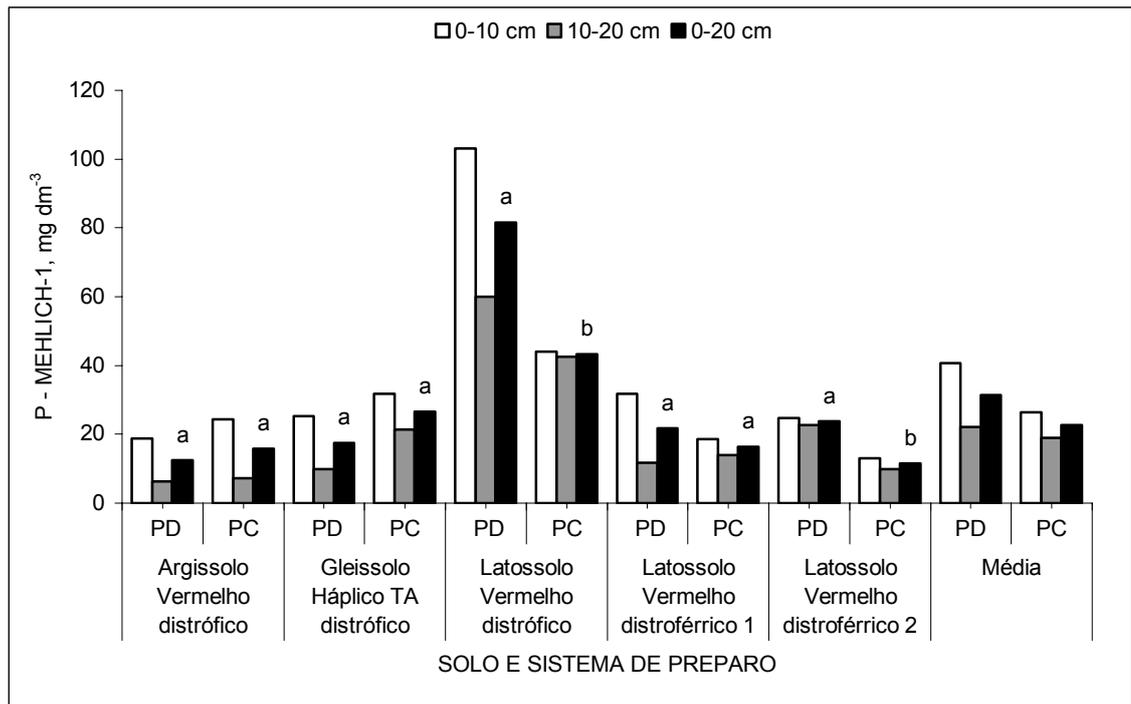


FIGURA 10. Fósforo extraível por Mehlich-1 em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

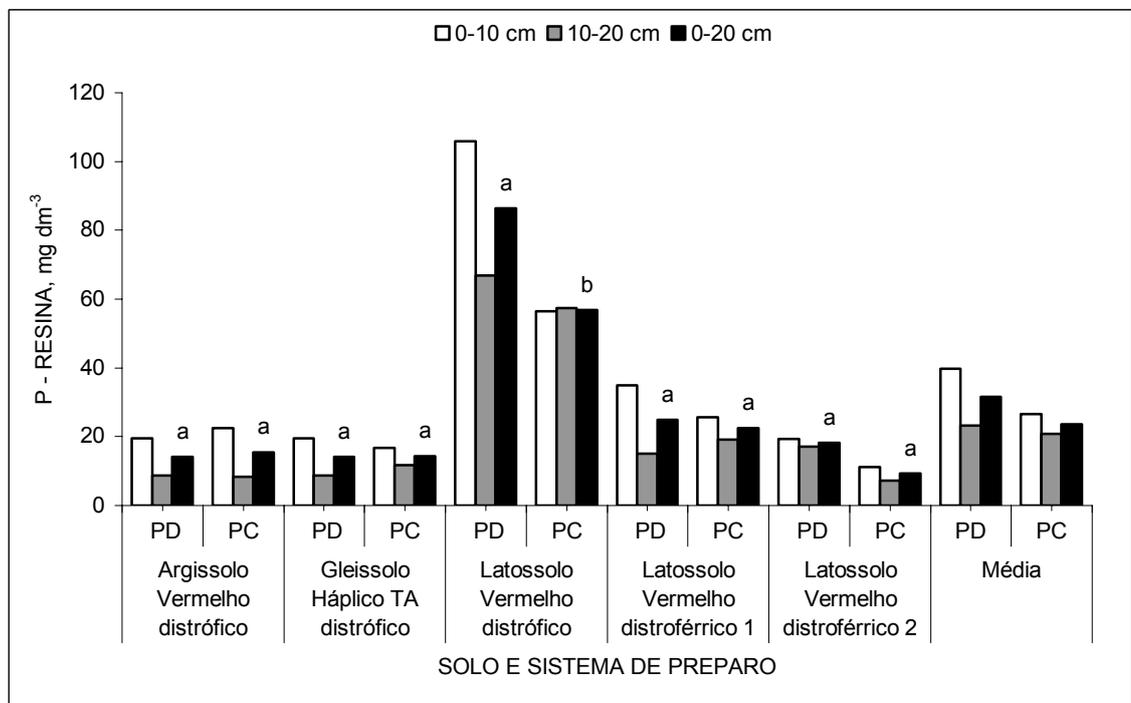


FIGURA 11. Fósforo extraível por Resina em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

Ressalta-se que, na média dos solos, embora não tenha havido significância ($P > 0,05$), devido ao preparo do solo apresentar efeito diferenciado entre solos arenosos e argilosos, no sistema plantio direto os valores de fósforo extraível por Mehlich-1 foram 55, 16 e 39% e, por Resina, 50, 12 e 33% maiores, respectivamente para as camadas de 0-10, 10-20 e 0-20 cm, em relação às mesmas camadas do preparo convencional (Figuras 10 e 11). Observa-se que estas diferenças ocorrem nos solos mais argilosos e, em grande parte, ao Latossolo Vermelho distrófico que apresentou elevado teor de fósforo, principalmente no sistema plantio direto. Os elevados teores neste solo foram provavelmente causados por elevadas aplicações de fertilizantes fosfatados sem posterior revolvimento.

A adição de doses similares de fertilizantes fosfatados ao solo provoca maior acumulação de fósforo na camada superficial do solo sob sistema plantio direto do que no preparo convencional, pois o volume de solo fertilizado é pequeno e há mobilização apenas no sulco de semeadura, sendo facilmente saturados os sítios de adsorção da camada superficial (Rheinheimer & Anghinoni, 2001).

Os valores encontrados para o fósforo extraível por Mehlich-1 e por resina apresentaram alta correlação ($r^2 = 0,92$) e valores bastante similares ($y = - 0,55 + 1,04 x$) (Figura 12). Nesta situação, o cálculo do poder tampão e do coeficiente de difusão resultaria em valores similares com o uso de qualquer um dos métodos.

No sistema plantio direto, a ausência de revolvimento do solo e a contínua adição de resíduos vegetais pelas culturas aumentam o teor de carbono e a agregação do solo, originando um solo mais bem estruturado. A adubação localizada na camada superficial resulta na formação de gradientes no perfil do solo. Estas mudanças caracterizam o sistema plantio direto consolidado. Neste, a capacidade de adsorção do solo é diminuída, pois as perdas de fósforo são pequenas, as adições de fertilizantes são efetuadas na camada superficial do solo e ocorre a ciclagem de fósforo das camadas mais profundas para a camada superficial. Também, há maiores teores de ânions orgânicos, que podem competir química e fisicamente com o fosfato pelos sítios de adsorção (Sibanda & Young, 1986; Hue, 1991).

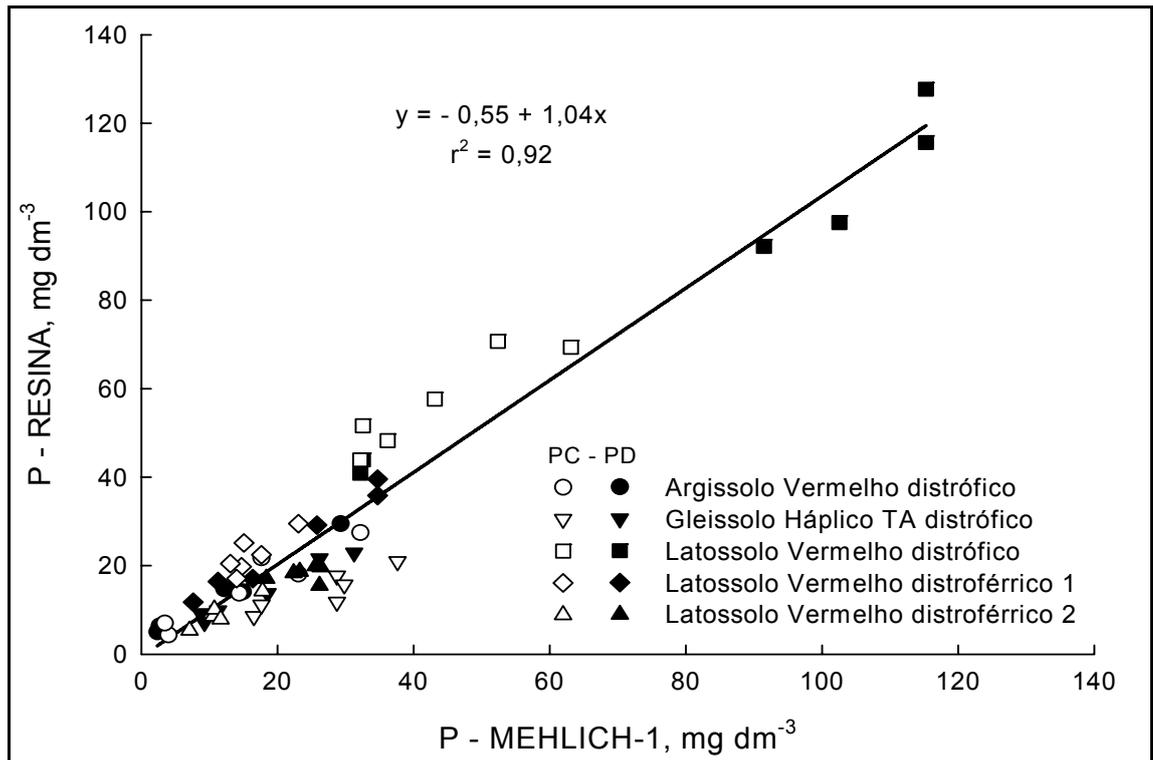


FIGURA 12. Relação entre fósforo extraível por Mehlich-1 e por Resina nas camadas de 0-10 e 10-20 cm em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo.

Os valores encontrados para os atributos químicos e físicos do solo, além de caracterizar o sistema plantio direto, possibilitam afirmar que, independentemente do sistema de preparo utilizado, de maneira geral, não há limitações ao desenvolvimento das plantas.

3.3.3. Parâmetros que afetam o suprimento de fósforo às raízes

Neste item, serão abordados os parâmetros de solo que afetam o suprimento de fósforo às raízes das plantas: umidade volumétrica (θ), fator de impedância (f), fósforo na solução (C_i), poder tampão (b) e coeficiente de difusão (D_e) (Equações 1, 2 e 3).

Na avaliação da umidade volumétrica do solo não foi encontrada diferença entre os dois sistemas de preparo do solo (Figura 13), rejeitando a idéia inicial de que no sistema plantio direto, devido à deposição dos resíduos vegetais na superfície do solo, pelo não revolvimento, somada ao incremento

no teor de carbono orgânico, haveria uma maior capacidade de retenção de água pelo solo, em relação ao preparo convencional.

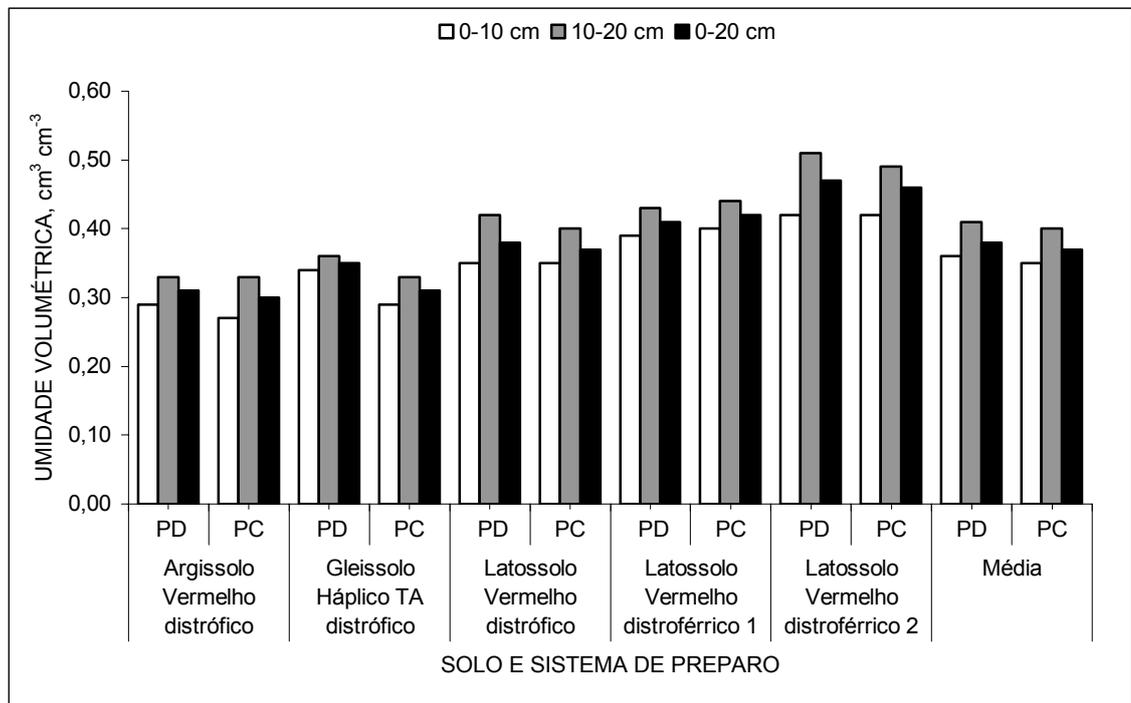


FIGURA 13. Umidade volumétrica em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Não significativo pelo teste de Tukey a 5%.

No entanto, no sistema plantio direto, na média dos solos, houve menor perda d'água por evaporação (132 mL vaso^{-1}), em relação ao preparo convencional (Figura 14). Por outro lado, houve maior consumo d'água por transpiração das plantas (150 mL vaso^{-1}) (Figura 15). Assim, somando a evaporação com a transpiração, a perda d'água por evapotranspiração, na média dos solos, foi de 18 mL vaso^{-1} em favor do sistema plantio. Estes valores de alguma forma, justificam a falta de diferença no conteúdo volumétrico de água no solo (Figura 13) entre os sistemas de preparo do solo.

Deve-se salientar que no experimento em colunas, o solo foi mantido em câmara de crescimento, com temperatura controlada e em capacidade de campo, diferentemente do verificado em lavouras onde, de maneira geral, ocorre períodos de menor disponibilidade de água, o solo apresenta uma maior continuidade de poros e um maior fluxo de água e, assim, o comportamento poderia ser diferente do encontrado nestas condições.

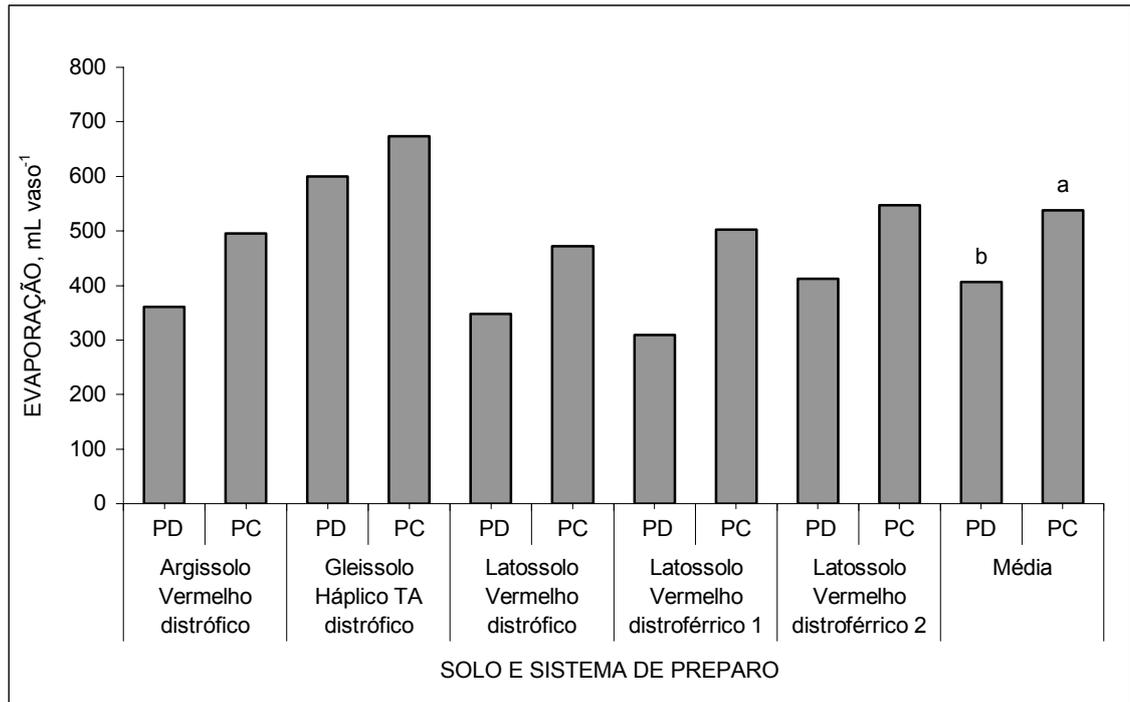


FIGURA 14. Perda d'água por evaporação em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

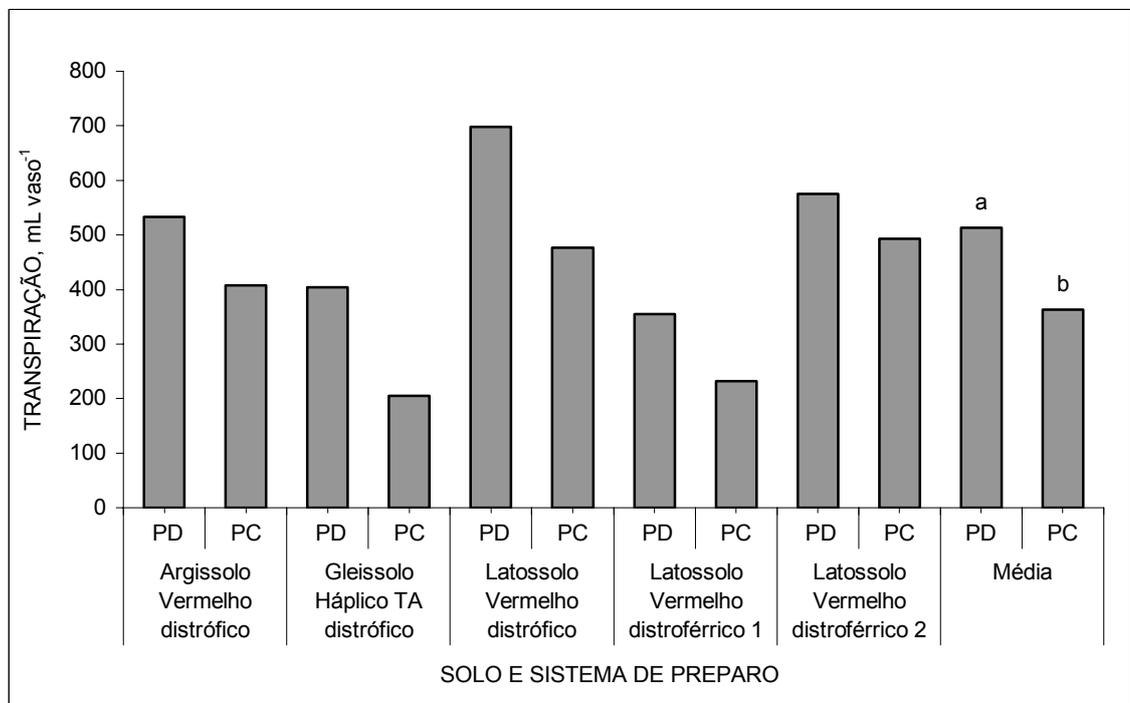


FIGURA 15. Água transpirada por plantas de soja, cultivadas em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

Os solos apresentaram variações no conteúdo volumétrico de água, sendo a tendência dos mais argilosos apresentarem maiores valores, em relação aos mais arenosos. Isto se deve à menor densidade (Figura 1) e à maior porosidade (Figura 2) e, principalmente, à maior proporção de microporos, responsáveis pelo armazenamento de água, nos solos argilosos (Figura 4).

O fator de impedância somente apresentou diferença entre os dois sistemas de preparo no Gleissolo Háplico TA distrófico, sendo maior no sistema plantio direto, em relação ao preparo convencional (Figura 16). A falta de diferença entre os valores encontrados para os demais solos se deve ao fator de impedância ser intimamente relacionado à umidade volumétrica do solo (Equações 4 e 5), que não apresentou diferenças entre os sistemas de preparo (Figura 13). O maior valor do fator de impedância encontrado no sistema plantio direto do Gleissolo Háplico TA distrófico, em relação ao preparo convencional, ocorreu devido à tendência de maior umidade volumétrica ($P > 0,05$) que, após o cálculo do fator de impedância, passou a ser significativa ($P < 0,05$).

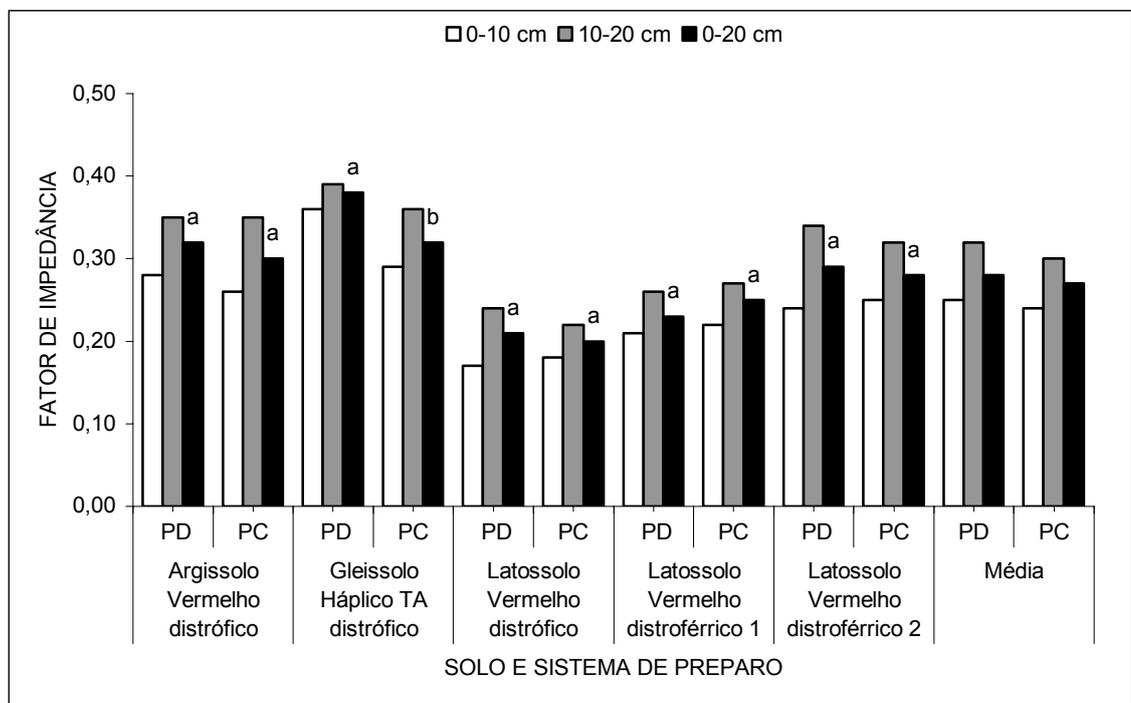


FIGURA 16. Fator de impedância em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

A concentração de fósforo na solução do solo foi maior no sistema plantio direto no Argissolo Vermelho distrófico, no Latossolo Vermelho distrófico e no Latossolo Vermelho distroférico 1 e 2, em relação ao preparo convencional (Figura 17). Na comparação entre as camadas, na média dos solos, a concentração de fósforo na solução do solo, foi maior no sistema plantio direto, tanto na camada de 0-10 cm, como na de 0-20 cm, em relação às mesmas camadas no preparo convencional, ficando, assim, evidente o benefício do sistema plantio direto no aumento da concentração de fósforo na solução do solo.

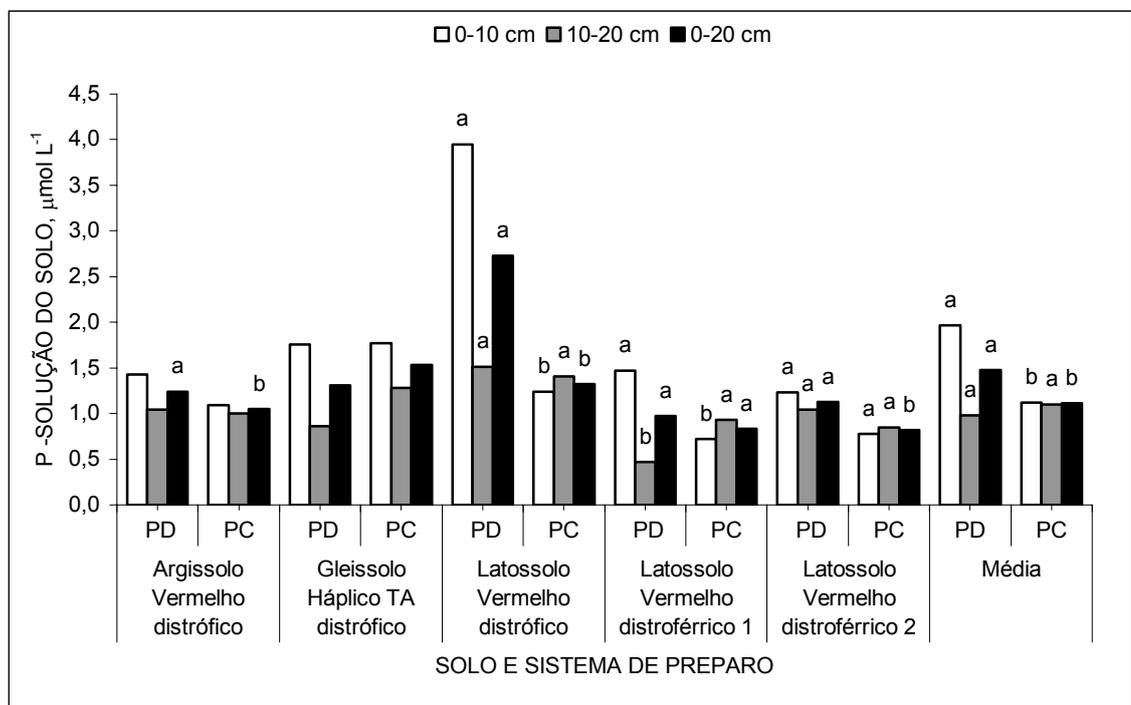


FIGURA 17. Fósforo na solução em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

A aplicação anual de fertilizantes fosfatados, em sulco ou a lanço, na camada superficial do solo, a liberação de fósforo orgânico através da decomposição dos resíduos vegetais deixados na superfície e a menor intensidade de adsorção de fósforo ocasionada pelo menor contato desse nutriente com os constituintes inorgânicos do solo (óxidos, oxi-hidroxi e hidróxidos de ferro e alumínio), aumentam a disponibilidade do fósforo, podendo resultar em maior suprimento pelo solo.

O sistema plantio direto apresentou, na média dos solos, teores de fósforo na solução do solo 76 e 33% maiores respectivamente, para as camadas de 0-10 e 0-20 cm, e 11% menor, na camada de 10-20 cm, em relação às mesmas camadas do preparo convencional (Figura 17). Observam-se, também, os elevados valores encontrados no sistema plantio direto do Latossolo Vermelho distrófico, principalmente, na camada de 0-10 cm, e a ausência de significância para o Gleissolo Háptico TA distrófico. Porém, deve-se salientar que, mesmo sem a inclusão desses resultados, o sistema plantio direto continuaria com maior concentração de fósforo, na média do restante dos solos, em relação ao preparo convencional.

O menor valor do poder tampão do fósforo na camada de 0-10 cm, na média dos solos, no sistema plantio direto, deve-se muito aos resultados do Latossolo Vermelho distrófico e do Latossolo Vermelho distroférico 1 (Figura 18). O Argissolo Vermelho distrófico somente apresentou tendência ($P > 0,05$) em ser menor e o Gleissolo Háptico TA distrófico e o Latossolo Vermelho distroférico 2, por sua vez, apresentaram tendência ($P > 0,05$) de possuírem maiores valores de poder tampão no sistema plantio direto em relação ao preparo convencional (Figura 18). Disto tudo, resultam valores similares nas camadas de 0-20 e 10-20 cm, na média dos solos.

No sistema plantio direto, a concentração de fósforo na solução do solo, de maneira geral, foi maior na camada de 0-10 cm, em relação à mesma camada do preparo convencional (Figura 17). Assim, o decréscimo do poder tampão (b) associado ao aumento da concentração de fósforo na solução do solo favorece o suprimento de fósforo (Equações 1 e 2).

Nos solos estudados, o coeficiente de difusão do fósforo (D_e) não apresentou diferença entre os sistemas de preparo do solo. Entretanto, observa-se que, excetuando-se o Latossolo Vermelho distroférico 2, todos os demais solos, no sistema plantio direto, tanto na camada de 0-10 cm, como na de 0-20 cm, apresentaram tendência ($P > 0,05$) de maior coeficiente de difusão de fósforo, em relação ao preparo convencional (Figura 19).

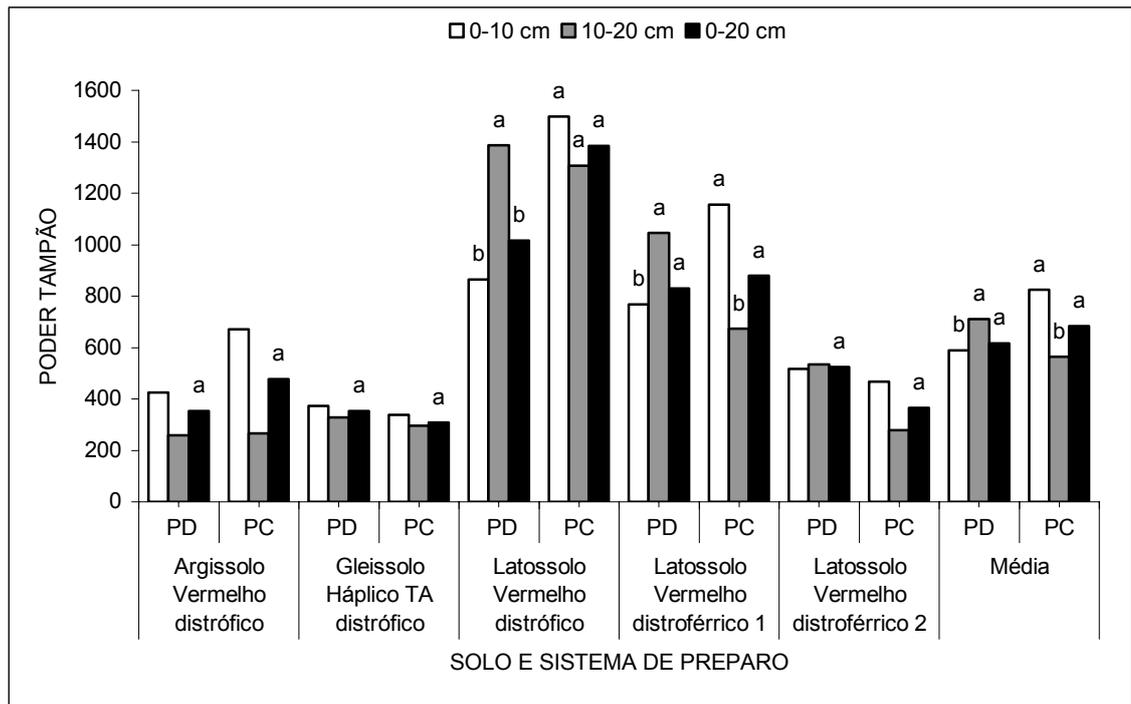


FIGURA 18. Poder tampão do fósforo em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

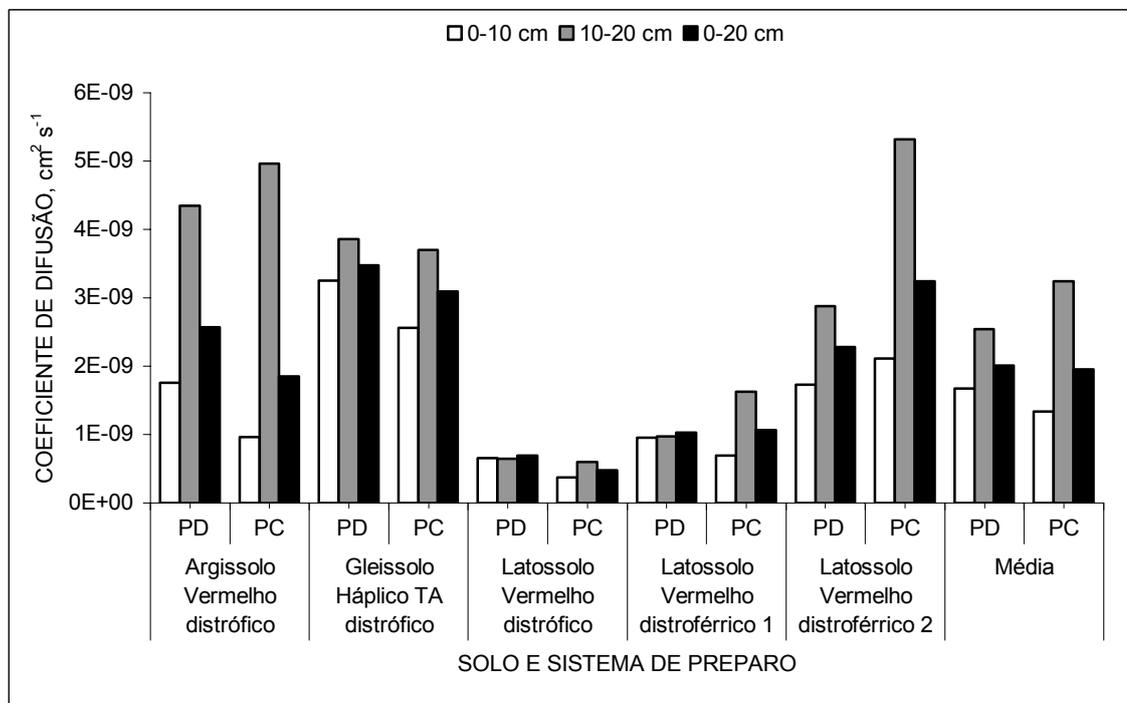


FIGURA 19. Coeficiente de difusão do em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Não significativo pelo teste de Tukey a 5%.

Os valores encontrados para o coeficiente de difusão de fósforo no solo (D_e) resultam da ação conjunta de vários parâmetros (Equação 3). Dentre esses, o conteúdo volumétrico de água, o fator de impedância e o poder tampão de fósforo no solo, este último é o que parece apresentar maior efeito entre os preparos do solo.

O poder tampão (b), freqüentemente, é o fator de maior influência sobre a diminuição do coeficiente de difusão (D_e – Equação 3), principalmente dos íons que são fortemente adsorvidos pelas partículas de solo (Nye & Tinker, 1977). As características do solo em suprir nutrientes às raízes, envolvem, basicamente, a concentração inicial do nutriente na superfície da raiz e a capacidade do solo (poder tampão) em manter esta ou determinada concentração (Barber, 1974).

Para entender a grande variação entre os solos, no coeficiente de difusão, os fatores envolvidos no cálculo devem ser analisados conjuntamente. Por exemplo, o Latossolo Vermelho distrófico apresentou baixos valores de coeficiente de difusão (Figura 19), apesar de apresentar elevada concentração de fósforo na solução do solo (C_i) (Figura 17), também, apresentou elevada concentração na fase sólida (C_s) (Figura 11) que resultou em elevado poder tampão (b) (Figura 18).

Cabe salientar que as diferenças encontradas no coeficiente de difusão (D_e) não foram significativas ($P > 0,05$), em função dos vários parâmetros envolvidos no seu cálculo (Equação 3) que elevaram o coeficiente de variação. Todavia, é importante destacar que o suprimento e a absorção do fósforo pelas plantas, bem como o seu crescimento, dependem da ação conjunta desses vários componentes; assim, além do coeficiente de difusão, tem que se considerar a magnitude do sistema radicular (A) e o gradiente de concentração de fósforo (dc/dx). Desta forma, as tendências observadas no coeficiente de difusão efetiva poderão resultar ou não em diferenças ($P < 0,05$).

Por fim, salienta-se, ainda, que o Latossolo Vermelho distrófico típico apresentou teor muito elevado de fósforo no solo e na solução do solo e uma diferença entre sistemas de preparo muito grande, levando a presumir que tenham recebido quantidades diferenciadas de fósforo, o que leva a ter muita cautela ao interpretar e concluir com base nos resultados desse solo.

3.3.4. Parâmetros de planta que afetam a absorção de fósforo

As plantas de soja cultivadas, na câmara de crescimento, nas colunas provenientes de solo antes cultivado no sistema plantio direto apresentaram, nos solos e na média, na camada de 0-10 cm, maior comprimento de raiz (Figura 20) e, em consequência, maior área superficial de raiz (Figura 21), uma vez que o raio médio da raiz não foi afetado (Figura 22), em relação às cultivadas no sistema de preparo convencional. Na camada de 10-20 cm não houve diferença entre os sistemas de preparo do solo para esse parâmetro. Esses resultados demonstram o efeito positivo do sistema plantio direto no crescimento e no desenvolvimento radicular das plantas de soja.

As diferenças no crescimento e na área superficial da raiz entre os sistemas de preparo do solo encontradas na camada de 0-20 cm resultam das diferenças encontradas na camada de 0-10 cm, que é a utilizada nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina como diagnóstico no sistema plantio direto (Figuras 20 e 21). As raízes das plantas, em geral, se desenvolvem mais densamente nos pontos onde há maior suprimento de fósforo (Klepker & Anghinoni, 1993).

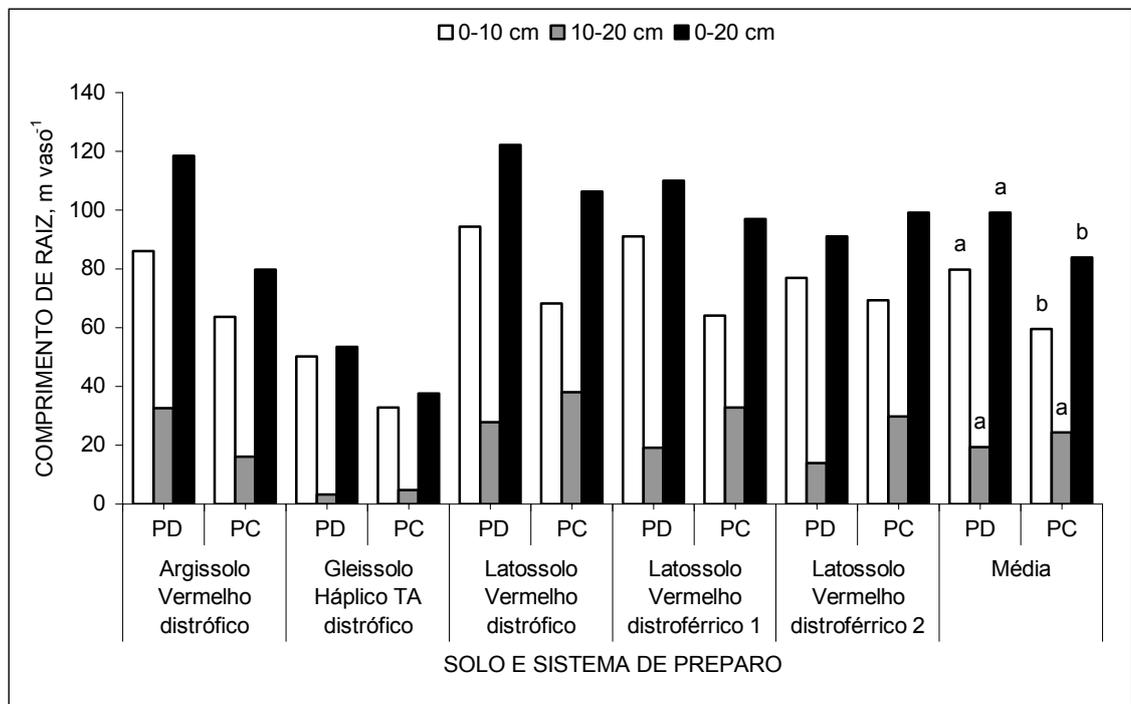


FIGURA 20. Comprimento de raiz de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

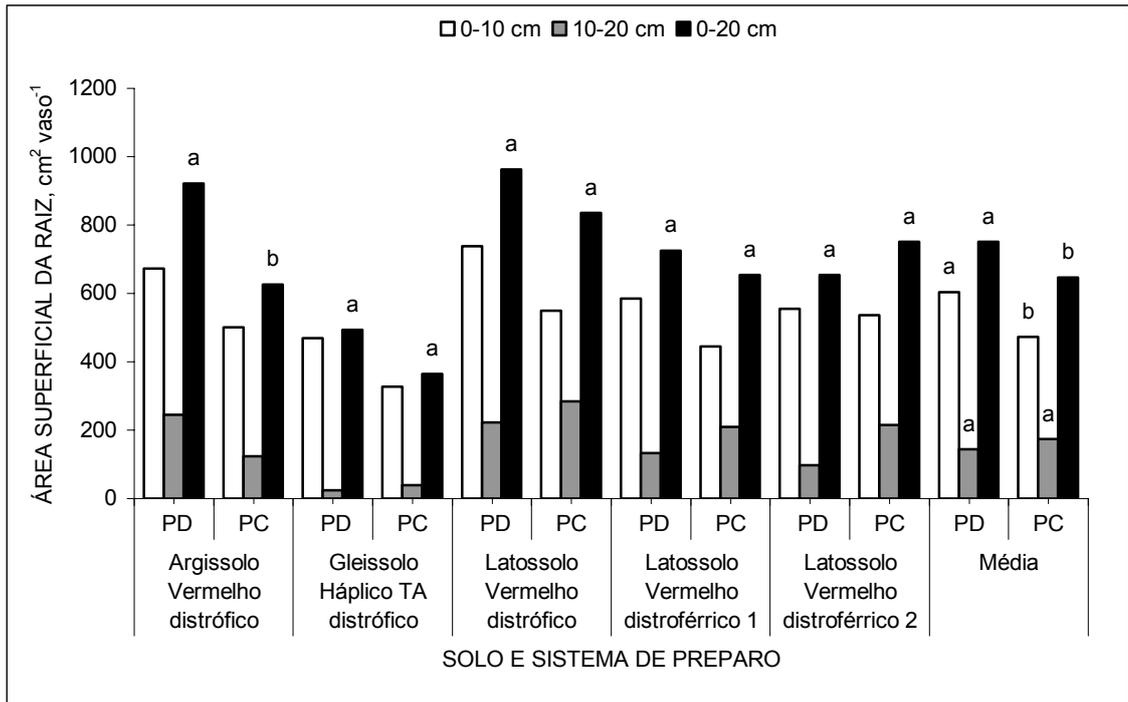


FIGURA 21. Área superficial da raiz de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

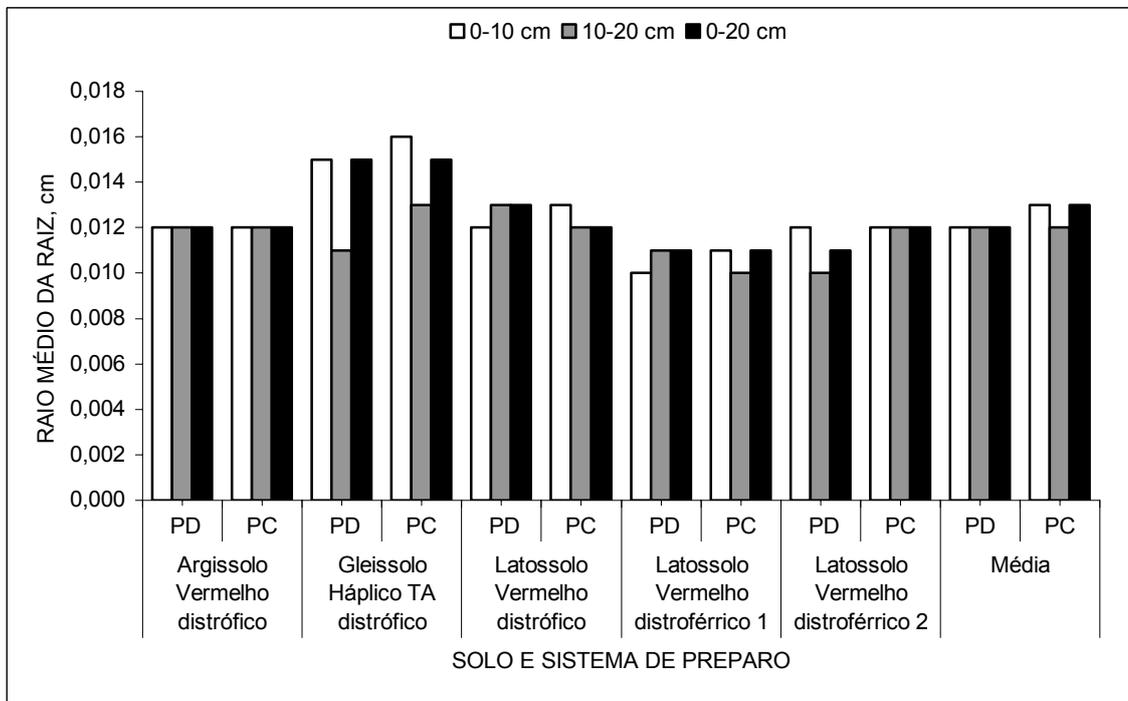


FIGURA 22. Raio médio da raiz de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Não significativo pelo teste de Tukey a 5%.

No sistema plantio direto, o volume de solo fertilizado é pequeno, pois há o revolvimento apenas no sulco de semeadura, sendo facilmente saturados os sítios de adsorção da camada superficial (Rheinheimer & Anghinoni, 2001). Também, a capacidade de adsorção do solo diminui com a consolidação do sistema, pois as perdas de fósforo são pequenas, há freqüentes adições de fertilizantes e ocorre a ciclagem de fósforo das camadas mais profundas para a camada superficial (Sá, 2004). Nesta situação, a maior presença de ânions orgânicos, que podem competir química e fisicamente como fosfato pelos sítios de adsorção, amenizando as reações com o fósforo (Sibanda & Young, 1986; Hue, 1991), favorecem o suprimento de fósforo às raízes das plantas e, por conseguinte, o crescimento radicular na área fertilizada.

Observa-se que o Gleissolo Háplico TA distrófico apresentou menor crescimento de raiz e, em conseqüência, menor área superficial de raiz, em relação aos demais solos e, que, na camada de 10-20 cm, os valores foram poucos expressivos. Isto se deve, provavelmente, a baixa macroporosidade (Figura 3), que ficou abaixo do limite de $0,10 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, considerado crítico para o crescimento radicular e desenvolvimento das plantas (Vomocil & Flocker, 1961; Grable & Siemer, 1968). Cabe salientar que este solo vinha sendo cultivado com arroz irrigado por inundação e que os baixos valores de macroporosidade resultam do manejo do solo e do alagamento que desestruturam o solo.

A falta de diferenças no raio médio das raízes de soja (Figura 22), de maneira geral, era esperada, pois, exceto para o Gleissolo Háplico TA distrófico, cuja tendência foi de apresentar raízes mais curtas (Figura 20) e mais grossas (Figura 22), apresentou também mais baixos valores de macroporosidade (Figura 3), os demais solos, independentemente do sistema de preparo, não apresentavam limitações químicas e físicas ao crescimento radicular.

Como conseqüência do maior crescimento radicular (Figura 20), as plantas de soja cultivadas no sistema plantio direto apresentaram maior taxa de crescimento de raiz, a qual pode ser visualizada pela média dos solos na camada de 0-20 cm (Figura 23). Na avaliação dentro de cada solo, a taxa de crescimento de raiz apresentou diferença entre os sistemas de preparo do solo

apenas na camada de 10-20 cm, sendo maior no Argissolo Vermelho distrófico e menor no Latossolo Vermelho distroférico (1 e 2), no sistema plantio direto em relação ao preparo convencional.

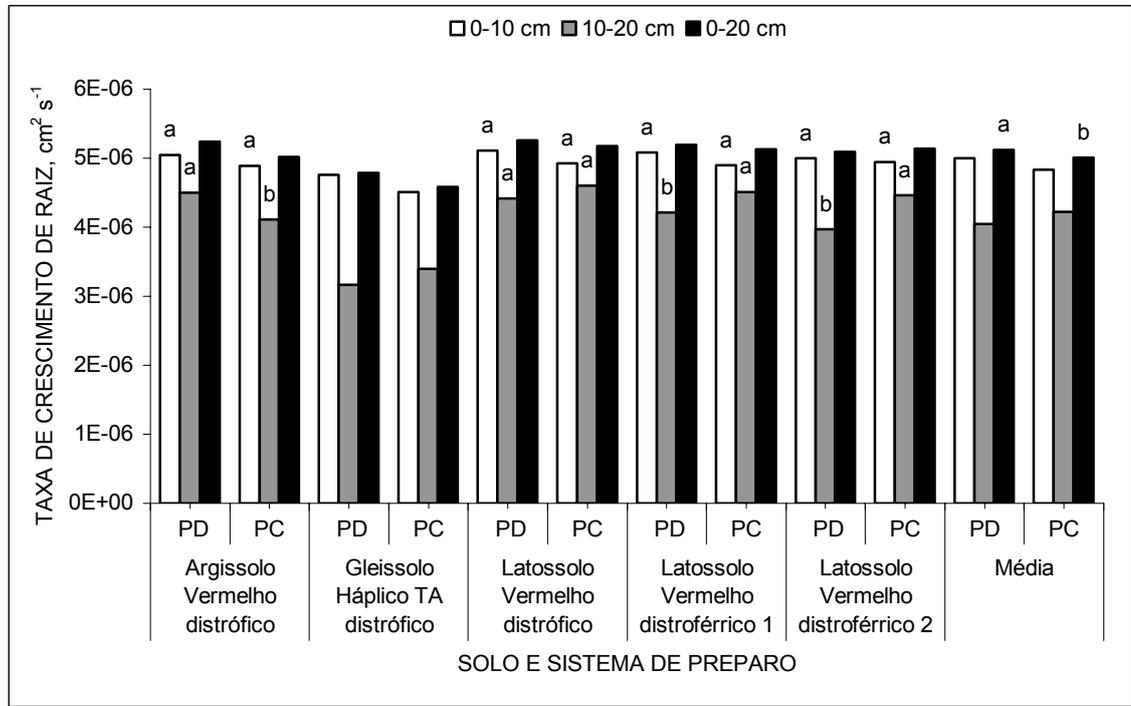


FIGURA 23. Taxa de crescimento da raiz de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

A meia distância entre raízes tendeu a ser menor na camada de 0-10 cm ($P > 0,05$), foi maior na camada de 10-20 cm e menor na camada de 0-20 cm, no sistema plantio direto, em relação às mesmas camadas do preparo convencional (Figura 24). Como o crescimento de raiz na camada de 10-20 cm do preparo convencional não compensou o menor crescimento da camada de 0-10 cm, o maior crescimento nessa camada no sistema plantio direto se manteve quando da avaliação da camada de 0-20 cm (Figura 20). Quanto maior o crescimento de raiz, maior o espaço físico ocupado e menor a meia distância entre raízes no solo.

Quanto menor meia distância entre raízes maior a absorção de fósforo pelas raízes, desde que não haja competição entre elas pelo fósforo. Para verificar se há competição, estima-se a extensão de depleção de fósforo

em torno das raízes (distância linear média percorrida, d - Equação 11) em um período de tempo (t) utilizando-se o coeficiente de difusão (D_e). Não ocorre competição, quando a extensão de depleção de fósforo (Apêndice 3) for menor do que a meia distância entre raízes (Figura 24). No presente estudo, não houve competição entre raízes, confirmando que o sistema plantio direto, por apresentar menor meia distância entre raízes, favorece a absorção de fósforo. Segundo Barber (1974), a distância de depleção máxima do fósforo em torno da superfície da raiz é de, aproximadamente, 1 mm, e a meia distância entre raízes no presente trabalho apresentou valores bem maiores em todos os solos (Figura 24).

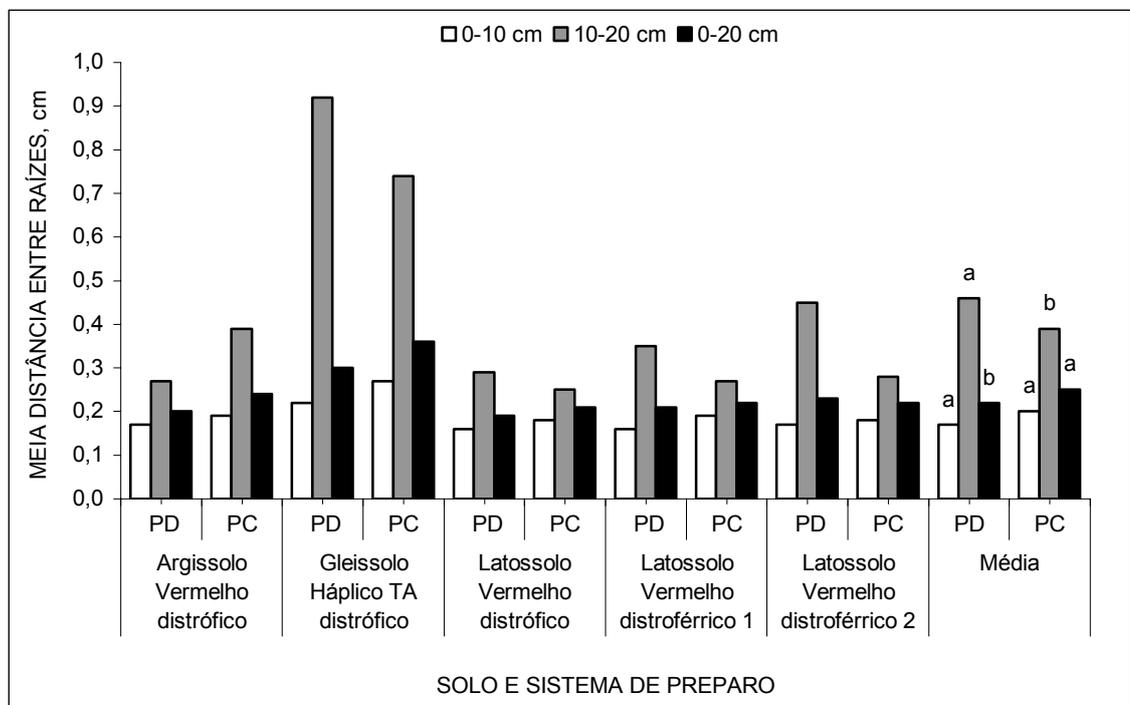


FIGURA 24. Meia distância entre raízes de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

Em resumo, as plantas de soja cultivadas no sistema plantio direto apresentaram maior crescimento, área superficial e taxa de crescimento de raiz e menor meia distância entre raízes, em relação ao preparo convencional.

3.3.5. Influxo de água, absorção de fósforo e crescimento de soja

O influxo médio de água na superfície das raízes de soja foi maior no sistema plantio direto em relação ao preparo convencional (Figura 25). Isso devido à maior transpiração (Figura 15) e maior área superficial de raízes (Figura 21) das plantas cultivadas naquele sistema.

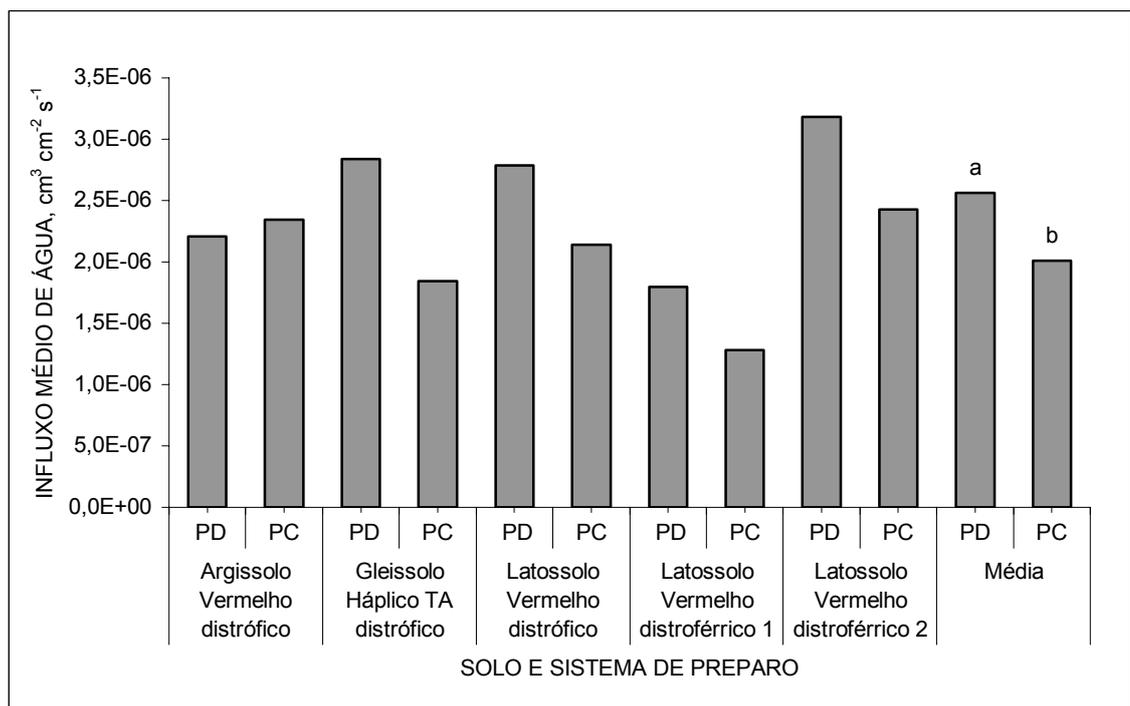


FIGURA 25. Influxo médio de água na superfície das raízes de soja em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

As plantas de soja cultivadas no sistema plantio direto tiveram maior conteúdo de fósforo presente nas raízes (Figura 26) e maior produção de matéria seca de raiz (Figura 27), tanto na avaliação da camada superficial, de 0-10 cm, como em toda a camada, de 0-20 cm, em relação às plantas cultivadas em preparo convencional. No sistema plantio direto, os parâmetros de solo (Equações 1 e 3) determinaram maior crescimento de raiz das plantas de soja, justificando, assim, o maior conteúdo de fósforo (Figura 28) e a maior massa de matéria seca (Figura 29) nas plantas de soja.

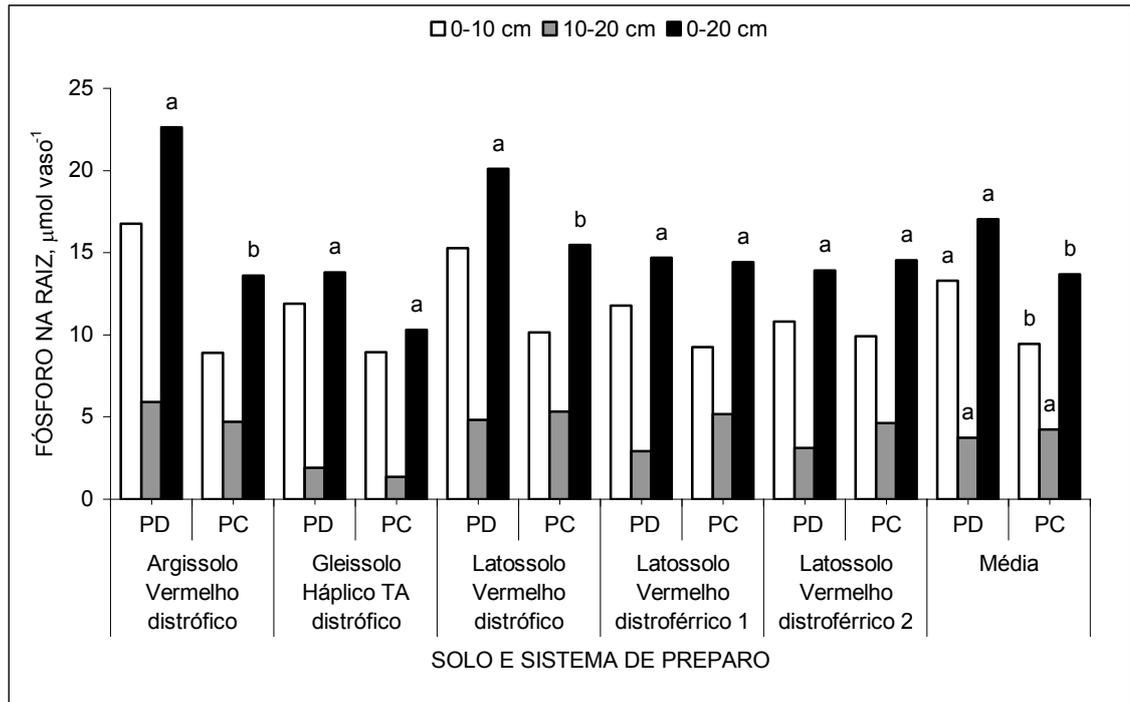


FIGURA 26. Fósforo contido nas raízes de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

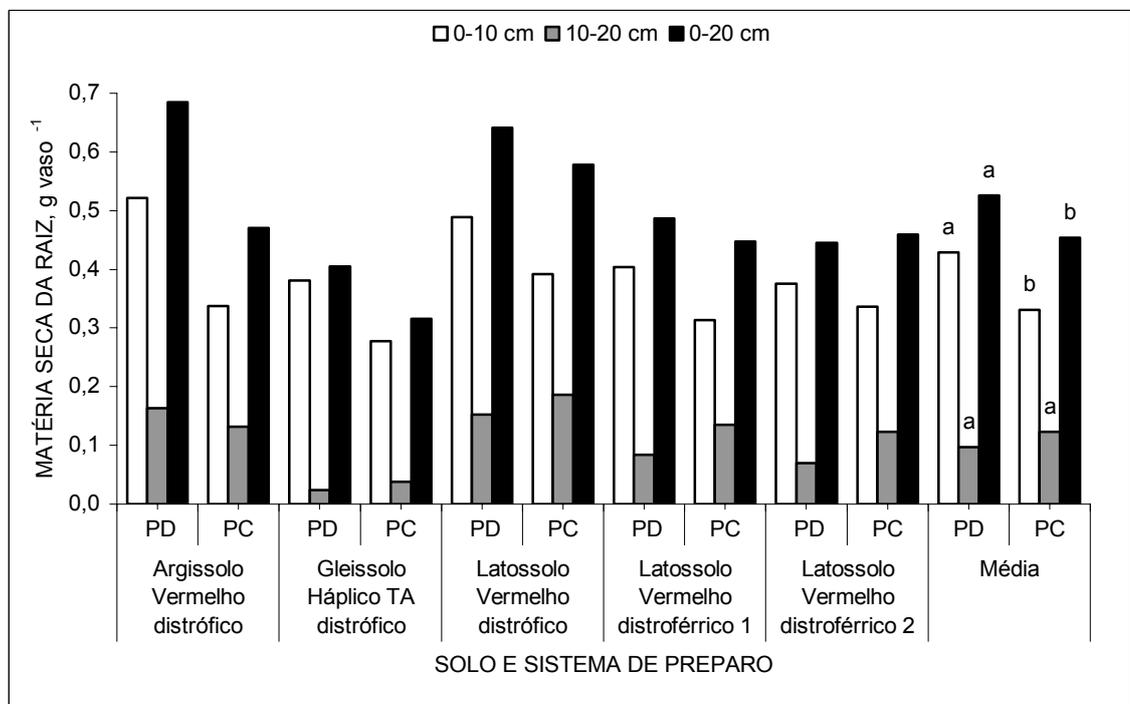


FIGURA 27. Matéria seca de raízes de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

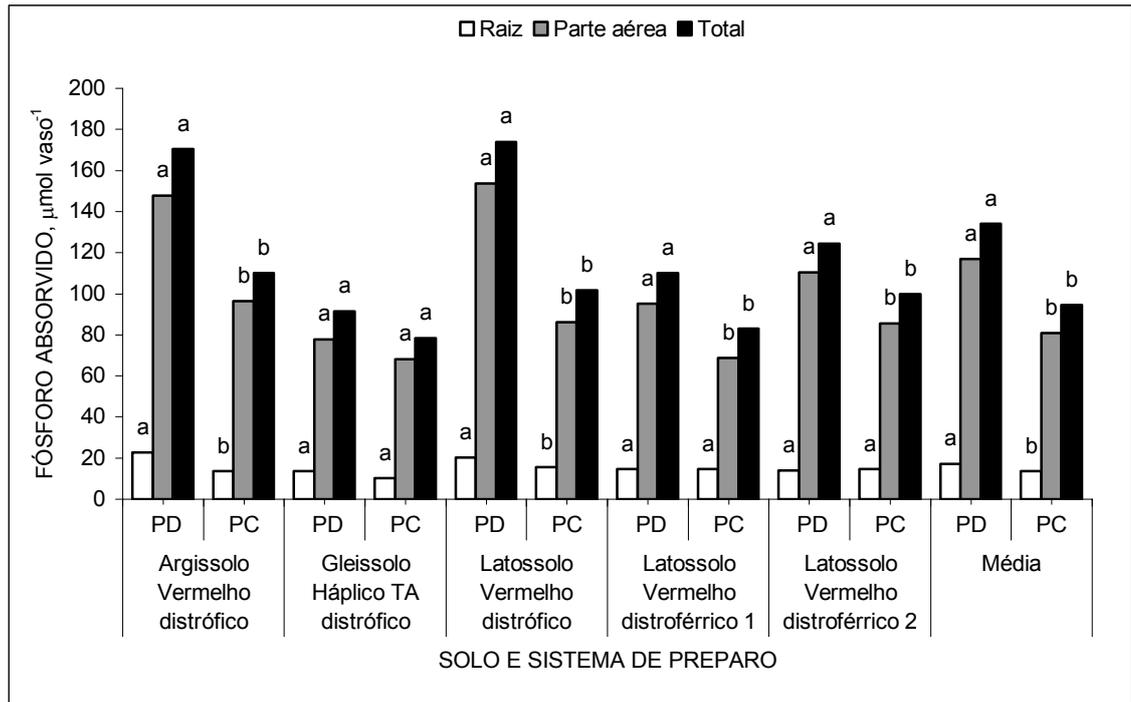


FIGURA 28. Fósforo absorvido pela soja (contido nas raízes, parte aérea e total) em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

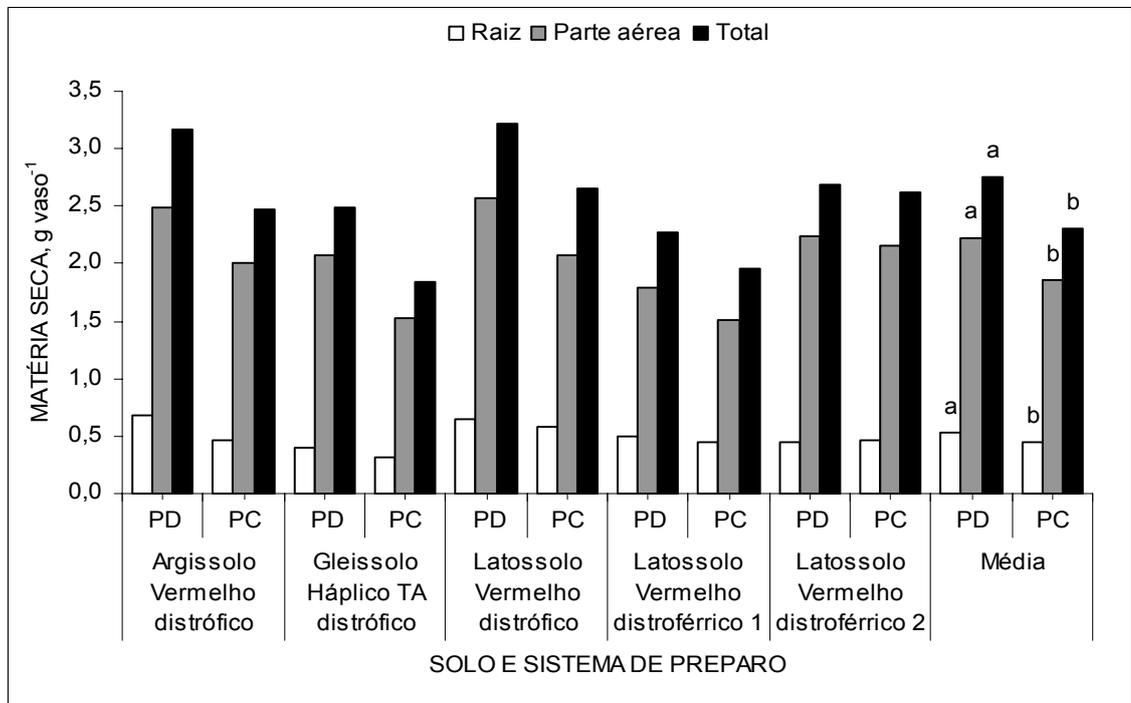


FIGURA 29. Matéria seca de soja, raízes, parte aérea e total, em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.

Na avaliação em cada solo, o conteúdo de fósforo nas raízes (Figura 26) foi maior nas plantas de soja especialmente quando cultivadas no sistema plantio direto do Argissolo Vermelho distrófico e do Latossolo Vermelho distrófico, em relação ao preparo convencional. Nos demais solos, apesar das tendências, os valores não diferiram ($P > 0,05$). Na parte aérea (Figura 28), onde a maior parte do fósforo absorvido pela soja foi armazenado, as plantas cultivadas no sistema plantio direto apresentaram, exceto no Gleissolo Háplico TA distrófico em que houve apenas tendência ($P > 0,05$), maior conteúdo de fósforo no tecido, em relação às cultivadas no preparo convencional. Assim, para o fósforo total absorvido pela soja (P -raiz + P -parte aérea) o comportamento foi o mesmo do conteúdo de fósforo na parte aérea, ou seja, as plantas cultivadas no sistema plantio direto tiveram maior absorção em relação àquelas cultivadas em preparo convencional (Figura 28).

A maior absorção de fósforo (Figura 28) determinou uma maior produção de matéria seca na raiz, na parte aérea e no total das plantas de soja cultivadas no sistema plantio direto, em relação àquelas cultivadas no preparo convencional (Figura 29).

Verificou-se, assim, neste trabalho que no sistema plantio direto, os atributos químicos e físicos do solo contribuíram para um maior suprimento de fósforo às raízes (Equação 1). Ocorreu também um aumento na magnitude do sistema radicular (A) das plantas cultivadas nesse sistema. A combinação dos fatores de solo e de planta resultou em maior suprimento e absorção de fósforo e maior produção de matéria seca das plantas de soja cultivadas no sistema plantio direto em relação àquelas cultivadas em preparo convencional.

Dos parâmetros de solo, o teor de fósforo na solução, que tem influência no gradiente de concentração (dc/dx) e no poder tampão (b), especialmente na camada de 0-10 cm, foi o fator mais importante para determinar a maior biodisponibilidade de fósforo para a soja no sistema plantio direto. Isto, porque os demais parâmetros de solo, umidade volumétrica (θ) e fator de impedância (f), que determinam a difusão de fósforo às raízes, não se diferenciaram entre os sistemas de preparo de solo.

Dos parâmetros morfológicos de planta, o crescimento radicular, e, conseqüentemente, a área superficial de raiz, a taxa de crescimento de raiz e a

meia distância entre raízes, foi o parâmetro mais importante para determinar o maior suprimento e absorção de fósforo pela soja no sistema plantio direto.

A maior quantidade de fósforo absorvida foi, assim, devida à maior concentração de fósforo na superfície da raiz e à maior superfície de raízes. Resta, ainda, verificar se a cinética da absorção pode ser afetada pelo manejo do solo, para, assim, conhecer o fluxo desse nutriente desde a fase sólida do solo até o interior da planta.

O sistema plantio direto apresentou maior eficiência de uso de fósforo em relação ao preparo convencional, uma vez que a quantidade adicionada de P_2O_5 foi à mesma nos dois sistemas de preparo em cada solo. Isso ficou evidenciado pela maior absorção de fósforo, que resultou em maior produção de matéria seca para as plantas de soja cultivadas no sistema plantio direto.

3.4. Conclusões

Os atributos físicos, densidade, macroporosidade e porosidade total do solo, de maneira geral, não apresentam efeitos consistentes com os sistemas de preparo do solo. Já, o índice de estabilidade de agregados e a microporosidade do solo apresentam maiores valores na camada superficial do sistema plantio direto em relação ao preparo convencional.

Os atributos químicos do solo, carbono orgânico total, pH em água, cálcio e magnésio trocáveis e fósforo extraível do solo, de maneira geral, apresentam maiores valores nos solos cultivados em sistema plantio direto em relação aos cultivados em preparo convencional.

A aplicação superficial dos adubos fosfatados e o não revolvimento do solo no sistema plantio direto resultam em maior concentração de fósforo na solução do solo em relação ao preparo convencional.

A umidade volumétrica e o fator de impedância, de maneira geral, não diferem entre os sistemas de preparo de solo.

A maior concentração de fósforo na solução do solo no sistema plantio direto determina um maior suprimento de fósforo às raízes das plantas em relação ao preparo convencional.

As plantas cultivadas no sistema plantio direto apresentam maior crescimento radicular (comprimento e área superficial de raiz), em função do maior suprimento de fósforo.

As plantas cultivadas no sistema plantio direto apresentam maior absorção de fósforo e produção de matéria seca em relação às cultivadas em preparo convencional.

4. CAPÍTULO III

ESTUDO 2 - UTILIZAÇÃO DE MODELO MECANÍSTICO NA PREDIÇÃO DA ABSORÇÃO DE FÓSFORO

4.1. Introdução

Para melhor entendimento do processo de suprimento de nutrientes pelo solo e de sua absorção pelas plantas, foram desenvolvidos modelos mecanísticos que possibilitam verificar ou predizer os efeitos dos fatores de solo e de planta envolvidos. Esses modelos representam um resumo do conhecimento do fluxo do nutriente no sistema solo-planta, enfatizando os mecanismos e os fatores envolvidos na sua absorção pelas plantas, porém, sua utilização é, ainda, pouco freqüente. Mudar essa concepção, utilizando e entendendo melhor os modelos mecanísticos, poderia contribuir para o desenvolvimento de métodos mais eficientes na avaliação da disponibilidade de fósforo para as plantas e, assim, no manejo da adubação fosfatada, melhorando a sua eficiência. Apesar das medidas dos parâmetros do modelo serem complexas para uso em testes de rotina, os modelos são ferramentas de pesquisa que podem prever mais corretamente a disponibilidade de nutrientes em solos com diferentes características difusivas e sistemas de preparo.

Um programa de computador foi desenvolvido visando incorporar vários parâmetros necessários ao cálculo de absorção de nutrientes em uma só vez (Barber & Cushman, 1981). O modelo matemático desenvolvido calcula a absorção de nutrientes pela integração de onze parâmetros de solo e de planta, relacionados com o suprimento de nutrientes pelo solo às raízes, por

meio de fluxo de massa e difusão, com as propriedades morfológicas do sistema radicular e sua taxa de crescimento, e com os parâmetros cinéticos de absorção de nutrientes (Barber, 1995).

O modelo de Barber & Cushman (1981) tem sido utilizado para simulação de absorção de nutrientes, e prediz com sucesso a absorção de nutrientes em solos (Claassen et al., 1986; Ernani & Barber, 1992; Meurer & Anghinoni, 1994; Barber, 1995; Anghinoni & Meurer, 1999). Para a validação do modelo, a absorção predita pelo mesmo é comparada por meio de análises de regressão e de coeficientes de correlação com a absorção efetiva das plantas. Os modelos, depois de validados, possibilitam estimar ou prever as conseqüências na absorção de fósforo, devido a alterações nos parâmetros do modelo pela variação de fatores de solo e de planta. Estas variações são efetuadas pelo uso de simulações.

As simulações podem ser análises de sensibilidade, geralmente utilizadas para identificar a magnitude da contribuição de cada parâmetro para a absorção total do nutriente, ou para investigar o efeito de alterações nos parâmetros de solo e de planta, pela variação de fatores, bióticos e abióticos, que permitem, por exemplo, simular o efeito de manejo do solo e da adubação, na absorção dos nutrientes.

O presente estudo foi realizado com os objetivos de (a) verificar se o modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) estima satisfatoriamente a absorção de fósforo por plantas de soja crescendo em solos do Rio Grande do Sul com diferentes características difusivas e sistemas de preparo do solo e, (b) uma vez validado o modelo, utilizá-lo para identificar a importância relativa de parâmetros de solo e de planta associados ao suprimento e à absorção de fósforo pelas plantas.

4.2. Material e métodos

Para atingir os objetivos propostos neste estudo, foram determinados os parâmetros de solo e de planta necessários à operacionalização do modelo de Barber & Cushman (1981). Os solos utilizados foram os mesmos descritos no Estudo 1.

4.2.1. Parâmetros do modelo

Foi utilizado neste trabalho, o modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981), versão 3.5, descrito por Oates & Barber (1987). Este modelo opera com onze parâmetros: (1) D_e = coeficiente de difusão efetiva ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$); (2) b = poder tampão; (3) C_{ii} = concentração inicial do elemento em solução ($\mu\text{mol L}^{-1}$); (4) v_0 = influxo médio de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$); (5) r_1 = meia distância entre raízes (cm); (6) r_0 = raio médio da raiz (cm); (7) L_0 = comprimento inicial de raiz (cm); (8) k = taxa de crescimento de raiz (cm s^{-1}); (9) $I_{\text{máx}}$ = influxo máximo ($\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$); (10) K_m = constante de Michaelis-Menten ($\mu\text{mol L}^{-1}$) e (11) C_{min} = concentração mínima ($\mu\text{mol L}^{-1}$).

Dentre os parâmetros necessários para calcular o suprimento do nutriente até a raiz e a subsequente absorção do íon na superfície da raiz, oito dos onze parâmetros do modelo matemático estão relacionados com a morfologia e a fisiologia radicular. Dos oito, quatro descrevem a área superficial de raiz e sua taxa de crescimento com o tempo, três descrevem a relação entre o influxo do íon e sua concentração na solução do solo, e um descreve o influxo de água. Três parâmetros descrevem a taxa de suprimento do íon do solo para a raiz.

Informações detalhadas das equações matemáticas e pressuposições usadas no modelo podem ser encontradas em Barber & Cushman (1981) e em Barber (1995). O programa de computador foi doado pelo Prof. Stanley A. Barber da Universidade de Purdue ao Prof. Ibanor Anghinoni do Departamento de Solos da UFRGS.

4.2.1.1. Parâmetros de solo

Os parâmetros de solo, D_e , b e C_{ii} , utilizados no modelo (Apêndice 4), foram determinados conforme descrito no Estudo 1, item 3.2.4.1.

4.2.1.2. Parâmetros de planta

a) Morfológicos do sistema radicular

Os parâmetros morfológicos do sistema radicular, r_1 , r_0 e k , utilizados no modelo (Apêndice 5), foram determinados conforme descritos no Estudo 1, item 3.2.4.2., e o L_0 (comprimento inicial de raiz), com valor médio de 20 cm, foi obtido por meio de medição das raízes das plantas, no momento do transplante para as colunas de solo.

b) Absorção de água e de fósforo e massa de matéria seca

A absorção de água (influxo de água na superfície da raiz - v_0) (Apêndice 6) e de fósforo e a massa de matéria seca foram determinadas conforme descritos no Estudo 1, item 3.2.4.2.

c) Cinéticos de absorção

Os parâmetros cinéticos de absorção, $I_{\text{máx}}$, K_m e $C_{\text{mín}}$, foram obtidos conforme descrito a seguir.

4.2.2. Parâmetros cinéticos de absorção

Para a determinação dos parâmetros cinéticos de absorção, necessários para operar o modelo mecanístico, foi conduzido, nas mesmas condições do experimento em solos (Estudo 1, item 3.2.3.2.), um experimento em solução nutritiva em câmara de crescimento. Sementes de soja foram germinadas em papel toalha colocado em vaso contendo água destilada. Após a emergência, as plantas foram selecionadas quanto à uniformidade e transferidas três plantas por vaso (cinco repetições) com solução nutritiva arejada continuamente, tendo a seguinte composição: 1000 μmol de Ca L^{-1} ,

1000 μmol de Mg L^{-1} , 2000 μmol de K L^{-1} , 1500 μmol de $\text{N (NH}_4\text{) L}^{-1}$, 3000 μmol de $\text{N (NO}_3\text{) L}^{-1}$, 500 μmol de P L^{-1} , 1000 μmol de S L^{-1} , 23 μmol de B L^{-1} , 5,5 μmol de Mn L^{-1} , 1,5 μmol de Zn L^{-1} , 0,5 μmol de Cu L^{-1} , 0,1 μmol de Mo L^{-1} e 90 μmol de Fe L^{-1} . As fontes utilizadas foram: $\text{Ca(NO}_3\text{)}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, K_2SO_4 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, NH_4NO_3 , H_3BO_3 , $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e Fe-EDTA. A solução nos vasos plásticos (1,2 L) foi trocada a cada três dias e o pH ajustado a 5,2 com HCl ou NaOH. O experimento foi concluído 20 dias após a transferência das plantas para os vasos.

Os parâmetros de absorção de fósforo pela soja foram determinados de acordo com o procedimento de exaustão de fósforo da solução de Claassen & Barber (1974). Assim, um dia antes do estudo de exaustão, foi definida a concentração inicial de fósforo para o período de absorção que se pretendia adotar, para abranger toda curva característica de absorção esperada. Após, as plantas foram colocadas em solução sem fósforo e com os demais nutrientes na metade da concentração original. Na manhã seguinte, de acordo com os testes preliminares, foi adicionado o fósforo. Em seguida, iniciou-se a retirada de alíquotas de 10 mL de cada vaso, a cada 30 minutos, durante 11 horas (8:00 até às 19:00 horas).

No dia seguinte, 25 horas após o início da exaustão (9:00 horas), foi coletada mais uma amostra de cada vaso, para a determinação do C_{min} , concentração de fósforo onde o influxo é zero. As plantas foram, então, colhidas, separando-se a parte aérea das raízes. A parte aérea foi colocada em estufa a 60°C por 72 horas. As raízes foram lavadas em água e secas em papel toalha para retirar a água aderida. Após, foram pesadas para obtenção da massa de matéria úmida e guardadas sob refrigeração, para posterior determinação do comprimento pelo método de Tennant (1975).

O influxo máximo de fósforo ($I_{\text{máx}}$) e o valor da constante (K_m) de Michaelis-Menten, concentração da solução onde o influxo é a metade do $I_{\text{máx}}$, foram calculados pela aproximação gráfico-matemática descrita por Ruiz (1985).

4.2.3. Verificação do modelo de Barber-Cushman

A verificação do modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) foi efetuada em computador, conforme descrito por Oates & Barber (1987), suprindo-se o programa, versão 3.5, com parâmetros de solo e planta para a predição da absorção de fósforo nos diferentes sistemas de preparo do solo. Esta predição foi comparada com absorção efetiva das plantas para a validação do modelo.

Para avaliar a absorção de fósforo pelo modelo de simulação para plantas de soja, crescendo em solos com diferentes características difusivas e sistemas de preparo, foram usadas análises de regressão linear e coeficientes de correlação simples entre a absorção de fósforo efetiva e a predita.

4.2.4. Simulações com o modelo utilizado

Uma vez validado o modelo, foram feitas simulações para identificar a importância relativa de alguns parâmetros de solo (conteúdo volumétrico de água no solo e concentração inicial de fósforo na solução do solo) e de planta (crescimento radicular) associados à liberação, ao suprimento e à absorção do fósforo. As variações foram de 0,50 a 2,0 vezes o valor de cada parâmetro, mantendo-se os demais constantes.

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Verificação do modelo utilizado

Os valores dos parâmetros de solo (camada de 0-20 cm) e dos parâmetros morfológicos e cinéticos de planta utilizados para operar o modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) encontram-se nos Apêndices 4, 5, 6 e 7.

Na comparação entre o fósforo absorvido pelas plantas de soja e a absorção predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981),

utilizando todos os solos (três repetições) e os dois sistemas de preparo, a análise de correlação indicou que o valor do coeficiente de correlação (r) foi de 0,74, o que pode ser considerado satisfatório ($r^2 = 0,55$) (Figura 30). Nesta situação, houve uma superestimação dos valores preditos ($b = 1,50$); além disso, a intercepção ($a = - 56,34$) passa longe da origem. Assim, os valores preditos pelo modelo são mais elevados (superestimados) em relação aos absorvidos pelas plantas de soja. Isso ocorreu devido aos valores preditos para o Latossolo Vermelho distrófico, principalmente, no sistema plantio direto e para uma das repetições, estarem muito superestimados. Caso esta repetição fosse retirada diminuiria a superestimação para somente 15% ($b = 1,15$) e diminuiria, também, o valor da intercepção ($a = - 23,25$), mas o valor do coeficiente de correlação ($r = 0,73$) permaneceria, praticamente, o mesmo.

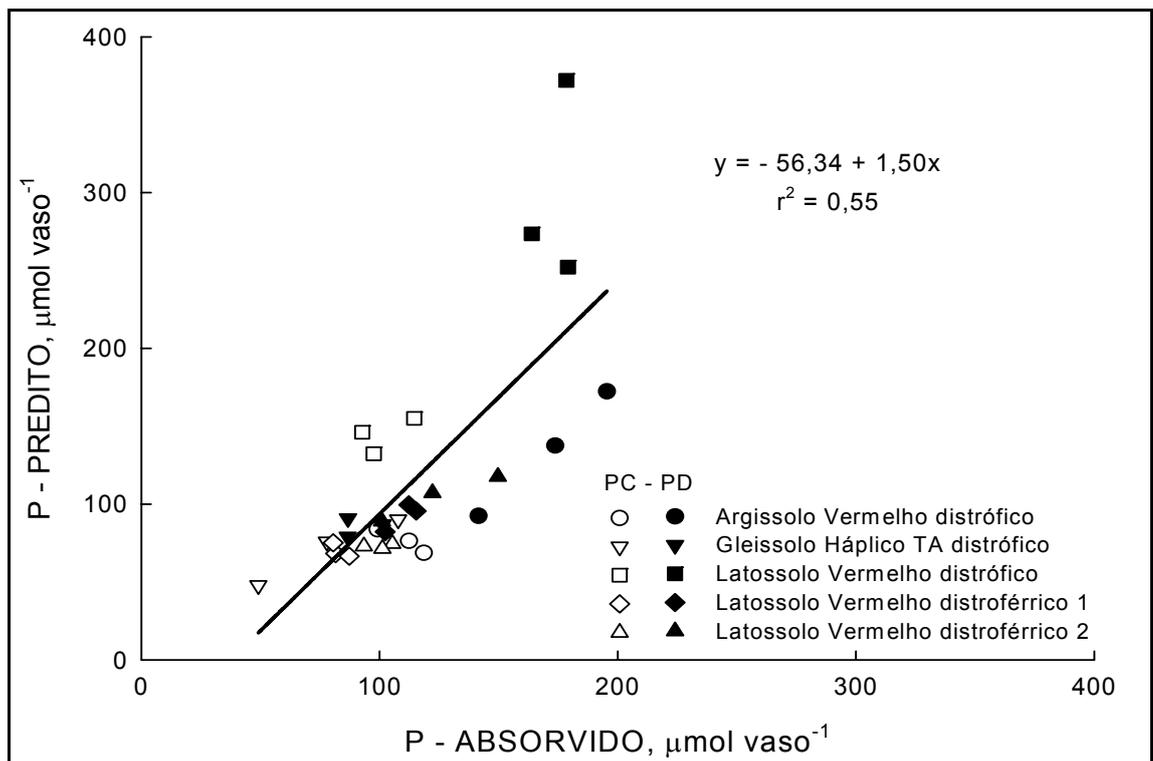


FIGURA 30. Relação entre fósforo absorvido por plantas de soja e a absorção predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) em cinco solos cultivados em diferentes sistemas de preparo.

Na avaliação em separado do Latossolo Vermelho distrófico (Figura 31), verificou-se que, embora tenha apresentado um coeficiente de correlação elevado ($r = 0,91$), houve uma elevada superestimação dos valores ($b = 2,10$) e a intercepção passou muito longe da origem ($a = - 67,24$). Assim, ficou

constatado o comportamento diferenciado deste solo em relação aos demais e que os valores deste solo são os responsáveis pela superestimação na análise conjunta de todos os solos (Figura 30). Os elevados valores preditos para o Latossolo Vermelho distrófico estão relacionados aos elevados valores encontrados para o fósforo no solo (Figuras 10 e 11) e, principalmente, na solução do solo (Figura 17), conforme mostrado no Estudo 1.

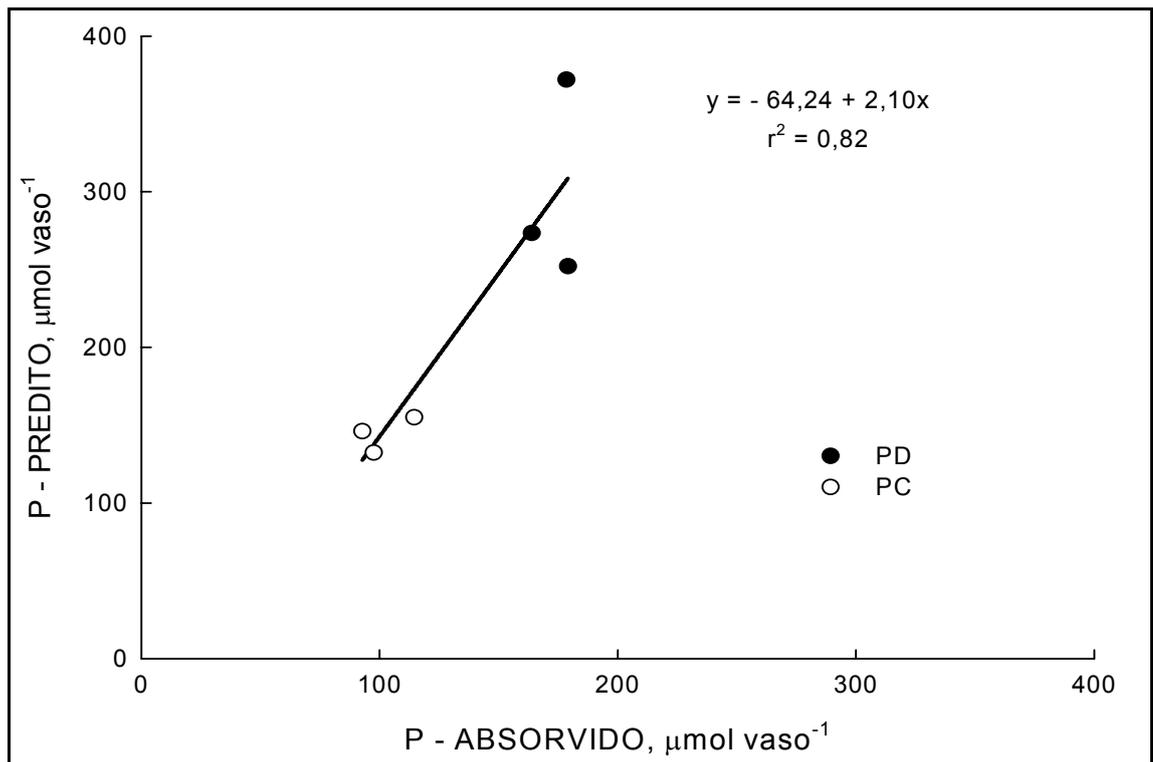


FIGURA 31. Relação entre fósforo absorvido por plantas de soja e a absorção predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) em um Latossolo Vermelho distrófico cultivado em diferentes sistemas de preparo.

A superestimação pelo modelo utilizado poderia estar relacionada com a alta difusividade de fósforo nessa condição, pois este solo, como assinalado anteriormente, apresentou teor muito elevado de fósforo no solo (Figuras 10 e 11, Estudo 1) e na solução do solo (Figura 17, Estudo 1). A superestimação ocorria quando o modelo não considerava a competição entre raízes pelo nutriente. A competição ocorre sempre que a distância (d) que o íon pode percorrer em determinado tempo (t) for maior do que a meia distância média entre raízes (r_1). No entanto, a versão do modelo utilizada neste trabalho já considera a possibilidade dessa ocorrência. Além disso, a distância que o íon

poderia percorrer em 20 dias de crescimento das plantas (Apêndice 3) é menor do que a distância média entre raízes nesse mesmo período (Figura 24, Estudo 1).

Considerando a falta de uma explicação consistente para o ocorrido com o Latossolo Vermelho distrófico, efetuou-se a comparação para os demais solos (Figura 32). Nesta situação, a correlação entre o fósforo absorvido pelas plantas de soja e o fósforo predito pelo modelo aumentou consideravelmente ($r = 0,90$). Entretanto, apesar da interceptação (valor a da equação de regressão) estar próxima da origem dos eixos, houve uma subestimação de 27% na predição das quantidades de fósforo absorvido pela soja ($b = 0,73$). Assim, pode-se afirmar que o modelo passou a predizer muito satisfatoriamente a absorção de fósforo pelas plantas de soja nos diferentes solos e sistemas de preparo.

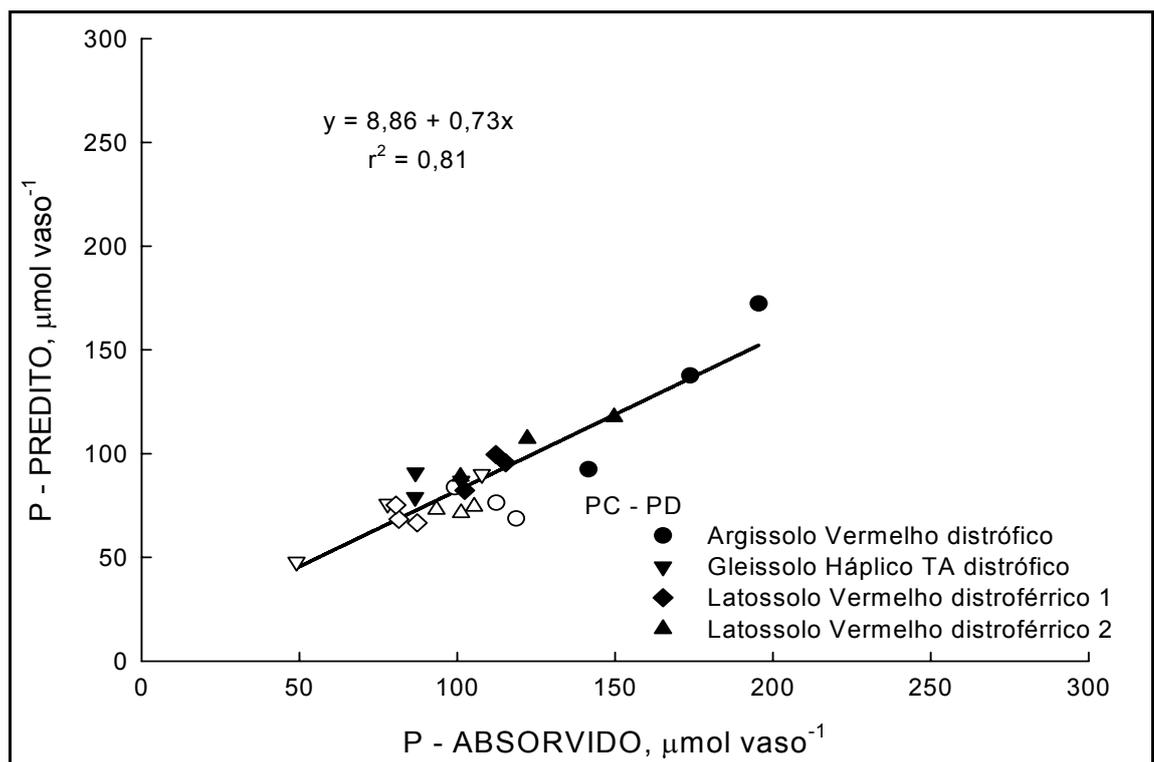


FIGURA 32. Relação entre fósforo absorvido por plantas de soja e a absorção predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) em quatro solos cultivados em diferentes sistemas de preparo.

A subestimação ocorrida poderia ser atribuída à contribuição dos pêlos radiculares; entretanto, espera-se pouca contribuição dos pêlos radiculares para a absorção de fósforo em solos bem supridos com esse

nutriente, e em condições de umidade adequada. Os solos estudados apresentaram teor de fósforo em condições acima do teor de suficiência, uma vez que, os valores se encontram na faixa Alto e Muito alto (CQFS-RS/SC, 2004) e o cultivo ocorreu com o solo mantido em capacidade de campo, ou seja, em condições adequadas de umidade. Além disso, pêlos radiculares pouco contribuem em absorção de fósforo quando a depleção (d) é relativamente grande em relação ao seu comprimento, ou seja, quando a distância difundida de fósforo no solo for maior do que a zona de depleção ao redor das raízes e pêlos (Barber, 1995).

Para a avaliação da contribuição da camada superficial do solo de 0-10 cm, cultivado no sistema plantio direto que, nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, é utilizada como diagnóstico para as recomendações da adubação e calagem (CQFS-RS/SC, 2004), calculou-se a absorção predita de fósforo pela utilização de parâmetros de solo e morfológicos de raízes dessa camada de solo (Tabela 2). Nesta situação, no sistema plantio direto, na média dos solos (três repetições), o valor predito devido à contribuição da camada de 0-10 cm foi 99% do valor da absorção predita total, calculado com os parâmetros de solo e de planta da camada de 0-20 cm. Observa-se que os valores preditos para o Gleissolo Háptico TA distrófico e para Latossolo Vermelho distrófico 1, no sistema plantio direto foram superestimados. Entretanto, mesmo, sem a inclusão desses solos, a camada de 0-10 cm teria uma contribuição de 88% do fósforo absorvido pelas plantas. Cabe salientar ainda que, mesmo no preparo convencional, a maior contribuição para a absorção de fósforo (71%) foi devida à camada de 0-10 cm.

Os resultados reforçam a eficiência do uso da camada superficial do solo (0-10 cm), no sistema plantio direto, para diagnosticar as recomendações de adubação e de calagem, uma vez que, os parâmetros dessa camada, são responsáveis por, praticamente, todo o fósforo absorvido pelas plantas de soja.

Maior contribuição da camada superficial do solo cultivado no sistema plantio direto era esperada, uma vez que, com a adubação anual localizada na camada superficial e a ausência de revolvimento do solo, a superfície de contato com os constituintes do solo e os sítios de adsorção de fósforo diminuem, propiciando maior concentração de fósforo na solução do solo (Figura 17, Estudo 1) e maior crescimento radicular (densidade de raiz)

(Figura 20, Estudo 1) nesta camada de solo. Tudo isso resultou em maior suprimento e absorção de fósforo (Figura 28, Estudo 1), além de maior crescimento das plantas (Figura 29, Estudo 1).

TABELA 2. Contribuição da camada superficial (0-10 cm) na absorção de fósforo total (0-20 cm) predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981), por plantas de soja cultivadas em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo

Solo	Sistema de preparo	Contribuição (P – predito)		
		0-10 cm	0-20 cm	0-10 cm
		... $\mu\text{mol vaso}^{-1}$...		%
Argissolo Vermelho distrófico	Direto	110	134	82
	Convencional	67	76	88
Gleissolo Háptico TA distrófico	Direto	108	86	126
	Convencional	67	71	94
Latossolo Vermelho distrófico	Direto	292	299	98
	Convencional	88	145	61
Latossolo Vermelho distroférico 1	Direto	113	92	123
	Convencional	40	70	57
Latossolo Vermelho distroférico 2	Direto	89	105	85
	Convencional	48	73	66
Média	Direto	142	143	99
	Convencional	62	87	71

Embora as questões levantadas, o modelo de Barber & Cushman (1981), de maneira geral, mostrou-se adequado para descrever a absorção de fósforo pelas plantas de soja, em solos com diferentes características difusivas e submetidos a diferentes sistemas de preparo. Existe, no entanto, a necessidade de um aprofundamento para um aperfeiçoamento do modelo, tendo em vista a característica de universalidade de sua proposta.

4.3.2. Simulações

As simulações foram feitas para identificar a importância relativa de parâmetros de solo (conteúdo volumétrico de água e concentração inicial de fósforo na solução) e de planta (crescimento radicular) associados à liberação, ao suprimento e à absorção do fósforo. Esta análise foi feita sistematicamente

por meio da multiplicação do parâmetro em estudo por 0,50; 0,75; 1,00; 1,50; 1,75 e 2,0 vezes o valor inicial, mantendo-se os demais parâmetros constantes, ou seja, com os valores inicialmente considerados.

Os valores iniciais dos parâmetros de solo e de planta usados nas simulações, correspondem a razão de variação igual a 1, os quais foram obtidos experimentalmente no Latossolo Vermelho distroférico 1, cultivado no sistema plantio direto, na camada de 0-20 cm, e estão apresentados na Tabela 3. O Latossolo Vermelho distroférico 1 foi escolhido por apresentar absorção de fósforo predita pelo modelo ($92 \mu\text{mol vaso}^{-1}$) próxima da obtida experimentalmente ($110 \mu\text{mol vaso}^{-1}$) (Apêndice 8), além de representar melhor as lavouras de soja do Estado do Rio Grande do Sul em relação, por exemplo, ao Gleissolo Háplico TA distrófico, cujos resultados foram mais similares.

TABELA 3. Parâmetros de solo e de planta (média de três repetições) utilizados como referência nas simulações e obtidos experimentalmente no Latossolo Vermelho distroférico 1 cultivado com soja no sistema plantio direto

Parâmetros do modelo	Valor inicial
Coeficiente de difusão efetiva (D_e)	$1,03\text{E-}09 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$
Poder tampão (b)	831
Concentração inicial de P em solução (C_{li})	$0,968 \mu\text{mol L}^{-1}$
Influxo médio de água V_0	$1,81\text{E-}06 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Meia distância entre raízes (r_1)	0,205 cm
Raio médio da raiz (r_0)	0,011 cm
Comprimento inicial de raiz (L_0)	20 cm
Taxa de crescimento de raiz (k)	$5,19\text{E-}06 \text{ cm s}^{-1}$
Influxo máximo ($I_{m\acute{a}x}$)	$2,00\text{E-}07 \mu\text{mol cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Constante de Michaelis-Menten (K_m)	$1,14 \mu\text{mol L}^{-1}$
Concentração mínima ($C_{m\acute{i}n}$)	$0,29 \mu\text{mol L}^{-1}$
Tempo de crescimento de raízes (t)	1789200 s

A interpretação das simulações deve ser feita com cautela, pois, na prática, a variação de um parâmetro de solo ou de planta, geralmente, afeta outros parâmetros. Por exemplo, o aumento na concentração de fósforo na

solução do solo, normalmente, é acompanhada pela diminuição do poder tampão e aumento do coeficiente de difusão efetivo de fósforo no solo.

1ª Simulação: Absorção de fósforo por plantas de soja em função do conteúdo volumétrico de água do solo (θ)

Na avaliação do conteúdo volumétrico de água no solo cultivado com plantas de soja, não foi verificada diferença entre os sistemas de preparo do solo, plantio direto e preparo convencional (Figura 13, Estudo 1). Estes resultados foram encontrados com o solo mantido em capacidade de campo. Entretanto, em cultivos no campo (lavouras sem irrigação) ocorrem situações distintas, que vão desde longos períodos de estiagem até períodos com precipitações excessivas. Variações no conteúdo volumétrico de água implicam em mudanças no fator de impedância (f - Equações 4 e 5), que, juntamente com ele, atuam no coeficiente de difusão do fósforo (D_e - Equação 3), e, assim, no suprimento de fósforo às raízes das plantas (dq/dt - Equação 1).

Na presente simulação, os valores do coeficiente de difusão de fósforo (D_e) foram recalculados em função da variação do conteúdo volumétrico de água no solo (θ) e dos novos valores do fator de impedância (f) (Apêndice 9). Depois disso, verificou-se a absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo em função da variação do conteúdo volumétrico de água no solo.

Observa-se (Figura 33) que, com o conteúdo volumétrico de água inicial ($\theta = 0,41$, razão de variação igual a 1), as plantas absorveram $94 \mu\text{mol}$ de fósforo por vaso e que, com a redução do conteúdo volumétrico de água do solo, esta absorção diminui e com o seu aumento, a absorção também aumenta. Assim, com um conteúdo volumétrico de água igual a $0,31 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (razão de variação igual a 0,75) a absorção de fósforo pelas plantas diminui para $76 \mu\text{mol vaso}^{-1}$, valor este 19% menor em relação ao inicial. Em uma situação mais extrema, com a redução do conteúdo volumétrico de água no solo diminuindo para $0,21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (50% do valor inicial), a absorção de fósforo diminui para $48 \mu\text{mol vaso}^{-1}$, 49% menor do que o valor encontrado na umidade volumétrica de $0,41 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ($94 \mu\text{mol vaso}^{-1}$) (Figura 33 e Apêndice 9).

Com o aumento da umidade volumétrica do solo ocorre um aumento na absorção de fósforo até atingir um máximo, em torno de $0,60 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (Figura 33), que é aproximadamente o valor da porosidade total deste solo (Figura 2, Estudo 1) Na prática, isso ocorre somente em condições de saturação do solo, quando a difusão do fósforo poderia atingir seu máximo e o incremento no conteúdo volumétrico de água não teria mais efeito positivo na absorção de fósforo. Nesta situação, haveria problema de falta de oxigênio para o sistema radicular.

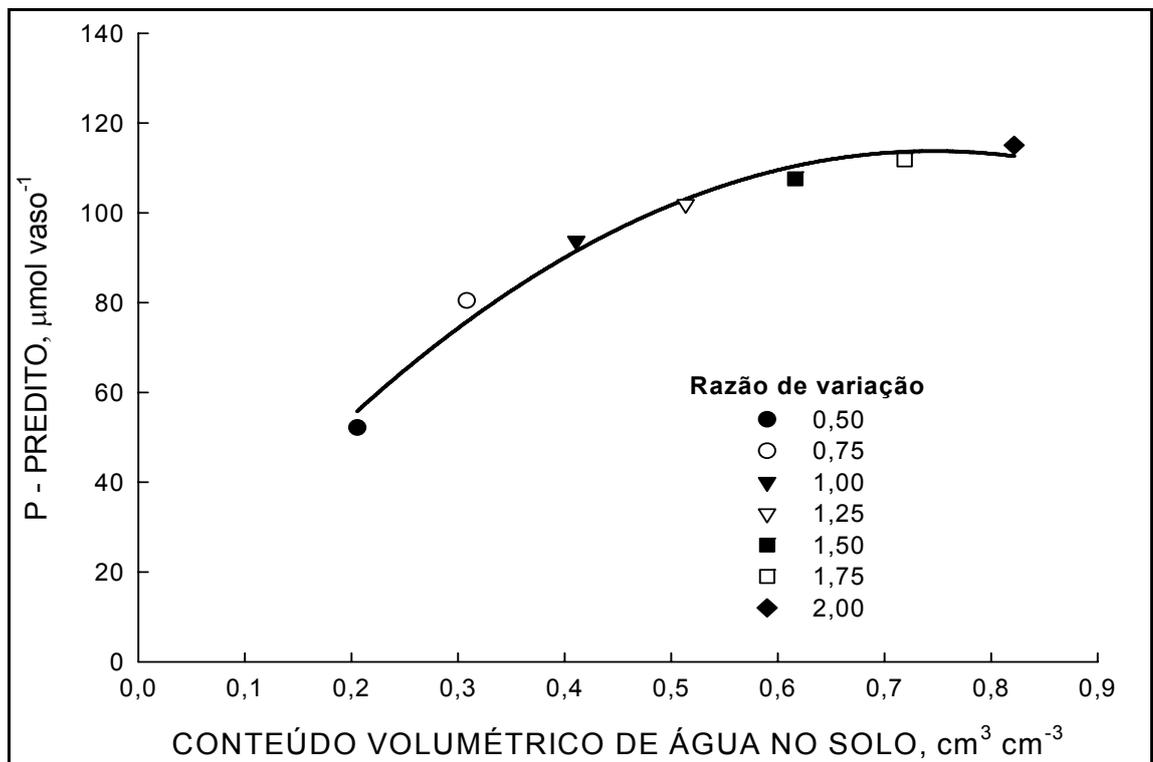


FIGURA 33. Relação entre o conteúdo volumétrico de água no solo e a absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) no Latossolo Vermelho distroférico 1 cultivado no sistema plantio direto.

A variação do conteúdo volumétrico de água mostrou a sua importância na absorção de fósforo pelas plantas de soja e que, quando em baixo conteúdo volumétrico de água no solo, as plantas terão baixa absorção de fósforo. A redução do conteúdo volumétrico de água do solo, além de afetar diretamente a difusão de fósforo até a superfície radicular, afeta também o crescimento do sistema radicular, diminuindo a área ativa de absorção de fósforo (Barber, 1995).

2ª Simulação: Absorção de fósforo por plantas de soja em função da concentração inicial de fósforo na solução do solo (C_{li})

No sistema plantio direto, ocorre aumento da disponibilidade de fósforo (Sá 1999; 2004; Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Tokura et al., 2002; Rheinheimer et al., 2003; Schlindwein, 2003), em relação ao preparo convencional. Entretanto, são poucos os estudos que analisam as conseqüências advindas das mudanças dos parâmetros que afetam o suprimento de fósforo às raízes na absorção total de fósforo pelas plantas. Assim, variou-se a concentração inicial de fósforo na solução do solo (C_{li}) pressupondo-se os demais parâmetros fixos, mesmo o poder tampão (b), com o propósito de analisar o efeito na absorção de fósforo pelas plantas de soja. A concentração inicial de fósforo na solução do solo foi recalculada para cada razão de variação (Apêndice 10).

O aumento da concentração de fósforo na solução do solo determinou um aumento na absorção de fósforo pelas plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981), sendo que, mesmo na maior concentração de fósforo, $1,94 \mu\text{mol L}^{-1}$ (razão de variação 2,00), a taxa máxima de absorção ($I_{\text{máx}}$) (Tabela 3) ainda não foi atingida. O valor predito pelo modelo para essa concentração foi de $190 \mu\text{mol vaso}^{-1}$, sendo proporcionalmente maior que o valor de $94 \mu\text{mol vaso}^{-1}$ absorvido com a concentração de fósforo na solução de $1,21 \mu\text{mol L}^{-1}$ (razão de variação 1,00) (Figura 34 e Apêndice 10).

Em uma situação prática, com o aumento do fósforo na solução do solo no sistema plantio direto, haveria também diminuição do valor do poder tampão de fósforo do solo, devido à saturação dos sítios de adsorção, o que resultaria proporcionalmente, em maior aumento de fósforo na solução do solo do que na fase sólida e aumentaria o suprimento desse nutriente às raízes.

Observa-se, também, que pequenas variações na concentração de fósforo na solução do solo têm significativo efeito na absorção pela planta. Por exemplo, se a concentração de fósforo na solução fosse reduzida em 20%, passando de $0,97 \mu\text{mol L}^{-1}$, valor inicial, para $0,78 \mu\text{mol L}^{-1}$, a absorção de fósforo pelas plantas diminuiria de $94 \mu\text{mol L}^{-1}$ para $70 \mu\text{mol L}^{-1}$, uma redução

de 26%. Com a diminuição do fósforo na solução do solo ocorre um decréscimo no coeficiente de difusão do fósforo e no gradiente de concentração, com conseqüente diminuição do suprimento e da absorção de fósforo pelas plantas.

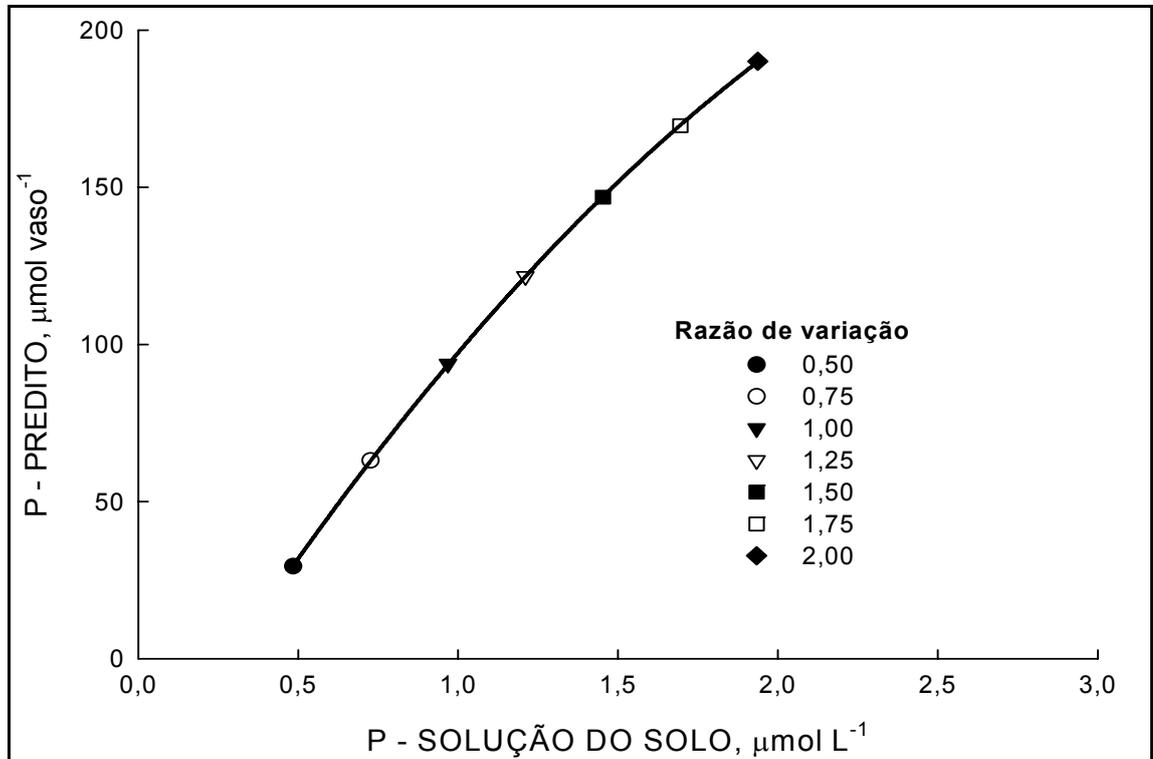


FIGURA 34. Relação entre a concentração inicial de fósforo na solução do solo e a absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) no Latossolo Vermelho distroférico 1 cultivado no sistema plantio direto.

3ª Simulação: Absorção de fósforo por plantas de soja em função do crescimento radicular (L)

No sistema plantio direto o fósforo é aplicado na camada superficial do solo, diminuindo a superfície de contato com os constituintes do solo. O cultivo sem revolvimento diminui os sítios de adsorção de fósforo, aumentando a sua disponibilidade (Sá 1999; 2004; Rheinheimer & Anghinoni, 2001; Tokura et al., 2002; Rheinheimer et al., 2003; Schlindwein, 2003) e favorecendo o crescimento e a área superficial de raiz. As raízes das plantas, de maneira

geral, se desenvolvem mais densamente nos locais em que há maior suprimento de fósforo (Klepker & Anghinoni, 1993).

Sabendo da importância do sistema radicular para a absorção do fósforo, variou-se o crescimento radicular (L), pressupondo-se os demais parâmetros fixos, para averiguar o seu efeito na absorção total de fósforo pelas plantas de soja. Os valores do influxo médio de água (v_0), da meia distância entre raízes e da taxa de crescimento de raiz foram recalculados em função das razões de variação e encontram-se no Apêndice 11.

A relação entre o crescimento de raiz e a absorção de fósforo demonstrou que, com o aumento do crescimento de raiz, ocorre um aumento quase linear na absorção de fósforo pelas plantas de soja (Figura 35). Este resultado ratifica a importância da magnitude do sistema radicular para o suprimento e absorção de fósforo pelas plantas. Quando o crescimento de raiz aumenta, ocorre um aumento nos valores da taxa de crescimento de raiz (k) e, não havendo competição entre raízes, o volume de solo explorado aumenta, refletindo-se diretamente no aumento de absorção de fósforo pelas plantas (Barber, 1995).

Neste caso, o modelo de Barber & Cushman (1981) já considera a competição radicular representada pela meia distância entre raízes adjacentes (r_1), dando uma contribuição importante no sentido de diminuir a superestimação de absorção de nutrientes observada nos modelos anteriores. Assim, mesmo que ocorresse densidade de raízes muito superior da normal, a competição entre elas limitaria a absorção do nutriente, indicando que, mesmo no maior crescimento de raiz (Figura 35), os valores encontrados de absorção de fósforo são adequados.

Considerando que, em uma dada situação adversa (compactação do solo ou toxidez por alumínio) ocorra uma restrição ao crescimento de raiz de 20% do valor inicial (razão de variação 1). Assim, o comprimento de raiz de 110 m, diminuiria para 88 m e a absorção de fósforo de $95 \mu\text{mol vaso}^{-1}$ diminuiria para $79 \mu\text{mol vaso}^{-1}$, ou seja, com a redução de 20% do crescimento de raiz haveria uma redução de 17% na absorção de fósforo pelas plantas (Figura 35). Isto indica que mudanças no crescimento de raiz se refletem diretamente na absorção de fósforo, mostrando que a ocorrência de fatores limitantes ao

crescimento de raízes poderá causar grandes prejuízos para as plantas em razão da importância do sistema radicular para a absorção do fósforo.

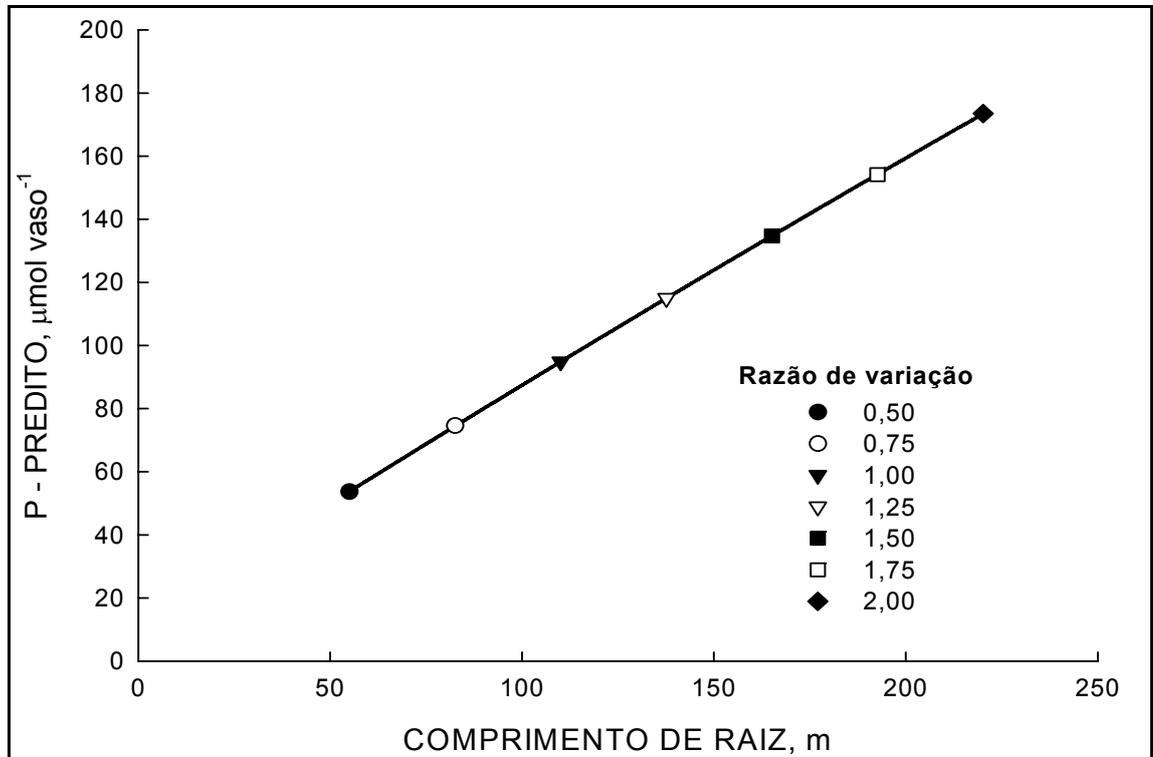


FIGURA 35. Relação entre o crescimento de raiz e a absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) no Latossolo Vermelho distroférico 1 cultivado no sistema plantio direto.

Em uma situação inversa da anterior, em que, por melhorias das condições físicas e químicas do solo, houvesse um incremento de 20% no crescimento de raiz, este passaria de 110 m para 132 m, e a absorção de fósforo de $95 \mu\text{mol vaso}^{-1}$, aumentaria para $111 \mu\text{mol vaso}^{-1}$, ou seja, haveria um aumento de 17% na absorção de fósforo pelas plantas de soja (Figura 35). A magnitude do sistema radicular desempenha um importante papel na habilidade da planta em absorver água e nutrientes.

Os resultados das simulações com parâmetros de solo (conteúdo volumétrico de água e concentração de fósforo na solução) e de planta (crescimento radicular), envolvidos na simulação de absorção de fósforo, pelo modelo de Barber & Cushman (1981) (Figuras 33, 34 e 35), demonstraram a importância da manutenção do conteúdo volumétrico de água e da concentração de fósforo na solução do solo em níveis adequados e de um

sistema radicular das plantas bem desenvolvido para possibilitar um adequado suprimento e absorção de fósforo pelas plantas. Demonstraram, também, que os modelos mecanísticos podem ser uma ferramenta útil para estimar o efeito da variação de parâmetros de solo e de planta na absorção de nutrientes pelas plantas.

4.4. Conclusões

O modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981), de maneira geral, mostra-se satisfatório para descrever a absorção de fósforo pelas plantas de soja crescendo em solos com diferentes características difusivas e submetidos a diferentes sistemas de preparo.

O modelo mecanístico superestima a absorção de fósforo pelas plantas de soja no Latossolo Vermelho distrófico típico, principalmente, quando no sistema plantio direto. Já sem a inclusão desse solo, subestima a absorção predita de fósforo pelas plantas de soja.

As simulações com parâmetros de solo e de planta demonstram a importância da manutenção do conteúdo volumétrico de água e da concentração de fósforo na solução do solo em níveis adequados e de um sistema radicular das plantas bem desenvolvido para possibilitar um adequado suprimento e absorção de fósforo pelas plantas. Aumento no conteúdo volumétrico de água, na concentração de fósforo na solução do solo e no crescimento radicular resultam em aumento no suprimento e na absorção de fósforo pelas plantas; já, redução nesses parâmetros diminui os mesmos.

5. CONCLUSÕES GERAIS

Os valores dos atributos químicos e físicos do solo, além de caracterizar os diferentes sistemas de preparo de solo, possibilitam afirmar que, independentemente do sistema utilizado, de maneira geral, não há limitações ao desenvolvimento das plantas.

Os atributos físicos, densidade, macroporosidade e porosidade total do solo, de maneira geral, não apresentam diferenças consistentes com os sistemas de preparo do solo. Já, o índice de estabilidade de agregados e a microporosidade do solo apresentam maiores valores na camada superficial do sistema plantio direto em relação ao preparo convencional.

Os atributos químicos do solo, carbono orgânico total, pH em água, cálcio e magnésio trocáveis e fósforo extraível do solo, de maneira geral, apresentam maiores valores nos solos cultivados em sistema plantio direto em relação aos cultivados em preparo convencional.

A aplicação superficial dos adubos fosfatados e o não revolvimento do solo no sistema plantio direto resultam em maior biodisponibilidade de fósforo em relação ao preparo convencional.

A umidade volumétrica e o fator de impedância, de maneira geral, não diferem entre os sistemas de preparo de solo, porém a maior concentração de fósforo na solução do solo e o menor poder tampão, no sistema plantio direto, determinam um maior suprimento de fósforo às raízes das plantas de soja, em relação ao preparo convencional.

As plantas de soja cultivadas no sistema plantio direto apresentam maior crescimento radicular (comprimento e área superficial de raiz), predominantemente na camada de 0-10 cm, em função do maior suprimento de fósforo. Maior suprimento e maior crescimento de raízes determinam uma

maior absorção de fósforo e produção de matéria seca nas plantas de soja cultivadas no sistema plantio direto, em relação às cultivadas em preparo convencional.

O modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981), de maneira geral, mostra-se satisfatório para descrever a absorção de fósforo pelas plantas de soja crescendo em solos com diferentes características difusivas e submetidos a diferentes sistemas de preparo. O modelo superestima a absorção de fósforo pelas plantas de soja no Latossolo Vermelho distrófico típico, principalmente, quando no sistema plantio direto. Nos demais solos, o modelo subestima a absorção predita de fósforo pelas plantas de soja.

O estudo com parâmetros de solo e de planta, envolvidos na simulação de absorção de fósforo, pelo modelo de Barber & Cushman (1981), demonstra a possibilidade de quantificar a contribuição de cada um dos parâmetros de solo e de planta no processo de suprimento e absorção de nutrientes pelas plantas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABICHEQUER, A.D.; BOHNEN, H.; ANGHINONI, I. Absorção, translocação e utilização de fósforo por variedades de trigo submetidas à toxidez de alumínio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.2, p.373-378, 2003.

ANGHINONI, I. Fatores que interferem na eficiência da adubação fosfatada. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Ed.) **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. p.537-562.

ANGHINONI, I. Uso de fósforo pelo milho afetado pela fração do solo fertilizada com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, n.3, p.349-353, 1992.

ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus application rate and distribution in the soil and phosphorus uptake by corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.5, p.1041-1044, 1980a.

ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influenced by phosphorus supply. **Agronomy Journal**, Madison, v.72, n.4, p.685-688, 1980b.

ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. Predicting the most efficient phosphorus placement in corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, n.5, p.1016-1020, 1980c.

ANGHINONI, I.; BISSANI, C.A. Fósforo e adubos fosfatados. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.) **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Genesis, 2004. p.117-137.

ANGHINONI, I.; MEURER, E.J. Eficiência de absorção de nutrientes pelas raízes. In: WORKSHOP SOBRE SISTEMA RADICULAR: METODOLOGIAS E ESTUDO DE CASOS, 1999, Aracajú. **Anais...** Aracajú: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 1999.

ANGHINONI, I.; MEURER, E.J. Suprimento de nutrientes pelo solo e sua absorção pelas plantas. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.) **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Genesis, 2004. p.33-43.

BALIGAR, V.C.; BARBER, S.A. Use of K/Rb ratio to characterize potassium uptake by plants roots growing in soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.42, n.4, p.575-579, 1979.

BALIGAR, V.C.; FAGERIA, N.K. Plant nutrient efficiency: Towards the second paradigm. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CARVALHO, J.G. (Ed.) **Inter-relação Fertilidade do solo, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: SBCS:UFLA, 1999. p.183-204.

BARBER, S.A. Influence of the plant root on ion movement in soil. In: CARSON, E.W. (Ed.) **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. Cap.18, p.525-564.

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach**. 2.ed. New York. John Wiley & Sons, 1995. 414p.

BARBER, S.A.; CUSHMAN, J.H. Nitrogen uptake model for agronomic crops. In: ISKANDAR, I.K. (Ed.) **Modeling waste water renovation-land treatment**. New York: John Wiley Interscience, 1981. p.382-409.

BARRACLOUGH, P.B.; TINKER, P.B. The determination of ionic diffusion coefficients in field soils. I. Diffusion coefficients in sieved soils in relation to water content and bulk density. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.32, n.2, p.225-236, 1981.

BARROW, N.J. A mechanistic model for describing the sorption and desorption of phosphate by soil. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.34, n.4, p.733-750, 1983.

BARROW, N.J. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.38, p.183-230, 1985.

BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M.R.; CARDOSO, L.S.; SILVA, M.I.G da. **Clima da Estação Experimental da UFRGS (e região de abrangência)**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. 77p.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J.M. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.1, p.91-95, 2000.

BISSANI, C.A.; TEDESCO, M.J.; CAMARGO, F.A.O.; MIOLA, G.L.; GIANELLO, C. Anion-exchange resins and iron oxide-impregnated filter paper as plant available phosphorus indicators in soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.33, n.7-8, p.1119-1129, 2002.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy: Soil Science Society of America, 1986. p.363-375.

BORKERT, C.M.; BARBER, S.A. Soybean shoot and root growth and phosphorus concentration as affected by phosphate placement. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.49, n.1, p.152-155, 1985.

BRAGAGNOLO, N.; MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por palha de trigo e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, n.3, p.369-374, 1990.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 431p. (DNPEA. Boletim técnico, 30).

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregados e qualidade de agregados de latossolos roxos, submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, n.1, p.99-105, 1990.

CLAASSEN, N.; BARBER, S.A. A method for characterizing the relation between nutrient concentration and flux into roots of intact plants. **Plant Physiology**, Lancaster, v.54, n.4, p.564-568, 1974.

CLAASSEN, N.; SYRING, K.M.; JUNGK, A. Verification of a mathematical model by simulating potassium uptake from soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.95, n.2, p.209-220, 1986.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – CFS-RS/SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3.ed. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT: SBCS - Núcleo Regional Sul, 1995. 223p.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS-RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre: SBCS - Núcleo Regional Sul, 2004.

CONTE, E; ANGHINONI, I; RHEINHEIMER, D.S. Frações de fósforo acumuladas em Latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.5, p.893-900, 2003.

COREY, R.B.; SCHULTE, E.E. Factors affecting the availability of nutrients to plants. In: WALSH, L.M.; BEATON, J.D. (Ed.) **Soil testing and plant analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1973. p.23-33.

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v.64, n.3-4, p.197-214, 1995.

DALLA ROSA, A. **Práticas mecânicas e culturais na recuperação de características físicas de solos degradados pelo cultivo - solo Santo Ângelo (Latosolo Roxo distrófico)**. 1981. 136f. Dissertação (Mestrado) -

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1981.

DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p.443-461.

EMBRAPA. **Clima de Passo Fundo – Normais Climatológicas**. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/pesquisa/agromet/index.htm>. Acesso em: 25/04/06.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa – Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa-CNPQ, 1999. 412p.

ERNANI, P.R.; BARBER, S.A. Uso de um modelo mecanístico para prever a disponibilidade de fósforo do solo afetada pela aplicação de sais de cálcio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, n.1, p.89-93, 1992.

FEPAGRO. **Contém informações institucionais, técnicas, notícias, projetos, publicações e serviços**. Disponível em: <http://www.fepagro.rs.gov.br>. Acesso em: 26/03/03.

FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. II. Significance of root radius, root hairs and cation-anion balance for phosphorus influx in seven plant species. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.132, n.2, p.261-272, 1991.

FOX, R.L.; KANG, B.T. Influence of phosphorus fertilizer placement and fertilization rate on maize nutrition. **Soil Science**, Baltimore, v.125, n.1, p.34-40, 1978.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 231f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GERLOFF, G.C.; GABELMAN, W.H. Genetic basis of inorganic plant nutrition. In: LAÜCHLI, A.; BIELSKI, R.L. (Ed.) **Inorganic Plant Nutrition**. New York: Springer, 1983. p.453-480.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.32, n.2, p.180-186, 1968.

GUERRA, J.G.M.; ALMEIDA, D.L.; SANTOS, G.A.; FERNANDES M.S. Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.4, p.291-299, 1996.

HALMARK, W.B.; BARBER, S.A. Root growth and morphology, nutrient uptake, and nutrient status of soybeans as affected by soil K and bulk density. **Agronomy Journal**, Madison, v.73, n.5, p.779-782, 1981.

HIRA, G.S.; SINGH, N.T. Observed and predicted rates of phosphorus diffusion in soils of varying bulk density and water content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.41, n.3, p.537-540, 1977.

HODGES, T.K. Ion absorption by plant roots. **Advances in Agronomy**, New York, v.25, p.163-297, 1973.

HUE, N.V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. **Soil Science**, Baltimore, v.152, n.6, p.463-471, 1991.

IPAGRO. Seção de Ecologia Agrícola. **Atlas Agroclimático do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 1989. 210p.

ITOH, S.; BARBER, S.A. Phosphorus uptake by six plant species as related to root hairs. **Agronomy Journal**, Madison, v.75, n.3, p.457-461, 1983.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Modos de adubação de nutrientes e rendimentos de milho em diferentes preparos de solo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.2, n.1, p.79-86, 1996.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Phosphate uptake and corn root distribution as affected by fertilizer placement and soil tillage. **Agronomy (Trends in Agricultural Science)**, Trivandrum, v.1, p.111-115, 1993.

KURTZ, L.T.; QUIRK, J.P. Phosphate adsorption and phosphate fractions in field soils of varying histories of phosphate fertilization. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v.16, n. 3, p.403-412, 1965.

LARSEN, S. Soil phosphorus. **Advances in Agronomy**, New York, v.19, p.151-210, 1967.

LU, N.; BARBER, S.A. Effect of the fraction of the root system supplied by P on P uptake and growth uptake characteristics of wheat roots. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.8, p.799-809, 1985.

MACHADO, M.I.C.S.; BRAUNER, J.L.; VIANNA, A.C.T. Formas de fósforo na camada arável de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.3, p.331-336, 1993.

MENGEL, D.B.; BARBER, S.A. Development and distribution of the corn root system under field conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v.66, n.3, p.341-344, 1974.

MERTEN, G. **Rendimento de grãos e distribuição do sistema radicular das culturas sob diferentes sistemas de manejo de um Oxissolo (Latossolo Roxo distrófico)**. 1988. 178f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

MEURER, E.J.; RHEINHEIMER, D.S; BISSANI, C.A. Fenômenos de sorção em solos. In: MEURER, E.J. (Ed.) **Fundamentos de química do solo**. 2.ed. Porto Alegre: Genesis, 2004. p.131-179.

MEURER, E.J.; ANGHINONI, I. Utilização de modelo mecanístico para a avaliação da disponibilidade de potássio em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.18, n.1, p.73-80, 1994.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v.27, n.1. p.31-36, 1962.

NOLLA, A. **Crítérios para a calagem no sistema plantio direto**. 2003. 169f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV - Departamento de Solos, 1999. 399p.

NYE, P.H.; TINKER, P.B. **Solute movement in the soil-root system**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1977. 342p.

OATES, K.; BARBER, S.A. Nutrient uptake: A microcomputer program to predict nutrient absorption from soil by roots. **Journal of Agronomy Education**, West Lafayette, v.16, n.2, p.65-68, 1987.

OLSEN, S.R.; WATANABE, F.S.; DANIELSON, R.E. Phosphorus absorption by corn roots as affected by moisture and phosphorus concentration. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.25, n.4, p.289-294, 1961.

PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, New York, v.30, n.1, p.1-50, 1978.

PARSONS, R. **Handbook of electrochemical constants**. New York: Academic Press, 1959.

PETRERE, C.; ANGHINONI, I. Alterações de atributos químicos no perfil do solo pela calagem superficial em campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.4, p.885-895, 2001.

RHEINHEIMER, D.S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems under subtropical conditions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.34, n.15-16, p.2339-2354, 2003.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição de fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.1, p.151-160, 2001.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Sorção de fósforo em função do teor inicial e de sistemas de manejo de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.1, p.41-49, 2003.

RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J.; ANGHINONI, I. Depleção do fósforo inorgânico de diferentes frações provocadas pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.2, p.345-354, 2000.

RUIZ, H.A. Estimativa dos parâmetros cinéticos Km e Vmáx por uma aproximação gráfico-matemática. **Revista Ceres**, Viçosa, v.32, n.179, p.79-84, 1985.

RUIZ, H.A.; FERNANDES, B.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. Efeito da umidade do solo sobre o volume e o conteúdo de fósforo no exsudato xilemático de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.1, p.39-42, 1988a.

RUIZ, H.A.; FERNANDES, B.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. FERREIRA, P.A. Efeito do conteúdo de água sobre os níveis críticos de fósforo em dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.12, n.1, p.43-48, 1988b.

SÁ, J.C.M. Adubação fosfatada no sistema plantio direto. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Ed.) **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAFOS, 2004. p.201-222.

SÁ, J.C.M.; Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CARVALHO, J.G. (Ed.) **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. Lavras: SBCS: UFLA, 1999. p.267-319.

SÁ, J.C.M.; PETRERE, C. Desenvolvimento radicular da cultura do milho em solos sob plantio direto da Região dos Campos Gerais e do Planalto Gaúcho. In: CURSO SOBRE MANEJO DO SOLO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1995, Castro. **Anais...** Castro: Fundação ABC, 1995. p.172-204.

SCHENK, M.K.; BARBER, S.A. Potassium and phosphorus uptake by corn genotypes grown in the field as influenced by root characteristics. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.54, n.1, p.65-76, 1980.

SCHICK, J.; BERTOL, I.; BATISTELA, O.; BALBINOT JUNIOR, A.A. Erosão hídrica em Cambissolo Húmico alumínico submetido a diferentes sistemas de preparo e cultivo do solo: I. Perdas de solo e água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.2, p.427-436, 2000.

SCHLINDWEIN, J.A. **Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e de potássio em solos sob plantio direto**. 2003. 169f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SECCO, D. **Estados de compactação de dois Latossolos sob plantio direto e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas**. 2003. 108f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

SELLES, F.; KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, J.E.; ZENTNER, R.P.; FAGANELLO, A. Distribution of phosphorus fractions in Brazilian Oxisol under different tillage systems. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.44, n.1, p.23-34, 1997.

SIBANDA, H.M.; YOUNG, S.D. Competitive adsorption of humus acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.37, n.2, p.197-204, 1986.

SIQUEIRA, O.F.; SCHERER, E.G.; TASSINARI, G.; ANGHINONI, I.; PATELLA, I.F.; TEDESCO, M.J.; MILAN, P.A.; ERNANI, P.R. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1987. 100p.

TAYLOR, H.M.; BRAR, G.S. Effect of soil compaction on root development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.19, n.2-3, p.111-119, 1991.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).

TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **Journal of Ecology**, London, v.63, n.6, p.995-1001, 1975.

TISDALL, J.M.; COCKROFT, B.; UREN, N.C. The stability of soil aggregates as affected by organic materials, microbial activity and physical disruption. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.16, n.1, p.9-17, 1978.

TOKURA, A.M.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KURIHARA, C.H.; ALOVISI, A.A. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.10, p.1467-1476, 2002.

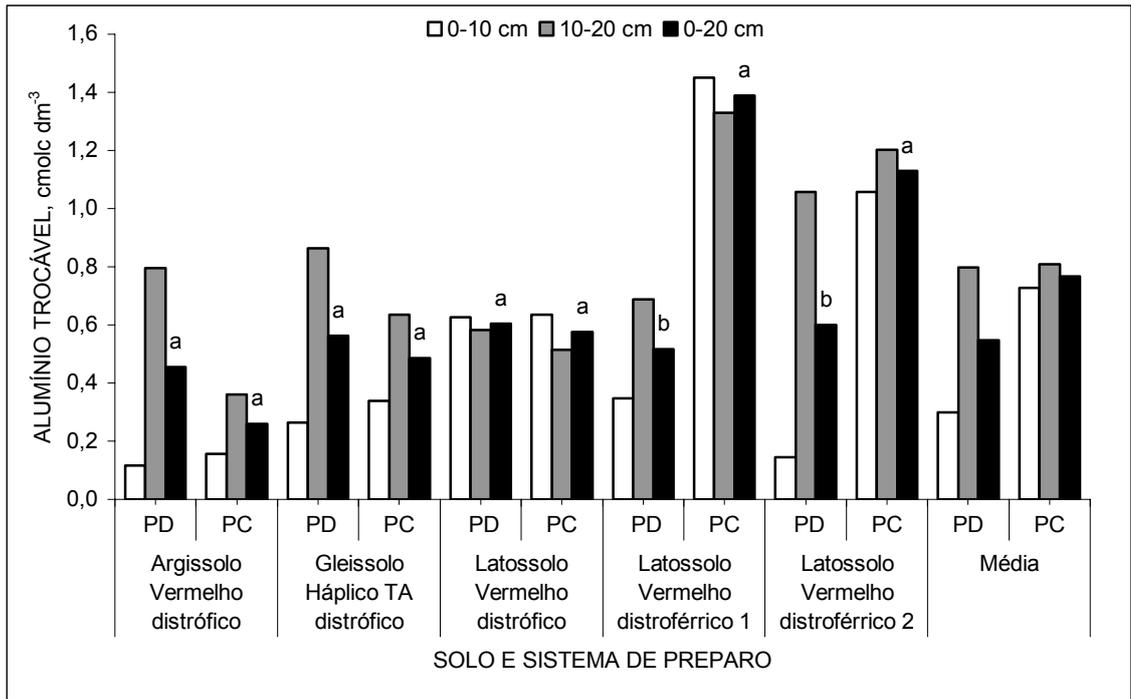
TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.4, p.573-581, 1998.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Transaction of the American Society of Agricultural Engineering**, Saint Joseph, v.4, n.2, p.242-246, 1961.

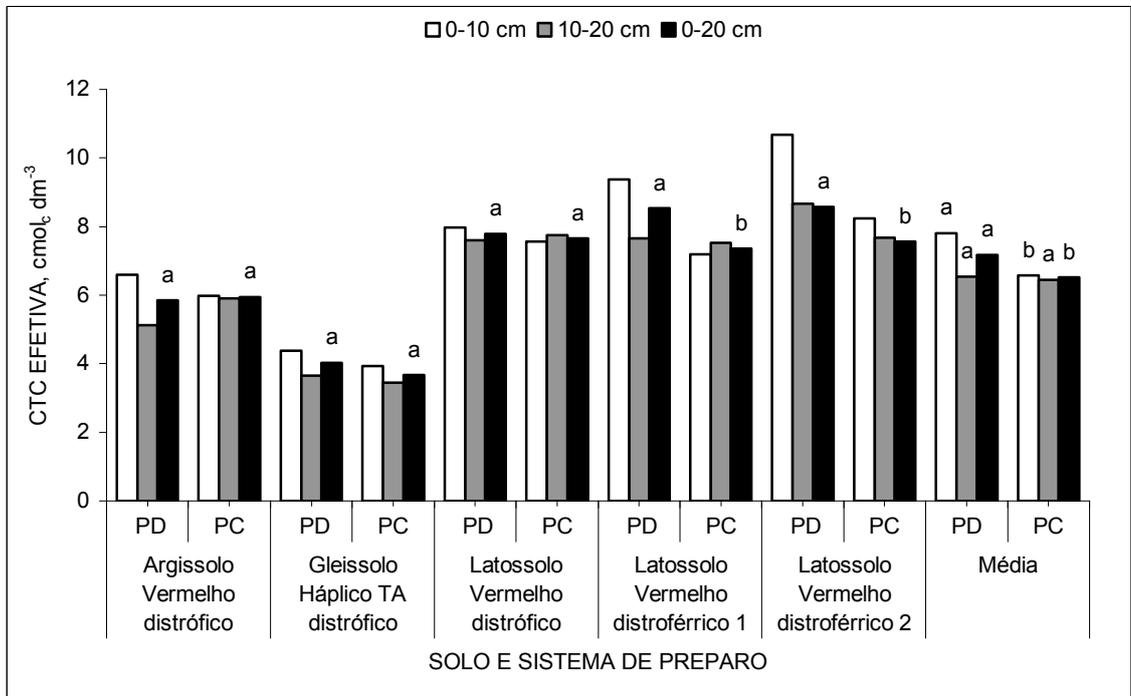
WILLIAMS, R.F. The effects of phosphorus supply on the rates of intake of phosphorus and nitrogen upon certain aspects of phosphorus metabolism in gramineous plants. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.1, p.333-361, 1948.

ZHANG, J.; BARBER, S.A. Maize root distribution between phosphorus-fertilized and unfertilized soil. **Soil Science Society of America journal**, Madison, v.56, n.5, p.819-822, 1992.

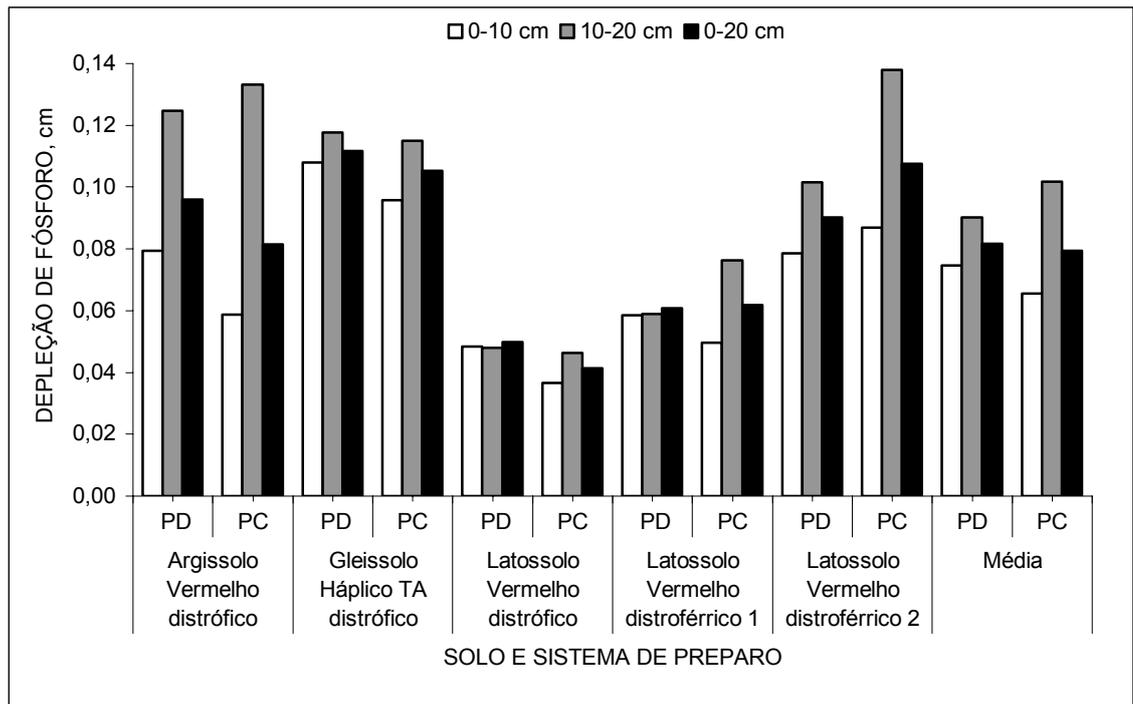
7. APÊNDICES



APÊNDICE 1. Alumínio trocável em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.



APÊNDICE 2. CTC efetiva em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo. Letras diferentes em uma mesma camada, dentro de cada solo e na média dos solos, indicam diferença entre os sistemas de preparo pelo teste de Tukey a 5%.



APÊNDICE 3. Extensão de depleção de fósforo (d) na solução do solo em torno das raízes de soja em diferentes camadas, sistemas de preparo e tipos de solo.

APÊNDICE 4. Parâmetros de solo usados no modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) para prever o fósforo absorvido pelas plantas de soja, em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo

Solo	Sistema de preparo		D_e $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	b	C_{li} $\mu\text{mol L}^{-1}$
Argissolo Vermelho distrófico	Direto	R ₁	2,82E-09	280	1,10
		R ₂	2,89E-09	309	1,10
		R ₃	1,99E-09	474	1,51
Gleissolo Háplico TA distrófico	Convencional	R ₁	2,62E-09	345	1,05
		R ₂	1,66E-09	432	1,08
		R ₃	1,28E-09	651	1,02
Latossolo Vermelho distrófico	Direto	R ₁	4,43E-09	232	1,46
		R ₂	3,07E-09	419	1,24
		R ₃	2,94E-09	412	1,23
Latossolo Vermelho distrófico	Convencional	R ₁	3,19E-09	217	1,51
		R ₂	3,73E-09	270	1,72
		R ₃	2,35E-09	439	1,35
Latossolo Vermelho distroférico 1	Direto	R ₁	9,11E-10	1043	3,22
		R ₂	5,48E-10	1101	2,52
		R ₃	6,28E-10	908	2,46
Latossolo Vermelho distroférico 1	Convencional	R ₁	4,98E-10	1449	1,56
		R ₂	4,97E-10	1274	1,21
		R ₃	4,40E-10	1428	1,20
Latossolo Vermelho distroférico 2	Direto	R ₁	1,05E-09	840	1,08
		R ₂	1,00E-09	836	1,02
		R ₃	1,04E-09	818	0,81
Latossolo Vermelho distroférico 2	Convencional	R ₁	0,87E-09	985	0,81
		R ₂	1,32E-09	742	0,86
		R ₃	1,01E-09	912	0,81
Média	Direto	R ₁	2,36E-09	590	1,02
		R ₂	2,06E-09	440	1,25
		R ₃	2,41E-09	544	1,14
Média	Convencional	R ₁	3,09E-09	338	0,83
		R ₂	3,99E-09	303	0,83
		R ₃	2,63E-09	456	0,79
Média	Direto		2,01E-09	616	1,48
	Convencional		1,95E-09	683	1,11

APÊNDICE 5. Parâmetros morfológicos de plantas de soja usados no modelo mecânico de Barber & Cushman (1981) para prever o fósforo absorvido pelas plantas de soja, em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo

Solo	Sistema de preparo		r_1 cm	r_0 cm	k cm s ⁻¹
Argissolo Vermelho distrófico	Direto	R ₁	0,220	0,013	5,12E-06
		R ₂	0,181	0,013	5,34E-06
		R ₃	0,198	0,012	5,25E-06
	Convencional	R ₁	0,241	0,012	5,02E-06
		R ₂	0,255	0,012	4,96E-06
		R ₃	0,228	0,013	5,08E-06
Gleissolo Háptico TA distrófico	Direto	R ₁	0,320	0,015	4,70E-06
		R ₂	0,266	0,014	4,91E-06
		R ₃	0,302	0,016	4,77E-06
	Convencional	R ₁	0,398	0,014	4,47E-06
		R ₂	0,385	0,017	4,49E-06
		R ₃	0,298	0,015	4,78E-06
Latossolo Vermelho distrófico	Direto	R ₁	0,191	0,013	5,28E-06
		R ₂	0,194	0,012	5,26E-06
		R ₃	0,198	0,012	5,24E-06
	Convencional	R ₁	0,230	0,012	5,07E-06
		R ₂	0,192	0,013	5,26E-06
		R ₃	0,205	0,012	5,20E-06
Latossolo Vermelho distroférico 1	Direto	R ₁	0,225	0,012	5,10E-06
		R ₂	0,207	0,011	5,17E-06
		R ₃	0,184	0,010	5,32E-06
	Convencional	R ₁	0,227	0,012	5,08E-06
		R ₂	0,207	0,010	5,19E-06
		R ₃	0,222	0,011	5,11E-06
Latossolo Vermelho distroférico 2	Direto	R ₁	0,231	0,011	5,07E-06
		R ₂	0,216	0,012	5,14E-06
		R ₃	0,230	0,012	5,07E-06
	Convencional	R ₁	0,212	0,012	5,16E-06
		R ₂	0,220	0,013	5,12E-06
		R ₃	0,216	0,012	5,14E-06
Média	Direto		0,224	0,012	5,12E-06
	Convencional		0,249	0,013	5,01E-06

APÊNDICE 6. Absorção de água (influxo de água na superfície da raiz - v_0) e de fósforo e massa de matéria seca de plantas de soja em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo

Solo	Sistema de preparo		v_0 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	P-absorvido $\mu\text{mol vaso}^{-1}$	M. Seca g vaso^{-1}
Argissolo Vermelho distrófico	Direto	R ₁	2,03E-06	142	2,73
		R ₂	2,09E-06	174	3,38
		R ₃	2,51E-06	195	3,40
Gleissolo Háplico TA distrófico	Convencional	R ₁	2,77E-06	112	2,47
		R ₂	2,12E-06	119	2,48
		R ₃	2,13E-06	99	2,46
Latossolo Vermelho distrófico	Direto	R ₁	2,40E-06	87	2,41
		R ₂	3,14E-06	87	2,51
		R ₃	2,90E-06	101	2,51
Latossolo Vermelho distrófico	Convencional	R ₁	1,06E-06	49	1,32
		R ₂	1,92E-06	78	1,71
		R ₃	2,28E-06	108	2,49
Latossolo Vermelho distroférico 1	Direto	R ₁	3,31E-06	178	3,51
		R ₂	2,59E-06	164	2,96
		R ₃	2,40E-06	179	3,16
Latossolo Vermelho distroférico 2	Convencional	R ₁	2,34E-06	93	2,39
		R ₂	2,25E-06	115	2,96
		R ₃	1,88E-06	98	2,64
Latossolo Vermelho distroférico 1	Direto	R ₁	2,11E-06	112	2,33
		R ₂	1,82E-06	115	2,47
		R ₃	1,51E-06	102	2,03
Latossolo Vermelho distroférico 2	Convencional	R ₁	1,42E-06	82	2,01
		R ₂	1,24E-06	81	1,82
		R ₃	1,18E-06	87	2,05
Média	Direto	R ₁	3,28E-06	101	2,15
		R ₂	3,22E-06	150	3,14
		R ₃	3,06E-06	122	2,76
Média	Convencional	R ₁	2,02E-06	93	2,56
		R ₂	2,33E-06	105	2,67
		R ₃	2,96E-06	101	2,63
Média	Direto		2,56E-06	134	2,76
	Convencional		2,01E-06	95	2,31

APÊNDICE 7. Parâmetros cinéticos de plantas de soja usados no modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981) para prever o fósforo absorvido por plantas de soja cultivadas em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo (média de cinco repetições)

Parâmetros cinéticos	Valor
Constante de Michaelis-Menten - K_m	1,14 $\mu\text{mol L}^{-1}$
Concentração mínima - $C_{\text{mín}}$	0,29 $\mu\text{mol L}^{-1}$
Influxo máximo - $I_{\text{máx}}$	2,00E-07 $\mu\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

APÊNDICE 8. Absorção de fósforo, observada e predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981), por plantas de soja cultivadas em diferentes sistemas de preparo e tipos de solo (média de três repetições)

Solo	Sistema de preparo	Absorção de fósforo	
		Observada	Predita
	 $\mu\text{mol vaso}^{-1}$	
Argissolo Vermelho distrófico	Direto	170	134
	Convencional	110	76
Gleissolo Háptico TA distrófico	Direto	92	86
	Convencional	78	71
Latosolo Vermelho distrófico	Direto	174	299
	Convencional	102	145
Latosolo Vermelho distroférico 1	Direto	110	92
	Convencional	83	70
Latosolo Vermelho distroférico 2	Direto	124	105
	Convencional	100	73
Média	Direto	134	143
	Convencional	95	87

APÊNDICE 9. Absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981), em função da variação do conteúdo volumétrico de água (θ) no Latossolo Vermelho distroférico 1 cultivado no sistema plantio direto

Razão de variação	θ $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	f	D_e $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$	P - predito $\mu\text{mol vaso}^{-1}$
0,50	0,21	0,03	1,38E-10	52
0,75	0,31	0,13	5,84E-10	80
1,00	0,41	0,23	1,03E-09	94
1,25	0,51	0,34	1,48E-09	102
1,50	0,62	0,44	1,92E-09	108
1,75	0,72	0,54	2,37E-09	112
2,00	0,82	0,64	2,82E-09	115

APÊNDICE 10. Absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981), em função da variação da concentração inicial de fósforo na solução (C_{ii}) no Latossolo Vermelho distroférico 1 cultivado no sistema plantio direto

Razão de variação	C_{ii} $\mu\text{mol L}^{-1}$	P - predito $\mu\text{mol vaso}^{-1}$
0,50	0,48	29
0,75	0,73	63
1,00	0,97	94
1,25	1,21	122
1,50	1,45	147
1,75	1,69	170
2,00	1,94	190

APÊNDICE 11. Absorção de fósforo por plantas de soja predita pelo modelo mecanístico de Barber & Cushman (1981), em função da variação do crescimento de raiz (L) no Latossolo Vermelho distroférico 1 cultivado no sistema plantio direto

Razão de variação	L m	v_0 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$	r_1 cm	k cm s^{-1}	P - predito $\mu\text{mol vaso}^{-1}$
0,50	55	3,18E-06	0,288	4,81E-06	54
0,75	83	2,26E-06	0,235	5,04E-06	75
1,00	110	1,77E-06	0,203	5,20E-06	95
1,25	138	1,47E-06	0,182	5,33E-06	115
1,50	165	1,26E-06	0,166	5,43E-06	135
1,75	193	1,10E-06	0,154	5,51E-06	154
2,00	220	9,80E-07	0,144	5,59E-06	174

8. RESUMO BIOGRÁFICO

ALAERTO LUIZ MARCOLAN, filho de Luiz Marcolan Primo e Lourdes Largo Marcolan, nasceu em 10 de agosto de 1976, em Constantina, Rio Grande do Sul.

Em 1989, completou seus estudos de primeiro grau na Escola Estadual de 1º e 2º Graus São José, em Constantina. Em 1990, ingressou no Colégio agrícola de Frederico Westphalen - UFSM, recebendo o título de Técnico em Agropecuária em dezembro de 1993.

Em 1995, ingressou no Curso de Agronomia da Universidade Federal de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul, graduando-se como Engenheiro Agrônomo em janeiro de 2000. Durante os cinco anos de graduação atuou como bolsista de iniciação científica na área de Fertilidade do Solo sob a orientação do professor Doutor Carlos Alberto Ceretta.

Em março de 2000, iniciou o curso de Mestrado em Ciência do Solo no Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, concluindo-o em março de 2002. Período em que iniciou o curso de Doutorado em Ciência do Solo no mesmo Programa, concluindo-o em junho de 2006.

Atualmente, é membro da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.