

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO EM MANEJO DO SOLO**

EVANDRO LUIZ SCHONINGER

**CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE FÓSFORO PELA SOJA E POR
PLANTAS DE COBERTURA DO SOLO**

LAGES, SC

2011

EVANDRO LUIZ SCHONINGER

**CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE FÓSFORO PELA SOJA E POR
PLANTAS DE COBERTURA DO SOLO**

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de mestre no Curso de
Pós-Graduação em Manejo do Solo da
Universidade do Estado de Santa Catarina –
UDESC.

Orientador: Dr. Luciano Colpo Gatiboni
Co-orientador: Ph. D. Paulo Roberto Ernani
Co-orientador: Dr. Paulo Cesar Cassol

**LAGES, SC
2011**

Ficha catalográfica elaborada pela Bibliotecária
Renata Weingärtner Rosa – CRB 228/14ª Região
(Biblioteca Setorial do CAV/UDESC)

Schoninger, Evandro Luiz

Capacidade de absorção de fósforo pela soja e por plantas de
cobertura do solo. / Evandro Luiz Schoninger ; orientador:
Luciano Colpo Gatiboni – Lages, 2011.
67f.

Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Agroveterinárias /
UDESC

1. Cinética de absorção.
2. Fosfatos naturais.
3. Rizosfera.
4. Ciclagem de fósforo.
- I. Título.

CDD – 631.4

EVANDRO LUIZ SCHONINGER

**CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DE FÓSFORO PELA SOJA E POR
PLANTAS DE COBERTURA DO SOLO**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre no Curso de Pós-Graduação em Manejo do Solo da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC.

Aprovada em: _____/_____/_____

Homologada em: _____/_____/_____

Banca Examinadora:

Orientador/presidente: Dr. Luciano Colpo Gatiboni (UDESC/Lages – SC)

Dr. Luciano Colpo Gatiboni
Coordenador Técnico do Curso de Mestrado
em Manejo do Solo e Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em Ciências
Agrárias – UDESC/Lages – SC

Co-orientador/membro: Ph. D. Paulo Roberto Ernani (UDESC/Lages – SC)

Membro: Dr. Gustavo Brunetto
(UFSC/Florianópolis – SC)

Dr. Cleimon Eduardo do Amaral Dias
Diretor Geral do Centro de Ciências
Agroveterinárias – UDESC/Lages - SC

Lages, Santa Catarina, 23 de fevereiro de 2011

Dedico aos meus pais Ademar Osvaldo Schoninger e Esther Beatriz Schaurich Schoninger, meus irmãos Everton Miguel Schoninger e Elizabeth Cristina Schoninger, e a minha companheira e namorada Carmelice Boff de Almeida

AGRADECIMENTOS

À UDESC pela oportunidade de cursar o Mestrado e a CAPES pela concessão da bolsa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Manejo do solo pelo ensino e condições de trabalho.

Ao Professor Luciano Colpo Gatiboni pela orientação no decorrer do curso e também pela amizade e pelos conhecimentos adquiridos através da convivência com este professor exemplar.

Ao Professor Paulo Roberto Ernani pela co-orientação e participação na banca.

Ao aluno de doutorado Clovisson e aos bolsistas Gustavo e Daniel pelo auxílio na condução dos trabalhos.

Aos professores Paulo Roberto Ernani, Jaime Antonio de Almeida, Jackson Adriano Albuquerque, Paulo Cesar Cassol, David Miqueluti e Luciano Colpo Gatiboni pelo conhecimento adquirido nas disciplinas ministradas.

À Carmelice Boff de Almeida pelo companheirismo e atenção desprendida nos momentos difíceis.

Ao meu irmão Everton pelo auxílio na coleta do solo utilizado na condução dos trabalhos.

Aos colegas da Pós-Graduação pela amizade e pelos bons momentos de convivência, em especial a Patrícia, Jovani, Clovisson, Jaqueline e Ronaldir.

Ao Professor Gustavo Brunetto pela colaboração científica através do tempo desprendido na correção da dissertação e participação da banca.

Enfim, a todos que colaboraram para minha formação pessoal e profissional, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

SCHONINGER, Evandro Luiz. **Capacidade de absorção de fósforo pela soja e por plantas de cobertura do solo.** 2011. 67f. Dissertação (Mestrado em Manejo do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, SC. 2011.

Os objetivos deste trabalho foram: (a) avaliar a capacidade de absorção de fósforo (P) da soja, da braquiária, do sorgo e do milheto em condições de baixa disponibilidade deste nutriente; (b) identificar quais as principais formas de P no solo que são absorvidas pelas plantas e; (c) estimar os parâmetros cinéticos de absorção de P para cada espécie. Foram realizados três experimentos, no Centro de Ciências Agroveterináris da Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV/UDESC), nos anos de 2009 e 2010. O primeiro experimento constou do desenvolvimento de plantas (soja, braquiária, sorgo e milheto) em solos adubados com fontes de fertilizantes fosfatados (fosfato natural, superfosfato triplo, e ausência de aplicação de P), arranjados em um fatorial 4x3, utilizando o delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Neste experimento, avaliou-se a produção de massa seca das plantas e o teor de P no tecido. O segundo experimento foi composto por cinco tratamentos (quatro espécies de plantas e uma testemunha) com quatro repetições, sob o delineamento experimental de blocos ao acaso. Avaliou-se as alterações no pH do solo e nas formas de P do fracionamento de Hedley em diferentes distâncias das raízes (camadas entre 0-14 mm), após 45 dias de desenvolvimento das plantas. No terceiro experimento, estimou-se os parâmetro cinéticos de absorção de P (I_{max} , K_m e $C_{mín}$) de cada uma das espécies após 23 dias de desenvolvimento em solução nutritiva e em câmara de crescimento, utilizando-se o delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições. No primeiro experimento, a soja não respondeu à adubação fosfatada, apresentando mais massa seca de tecido e acúmulo de P no tecido, comparativamente as demais espécies. A aplicação de superfosfato triplo promoveu maior produção de massa seca de tecido para todas as gramíneas, quando comparada às demais fontes de P. No segundo experimento, a soja apresentou maiores valores de pH do solo nas camadas de 1-2 e 2-3 mm de distância das raízes em relação à testemunha. O sorgo diminuiu os teores de P extraído por resina de troca de íons (P_{resina}) na camada de 0-1 mm e todas as gramíneas diminuíram os teores de P extraído por bicarbonato de sódio 0,5 mol L⁻¹ (P_{bic}) na camada de 0-1 mm, demonstrando assim que o P_{resina} e o P_{bic} são as principais formas de P que tamponam o P absorvido pelas plantas. No terceiro experimento, apenas a braquiária apresentou I_{max} superior à soja, e não houve diferença entre o valor de K_m das plantas. Menor $C_{mín}$ foi encontrado para a soja em relação ao sorgo.

Palavras-chave: Cinética de absorção. Fosfatos naturais. Rizosfera. Ciclagem de fósforo.

ABSTRACT

SCHONINGER, Evandro Luiz. **Capacity of phosphorus uptake by soybeans and by soil cover crops.** 2011. 67f. Dissertation (Mestrado em Manejo do Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias, Lages, SC. 2011.

This work aimed: (a) to evaluate the phosphorus (P) uptake by soybean, brachiaria, sorghum and millet in soils with low availability of this nutrient; (b) to identify the main forms of soil P that are absorbed by plants and; (c) to estimate the kinetic parameters of P uptake for each species. Three experiments were conducted at Santa Catarina State University, Brazil, in the years of 2009 and 2010. The first experiment consisted of plant development under the application of phosphate fertilizers to the soil. Treatments consisted of growth of four plant species (soybean, brachiaria, sorghum and millet) as affected by sources of P (rock phosphate, triple superphosphate, and a control). The four replications were arranged in a 4x3 factorial using a completely randomized design. It was evaluated the plant dry matter yield and P content in the tissue. In the second experiment, we assessed changes on soil pH and on forms of P by Hedley's fractionation at different distances from the roots (layers between 0-14 mm) of different plants after 45 days of growth. Treatments consisted of four species plus a control, with the four replicates allocated in a completely randomized block design. In the third experiment, we estimated the kinetic parameters of P uptake (I_{max} , K_m and C_{min}) of each species after 23 days of growth in solution culture in a growth chamber, using a completely randomized design with four replications. In the first experiment, soybean did not respond to fertilization, but presented the highest dry mass yield and the greatest accumulation of P in the tissue. Triple superphosphate was the P source that caused the greatest dry matter yield for all plant species. Soybean had higher soil pH values in the layers 1-2 and 2-3 mm than control. Sorghum decreased the levels of P_{resin} in the layer of 0-1 mm, and all grasses decreased the level of P_{bic} in the layer of 0-1 mm, showing that the P_{resin} and P_{bic} are the main forms of P absorbed by the plants. The K_m values did not differ among plant species; the I_{max} was higher for brachiaria than for soybean, and soybean presented C_{min} smaller than that of sorghum.

Keywords: Uptake kinetics. Rock phosphates. Rhizosphere. Phosphorus cycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Representação esquemática do sistema de manutenção de umidade por ascensão capilar e divisão das colunas de PVC com as telas de nylon para impedir o crescimento radicular das plantas	35
Figura 2 -	Variação (Δ) em relação à testemunha ($y = 0$) nos valores de pH (CaCl_2) (a) e nos teores de P_{resina} (b), P_{bic} (c), P_{obic} (d), P_{ihid} (e), P_{ohid} (f), P_{HCl} (g) e P_{residual} (h) proporcionados pelo cultivo de plantas, em diferentes camadas do solo a partir da rizosfera. Símbolos circulados indicam diferença significativa das respectivas espécies em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro.....	39
Figura 3 -	Taxa de absorção de fósforo de soja, milheto, braquiária e sorgo em função da concentração de fósforo na solução	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raízes (MSR), relação raiz/parte aérea (RRPA), teor de fósforo na parte aérea (PPA), teor de fósforo nas raízes (PR), fósforo acumulado no tecido (PAC) e fósforo disponível no solo (PDS) em função de fontes de fósforo e espécies vegetais cultivadas	26
Tabela 2 -	Interação entre fontes de fósforo e espécies vegetais para as variáveis massa seca de parte aérea (MSPA), relação raiz/parte aérea (RRPA) e teor de fósforo nas raízes (PR).....	28
Tabela 3 -	Peso de cem sementes (PCS), teor de fósforo nas sementes (TPS) e conteúdo de fósforo nas sementes (PS) de cada uma das espécies vegetais avaliadas.....	29
Tabela 4 -	Fósforo acumulado no tecido após o cultivo (PAC), peso de cem sementes (PCS), teor de fósforo na semente (TPS), quantidade de fósforo por semente (QPS) e porcentagem do fósforo acumulado proveniente da semente (PPS) nas espécies avaliadas.....	38
Tabela 5 -	Valores de massa fresca de raízes (MFR), massa seca de raízes (MSR), massa seca de parte aérea (MSPA), relação raiz/parte aérea (RRPA), comprimento de raízes (CR), raio médio de raízes (RMR), área de raízes (AR) e volume de raízes (VR) de soja, milheto, braquiária e sorgo	47
Tabela 6 -	Valores de influxo máximo de fósforo (I_{max}), concentração de fósforo na solução em que ocorre a metade do I_{max} (K_m), concentração mínima de fósforo na solução para que ocorra absorção (C_{min}) e relação K_m/I_{max} estimados para soja, milheto, braquiária e sorgo	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1	MORFOLOGIA RADICULAR	13
2.2	PARÂMETROS CINÉTICOS DE ABSORÇÃO DE FÓSFORO	14
2.3	PLANTAS DE COBERTURA NO CERRADO	15
2.4	FOSFATOS NATURAIS	16
2.5	RIZOSFERA E SOLUBILIZAÇÃO DE FOSFATOS NATURAIS	17
2.6	FORMAS DE FÓSFORO NA RIZOSFERA	18
3	CAPÍTULO I: FOSFATO REATIVO DE ARAD E DESENVOLVIMENTO INICIAL DE SOJA, SORGO, MILHETO E BRAQUIÁRIA	21
3.1	RESUMO	21
3.2	ABSTRACT	22
3.3	INTRODUÇÃO	22
3.4	MATERIAL E MÉTODOS	24
3.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
3.6	CONCLUSÕES	30
4	CAPÍTULO II: MODIFICAÇÕES NO pH E FORMAS DE FÓSFORO NA RIZOSFERA DE DIFERENTES ESPÉCIES.....	31
4.1	RESUMO	31
4.2	ABSTRACT	32
4.3	INTRODUÇÃO	32
4.4	MATERIAL E MÉTODOS	34
4.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.6	CONCLUSÕES	41
5	CAPÍTULO III: CINÉTICA DE ABSORÇÃO DE FÓSFORO E MORFOLOGIA DO SISTEMA RADICULAR DE BRAQUIÁRIA, MILHETO, SORGO E SOJA	42
5.1	RESUMO	42
5.2	ABSTRACT	43
5.3	INTRODUÇÃO	43
5.4	MATERIAL E MÉTODOS	45
5.5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.6	CONCLUSÕES	51
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	52
	REFERÊNCIAS	54
	APÊNDICES	67

1 INTRODUÇÃO GERAL

O cultivo da soja no Cerrado brasileiro ocorre predominantemente em solos que, sob condições naturais, são caracterizados por limitações químicas ao desenvolvimento de plantas. Dentre tais limitações, a deficiência de fósforo é uma das que mais eleva os custos de produção da soja, porque os solos apresentam grande adsorção de P, preferencialmente em formas pouco reversíveis, fazendo-se necessária a aplicação de elevadas doses de fertilizantes fosfatados para que se consiga suprir adequadamente a cultura.

As principais fontes de P utilizadas no país são os fosfatos solúveis, que apresentam grande eficiência em curto prazo, porém, são de elevado custo de produção. Visando contornar este problema, tem-se utilizado fosfatos naturais como fonte de P para diversas culturas, principalmente nas perenes, devido às características de solubilização lenta e gradual de P. O modelo de solubilização destes fosfatos é dependente de sua origem, dos atributos do solo e da espécie vegetal cultivada. Dentre os diversos fosfatos naturais utilizados, os fosfatos de cálcio de origem sedimentar estão entre os mais solúveis. No entanto, também necessitam de um ambiente ácido e com remoção de P e Ca do meio para que haja constante solubilização. Assim, estas características de acidez e dreno de P e Ca são, de maneira geral, dependentes do solo onde se aplicam estes fosfatos. Contudo, é sabido que a elevada acidez do solo bem como a deficiência de Ca são também limitantes ao desenvolvimento das plantas e, por isso, a calagem tem sido prática rotineira em áreas agrícolas, mesmo naquelas com a aplicação de fosfatos naturais.

Com o intuito de encontrar atributos favoráveis P à dissolução de fosfatos naturais em solos corrigidos, diversos trabalhos recentes tem objetivado estudar a rizosfera, região esta que devido ao desenvolvimento de plantas poderá favorecer a solubilização desses fosfatos. A magnitude com que estes atributos se manifestam é dependente do tamponamento do solo e da espécie vegetal implantada, onde neste último atuam a capacidade da planta em acidificar o solo próximo às raízes (por absorção diferencial entre cátions e ânions ou pela exsudação de ácidos orgânicos), e a capacidade desta em absorver Ca e P em baixas concentrações destes no solo, em especial para o P.

No Cerrado brasileiro, espécies como o milheto, o sorgo e a braquiária têm se destacado quanto à produção de biomassa e, por isso, vêm sendo utilizadas como plantas de cobertura no período de entressafra da soja, tornando interessante a avaliação das mesmas quanto a capacidade em adquirir P do solo. Assim, através da identificação das espécies com maior habilidade de solubilização de fosfatos naturais e absorção de P, pode-se dar preferência para tais a fim de compor um sistema de rotação/sucessão com a cultura da soja, pois ao absorverem P de formas menos disponíveis e incorporarem este nutriente em formas orgânicas, as plantas de cobertura poderão favorecer a cultura principal após a mineralização do P absorvido.

Neste sentido, este trabalho teve como objetivos: (a) avaliar quais espécies apresentam maior eficiência de absorção de P em solo adubado com fosfato natural; (b) verificar quais formas de P são preferencialmente acessadas pelas plantas e; (c) estimar os parâmetros cinéticos de absorção deste nutriente para cada espécie avaliada.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Diversas espécies de plantas apresentam capacidades distintas em absorver P do solo, quando este nutriente estiver presente em baixas concentrações na solução. Esta capacidade depende de diversos fatores, tais como: da morfologia do sistema radicular; dos parâmetros cinéticos de absorção de P; do tipo de fertilizante fosfatado aplicado ao solo e; das alterações nos atributos do solo proporcionadas pelo cultivo de plantas, principalmente na rizosfera.

2.1 MORFOLOGIA RADICULAR

A absorção de fósforo pelas raízes é determinada, dentre muito fatores, pelas características morfológicas do sistema radicular (FURLANI, 1988; MACHADO e FURLANI, 2004), que são representadas pelo comprimento, volume, superfície e raio das raízes, e dos pelos radiculares (SCHENK e BARBER, 1979). A exploração de um grande volume de solo pelas raízes torna-se importante (VILELA e ANGHINONI 1984), principalmente em condições de disponibilidade reduzida de P (RÖMER et al., 1989), pois como o coeficiente de difusão de P no solo é extremamente baixo (ERNANI e BARBER, 1990) e as raízes têm capacidade de absorver P mais rapidamente do que ele pode ser fornecido por difusão (MARTINEZ et al., 1993), há formação de uma zona de depleção de P nos solos, que poderá ser contornada em parte, pela presença de um amplo sistema radicular. No entanto, condições de baixa disponibilidade de P no solo podem proporcionar modificações, principalmente na arquitetura das raízes e nas taxas de crescimento das mesmas em relação à parte aérea. Em plantas deficientes em P, as raízes retêm mais P e translocam menos que as plantas com teor adequado deste nutriente (SCHJORRING e JENSÉN, 1987), e como consequência, o crescimento do sistema radicular é mantido às expensas do crescimento da parte aérea, levando ao aumento da razão raiz/parte aérea, característica da deficiência de P (CLARKSON, 1985). Porém, em alguns casos foram observadas diminuições no desenvolvimento do sistema radicular, tal como apresentado por Troughton (1977), onde

houve redução na taxa de produção de raízes novas de falso centeio perene em solo deficiente em P.

Diferenças morfológicas neste sistema podem proporcionar maior eficiência na absorção de P para certos grupos de plantas, pois em diversos trabalhos têm sido observada maior tolerância a baixos níveis de P no solo por parte das gramíneas quando comparadas às leguminosas (CARADUS, 1980; DE MARIA e CASTRO, 1993; FOLONI et al., 2008). A maior eficiência das gramíneas foi explicada, além das diferenças na morfologia do sistema radicular, pelo aumento da absorção de P por unidade de raiz, do acúmulo de P no sistema radicular (CARADUS, 1980) e da razão raiz/parte aérea (FÖHSE et al., 1988).

2.2 PARÂMETROS CINÉTICOS DE ABSORÇÃO DE FÓSFORO

Existem três parâmetros cinéticos de absorção de P passíveis de serem determinados através do cultivo de plantas em solução nutritiva, que segundo Horn et al. (2006), determinam, juntamente com outros fatores, a eficiência de absorção de nutrientes pelas plantas. São eles: o influxo máximo de absorção (I_{max}), a concentração de nutriente em que ocorre a metade do I_{max} (K_m), e a concentração mínima na solução a partir da qual a planta não absorve mais esse nutriente (C_{min}). Alterações em qualquer um desses parâmetros poderão proporcionar maior ou menor eficiência de absorção de fósforo. Aumentos nos valores de K_m e C_{min} significam redução na eficiência de absorção de nutrientes (NIELSEN e BARBER, 1978), enquanto a elevação no valor do I_{max} implica em maior eficiência dessa absorção. Uma planta ideal deveria ter alto I_{max} , e baixos valores para K_m e C_{min} (HORN et al., 2006).

Variações nesses parâmetros foram observadas entre espécies e cultivares (CARADUS, 1980; FÖHSE et al., 1988; ALVES et al., 2002; MACHADO e FURLANI, 2004; HORN et al., 2006), evidenciando assim, diferentes respostas destas em condições de variada disponibilidade de P nos solos. No entanto, em situações de estresse nutricional de P, poderá haver alterações em alguns desses parâmetros visando a nutrição adequada da planta. O aumento na velocidade máxima de absorção induzido pelo estresse nutricional representa a primeira resposta das plantas para manter o influxo de nutrientes e preservar o crescimento (GLASS e SIDDIQI, 1984; CLARKSON, 1985; MUCHHAL e RAGHOTHAMA, 1999). Lee (1982), Läuchli (1987) e Martinez et al. (1993) observaram que a taxa de absorção de P por raízes de plantas submetidas a estresse de P aumenta em relação às plantas supridas adequadamente com esse nutriente. Segundo Drew e Saker (1984), tal fato pode ser causado

por algum tipo de efeito retroalimentador do status de P da planta na atividade da proteína carregadora ou por aumento na quantidade desta em resposta a esse estresse.

Contudo, além de aumentar a taxa de absorção, também é necessário reduzir a perda de P para o meio externo, pois segundo Bieleski e Ferguson (1983), nas células da superfície radicular, onde o apoplasto está em contato direto com a solução do solo, o plasmalema é a única barreira às potentes forças físicas que tendem a dirigir o P para a solução. Deste modo, sob taxas constantes de efluxo, a saída de P seria bastante significante em condições de baixa disponibilidade do nutriente (MARTINEZ et al., 1993).

2.3 PLANTAS DE COBERTURA NO CERRADO

A partir do advento do sistema plantio direto, tornou-se cada vez mais necessária a manutenção de cobertura vegetal sobre o solo durante o período de entressafra. Nesse sistema, o uso de cobertura é uma alternativa para aumentar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, podendo restituir quantidades consideráveis de nutrientes aos cultivos, uma vez que essas plantas absorvem nutrientes das camadas subsuperfícias do solo e os disponibilizam posteriormente, na camada superficial depois da decomposição dos seus resíduos (DUDA et al., 2003). Essa disponibilização pode ser rápida e intensa (ROSOLEM et al., 2003), ou lenta e gradual, conforme a interação entre os fatores climáticos, principalmente precipitação pluvial e temperatura, atividade macro e microbólica do solo e qualidade e quantidade de resíduo vegetal (ALCÂNTARA et al., 2000; OLIVEIRA et al., 2002).

Assim, plantas de cobertura com elevada capacidade de produção de biomassa, em cultivo isolado ou consorciado, que sejam compatíveis quanto à época de plantio e não possuam efeitos alelopáticos, são recomendadas para cobertura (DENARDIN e KOCHHANN, 1993; DAROLT, 1998). Diversas espécies de plantas têm sido recomendadas para este fim, porém, na região do Cerrado têm-se observado certa dificuldade em manter um bom nível de cobertura do solo, devido às características climáticas desta região (pluviosidade elevada concentrada em parte do ano e altas temperaturas), que intensificam a decomposição da palhada. Por isso, as gramíneas têm desempenhado importante papel como planta de cobertura, com destaque para o milheto, pois apresenta características de resistência ao déficit hídrico, elevada produção de biomassa, menor custo das sementes (BRAZ et al., 2004; SILVA et al., 2006) e alta relação C/N (ALCÂNTARA e BUFARAH, 1998), sendo esta última a grande responsável pela menor taxa de decomposição. Oliveira et al. (2005),

avaliando efeitos de plantas de cobertura sobre as características químicas do solo, observaram que o milheto proporcionou maior concentração de P na camada de 0-5 cm do solo, sugerindo assim, a menor necessidade deste nutriente para esta cultura e sua maior capacidade de ciclagem de P.

Além do milheto, tem se destacado a utilização de outras plantas na região do Cerrado, como as do gênero *Brachiaria* e o sorgo devido ao aumento na produção de palhada (LANGE et al., 2004). Clark (1990) relatou diferenças nas habilidades do sorgo em absorver e utilizar eficientemente o P, incluindo sua remobilização dentro da planta ao longo do tempo. Kluthcouski e Stone (2003) observaram elevação no rendimento do feijoeiro cultivado sobre palhada de *Brachiaria brizantha* (braquiarão), pois, o principal benefício da utilização desta planta de cobertura foi proporcionar melhor distribuição do sistema radicular da cultura subsequente. Além disso, espécies do gênero *Brachiaria* apresentam índices de aproveitamento relativamente elevados de adubos fosfatados (GOEDERT et al., 1986; SOUSA et al., 2004). Entretanto, a elevada relação C/N da *Brachiaria brizantha* reduz a taxa de decomposição dos resíduos vegetais desta espécie, refletindo na baixa taxa de mineralização de nutrientes em curto prazo.

Foloni et al. (2008), avaliando o desenvolvimento de culturas produtoras de grãos (soja e milho) e de espécies de cobertura (milheto e braquiária) sob doses de fosfato natural, observaram comportamentos bem distintos entre o primeiro e segundo grupo, destacando a eficiência das plantas de cobertura em obter P de fontes menos solúveis.

2.4 FOSFATOS NATURAIS

Dentre os fosfatos naturais, os fosfatos de cálcio representam a classe predominante em termos de quantidade e importância econômica (KAMINSKI e PERUZZO, 1997), principalmente os de origem ígnea ou sedimentar. Os fosfatos de cálcio de origem ígnea apresentam teores de P_2O_5 total variando de 28 a 30%, e de acordo com Kliemann e Lima (2001), sua solubilidade está diretamente associada ao grau de cristalização, que é tanto menor quanto mais fluoretada esta for. Por outro lado, as rochas de origem sedimentar, apresentam estrutura microcristalina pobemente consolidada e com grande superfície específica (SANTOS et al., 2006). A maior reatividade destas últimas quando comparadas as ígneas, está relacionada ao grau de substituições isomórficas (principalmente de PO_4^{3-} por $CO_3^{2-} + F^{-1}$), à porosidade, à granulometria (LEHR e McCLELLAN, 1972; HOROWITZ e

MEURER, 2004), e ao regime geológico em que a rocha foi formada (KAMINSKI e PERUZZO, 1997).

Além das propriedades relacionadas à fonte de fosfato natural (FN), sua solubilidade também é grandemente influenciada pelos atributos do solo e da espécie vegetal a ser cultivada (HOROWITZ e MEURER, 2004). A velocidade de dissolução dos FN é inversamente proporcional ao pH do solo, porém segundo Khasawneh e Doll (1978), os efeitos negativos da elevada acidez sobre as plantas podem superar os efeitos positivos da dissolução desses fosfatos, ocorrendo casos em que o aumento do pH pela calagem aumentou a eficiência dos FN pela melhoria do ambiente para as raízes. Os teores de Ca (FLACH et al., 1987) e P na solução do solo também alteram a dissolução dos FN, pois baixas concentrações destes na solução afetam o equilíbrio da reação de dissolução destes fosfatos. No entanto, dentre os três fatores citados, o teor de Ca na solução é o que mais influencia a dissolução de FN reativos (ROBINSON e SYERS, 1991; ROBINSON et al., 1994), demonstrando assim, a importância da CTC (capacidade de troca catiônica) na solubilização dos FN, tendo em vista que o aumento da CTC diminuirá o teor Ca na solução.

Quanto à espécie vegetal, estas apresentam diferentes habilidades para absorver P dos FN (COOK, 1935; FLACH et al., 1987; HAYNES, 1992), sendo tais diferenças relacionadas com o pH da rizosfera (HAYNES, 1992), a demanda de Ca e P (CHIEN e HAMMOND, 1978; KHASAWNEH e DOLL, 1978), a morfologia do sistema radicular (KHASAWNEH e DOLL, 1978) e a abundância de ácidos orgânicos na rizosfera (ARCAND et al., 2006), sendo esta última responsável por processos de acidificação, complexação e reações de trocas de ligantes (OMAR, 1998).

2.5 RIZOSFERA E SOLUBILIZAÇÃO DE FOSFATOS NATURAIS

Convencionalmente, busca-se avaliar os atributos químicos do solo através de amostragens em camadas pré-determinadas e correlacionar os valores obtidos com a dissolução de FN. No entanto, poucos estudos têm dado ênfase à região do solo em que as alterações químicas são mais efetivas devido ao cultivo de plantas, a rizosfera.

Segundo Arcand et al. (2006), através da utilização de mecanismos de plantas e microorganismos que podem efetivamente extrair P dos FN próximo a rizosfera e o liberar na solução ou na fração lábil do solo, a adubação com FN pode se tornar uma alternativa viável para o fornecimento de P às plantas. Isso pode ser comprovado no estudo de Bolan et al.

(1997), o qual observou que o FN dissolveu mais eficientemente na presença de plantas do que na ausência. Esta maior solubilização está associada a inúmeras alterações que ocorrem na rizosfera, destacando-se a redução do pH do solo (HINSINGER e GILKES, 1996, 1997), absorção de Ca e P (ZOYSA et al., 1997) e a exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes (LI et al., 2008).

A acidificação do solo da rizosfera é causada pela grande absorção de cátions em relação aos ânions com consequente excreção de H^+ (ARCAND et al., 2006), por exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes (HOFFLAND et al., 1989; MNKENI et al., 2000; CHIEN et al., 2003) e também por causa da absorção de OH^- para manter a eletronegatividade da planta após a liberação de ácidos orgânicos aniónicos (HINSINGER et al., 2003). Como consequência, o aumento na concentração de H^+ e diminuição do teor de Ca próximo às partículas dos FN favorecem a reação de dissolução destes fosfatos.

Os ácidos orgânicos aniónicos, além de reduzir o pH do solo próximo à rizosfera, também promovem a dissolução dos FN através de reações de complexação (ARCAND et al., 2006), ou mobilizam P do solo pela competição desses ácidos com os sítios de adsorção de P na superfície dos óxidos de Fe e Al através de reações de troca de ligantes (GAHOONIA et al., 1992; GERKE et al., 1994; JONES, 1998; TROLOVE et al., 2003). Ryan et al. (2001) relataram que muitos ácidos orgânicos, tais como o citrato, o malato, o oxalato e o fumarato são exsudados das raízes e aumentam a nutrição de P às plantas. Somando-se aos fatos anteriores, foi demonstrado que as raízes também podem induzir a alta atividade da fosfatases ácidas na rizosfera, que aumenta a disponibilidade de P às plantas (ASMAR, 1977; KANDELER et al., 2002; GAHOONIA e NIELSEN, 2004).

Por intermédio destes mecanismos, certas espécies de plantas têm demonstrado respostas mais acentuadas à adubação com FN. Estas respostas foram quantificadas em termos de absorção de P, teor deste nutriente no tecido vegetal e produtividade (HAYNES, 1992; MNKENI et al., 2000; CHIEN et al., 2003).

2.6 FORMAS DE FÓSFORO NA RIZOSFERA

O fósforo apresenta difusão extremamente baixa no solo, e como as plantas absorvem este nutriente mais rapidamente do que ele pode se mover, há formação de uma zona de depleção próxima às raízes. Esta depleção pode ocorrer em diversas formas de P variando com suas disponibilidades e com a espécie de planta cultivada, conforme observado por

Pearse et al. (2006, 2007), onde o trigo, a colza e uma ampla variedade de leguminosas diferem em sua capacidade de obter P a partir de várias formas. Estas formas de P podem ser identificadas através da metodologia proposta por Hedley et al. (1982), a qual utiliza reagentes com diferentes capacidades de extração, os quais removem P inorgânico (Pi) e orgânico (Po) de formas mais disponíveis às mais estáveis (GATIBONI et al., 2007).

As formas preferencialmente acessadas pelas plantas são o P extraído por resina (P_{resina}) e o P inorgânico extraído por bicarbonato de sódio 0,5 mol L⁻¹ (P_{bic}) (HEDLEY et al., 1982; BECK e SANCHES, 1984; TIJSSSEN et al., 1984; SHARPLEY e SMITH, 1985; STEWART e TIJSSSEN, 1987; GUO e YOST, 1998; HENRIQUEZ e KILLORN, 2005; GATIBONI et al., 2007) e, por isso são consideradas formas disponíveis de P no solo. Radersma e Grierson (2004) observaram que o P_{bic} foi menor na rizosfera de *Crotalaria spectabilis* do que no restante do solo, enquanto Li et al. (2008) verificaram que o cultivo de plantas diminuiu significativamente o teor de P_{resina} na rizosfera, porém sem proporcionar alterações nos teores de P_{bic} com o cultivo de diversas espécies. No entanto, quando os teores de P das formas mais disponíveis (P_{resina} e P_{bic}) não são suficientes para suprir as necessidades das plantas, estas fazem uso de determinados mecanismos como, alteração no pH do solo (HINSINGER e GILKES, 1996, 1997), exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes (LI et al., 2008), incremento na atividade de fosfatases (TARAFDAR e JUNGK, 1987; SCHERER e SHARMA, 2002; NURUZZAMAN et al., 2006; GATIBONI et al., 2008), e deste modo podem acessar formas de P menos lábeis. A mobilização de P como resultado da exsudação de ácidos orgânicos pode ser identificada pelo aumento na fração mais lábil de P e pela diminuição na fração menos lábil (RADERSMA e GRIERSON, 2004), embora os efeitos do cultivo de plantas nas diferentes formas de P restrinjam-se a poucos milímetros de distância das raízes, conforme verificado por Zoysa et al. (1997) (3 mm), Shi et al. (2004) (4 mm) e Zhang et al. (2009) (5 mm). Essa restrição espacial nas alterações dos teores de P deve-se principalmente ao baixo coeficiente de difusividade deste elemento no solo.

Através da identificação de espécies de plantas com habilidades distintas em acessar diferentes formas de P, o cultivo consorciado ou rotacionado destas poderá ser benéfico para ambas as espécies, ou principalmente para aquela com menor capacidade de obter P de formas pouco disponíveis, conforme verificado nos trabalhos de Gardner et al. (1983), Horst e Waschkies (1987), Ae et al. (1990) e Li et al. (2004).

Assim, o objetivo geral deste trabalho foi construído baseando-se nas seguintes hipóteses: as gramíneas, no período inicial de desenvolvimento e em solos fertilizados com

fosfato natural, apresentam maior capacidade de absorção de P em relação à soja; a capacidade de absorção de P está relacionada com os parâmetros cinéticos de absorção (I_{max} , K_m e C_{min}) de P de cada espécie e; as plantas promovem alterações no pH do solo próximo as raízes e absorvem diferentes formas de P do solo rizosférico.

3 CAPÍTULO I: FOSFATO REATIVO DE ARAD E DESENVOLVIMENTO INICIAL DE SOJA, SORGO, MILHETO E BRAQUIÁRIA

3.1 RESUMO

A eficiência da adubação fosfatada é dependente das características edáficas, do tipo de fertilizante utilizado, bem como da espécie vegetal cultivada. O objetivo deste trabalho foi avaliar a capacidade de absorção de fósforo e o desenvolvimento inicial de soja, sorgo, milheto e braquiária em função da aplicação de fosfatos solúveis e naturais ao solo. Para tanto, foi desenvolvido um trabalho em casa-de-vegetação, em vasos com 400 g de solo, no Centro de Ciências Agroveterináris da Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV/UDESC), no período de janeiro a fevereiro de 2010. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, com quatro repetições. Os tratamentos, dispostos em esquema fatorial 3x4, constaram da aplicação de 140 kg ha^{-1} de P_2O_5 ($28 \text{ mg de P}_2\text{O}_5 \text{ vaso}^{-1}$) a partir de diversas fontes de P ao solo (sem P, Arad e superfosfato triplo) e do cultivo de espécies vegetais (braquiária, sorgo, milheto e soja). Aos 28 dias após a semeadura, avaliou-se a produção de massa seca da parte aérea (MSPA) e de raízes (MSR), a relação MSR/MSPA, o teor de e o acúmulo de P no tecido de cada espécie. Com base no teor de P acumulado, realizou-se o cálculo da eficiência relativa do fosfato de Arad para cada espécie. Também se estimou o teor de P disponível no solo em cada um dos tratamentos por meio do método da resina de troca iônica em lâminas. Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Em seu desenvolvimento inicial, a soja não respondeu à aplicação de fósforo ao solo. Dentre as plantas de cobertura, a braquiária teve maior capacidade de absorção de P em solo adubado com fosfato reativo de Arad e pode ser indicada como recicladora deste nutriente nestas condições. A aplicação de superfosfato triplo proporcionou maior teor de P disponível no solo em comparação com a aplicação de fosfato reativo de Arad ou ausência de aplicação de P.

Palavras-chave: Fosfato natural. Eficiência relativa. Absorção de fósforo. Solos de cerrado.

3.2 ABSTRACT

The efficiency of phosphorus fertilization depends on soil characteristics, type of fertilizer used and the plant species cultivated. The aim of this study was to evaluate the effect of soil application of soluble and rock phosphates on phosphorus uptake as well as on the initial development of soybean, sorghum, millet and brachiaria. The experiment was conducted in a greenhouse, in 2010, at Santa Catarina State University. Treatments were arranged in a 3x4 factorial design and consisted of addition to the soil of $140 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ ($28 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ pot}^{-1}$) from various sources of P (Arad and triple superphosphate besides a control) and the cultivation of plant species (brachiaria, sorghum, millet and soybean). It was carried out in pots containing 400 g of soil. The four replications of each treatment were allocated in a completely randomized design. Twenty-eight days after sowing, we determined shoot dry mass (SDM), root dry mass (RDM), RDM/SDM ratio, P content and P accumulated in the tissues of each species. Based on the content of P taken up, it was calculated the relative efficiency of Arad for each species. The soil available P was also estimated in each treatment by using the method of ion exchange resin in strips. Data were submitted to analysis of variance and means were compared by the Tukey test at 5% significance level. In its initial development, soybean did not respond to soil P application. Among the soil cover crops, brachiaria had the highest absorption capacity of P in soil fertilized with Arad rock phosphate and, thus, can be recommended as an efficient nutrient recycling in this condition. Triple superphosphate was the source of P with the highest ability to increase soil available P.

Keywords: Rock phosphate. Relative efficiency. Phosphorus uptake. Cerrado soils.

3.3 INTRODUÇÃO

Para adequada nutrição da cultura da soja cultivada em solo do Cerrado brasileiro, se faz necessária a utilização de elevadas doses de fertilizantes, porque nesta região prevalecem solos altamente intemperizados, caracterizados pela baixa disponibilidade de nutrientes às plantas (NOVAIS e SMYTH, 1999). Neste contexto, o fósforo (P) merece especial atenção por causa da sua grande adsorção, predominantemente de baixa reversibilidade, à fase mineral do solo, principalmente nos óxidos de Fe e Al. Assim, apesar deste nutriente ser exigido em pequenas quantidades pela maioria das culturas, tem-se aplicado doses elevadas

de P para obter teores adequados de P disponível, a fim de suprir as necessidades dos cultivos (CARVALHO et al., 1995), principalmente através da utilização de adubos fosfatados acidulados que, segundo Prochnow et al. (2004), apresentam solubilidade relativamente elevada em água, razão pela qual têm alta eficiência agronômica a curto prazo. No entanto, os custos de fabricação desses fosfatos solúveis são elevados e, por isso, tem-se observado interesse quanto ao uso de fontes alternativas de P, com destaque aos fosfatos naturais. Esses fosfatos são fertilizantes que apresentam, na sua maioria, baixa disponibilidade de P para as plantas no curto prazo, porém, com custo por unidade desse nutriente relativamente menor do que os fosfatos solúveis (NOVAIS e SMYTH, 1999), e sua solubilização depende da origem deste fosfato, das propriedades do solo, das práticas de manejo e da espécie vegetal cultivada (CHIEN e MENON, 1995; HOROWITZ e MEURER, 2004; NYING e ROBINSON, 2006).

Como a maioria dos produtores de soja no Brasil faz uso do sistema de plantio direto, torna-se praticamente indispensável o cultivo de plantas de cobertura no período de entressafra para produção de palhada. Assim, através da escolha adequada dessas plantas, visando maior habilidade de absorção de P, pode-se elevar a disponibilidade de P para as culturas sucessoras. Isto ocorre, porque o P oriundo de fosfatos naturais e/ou presente em formas pouco disponíveis no solo, que na maioria dos casos estaria indisponível para grande parte das culturas produtoras de grãos, é convertido em formas orgânicas após ser absorvido, e poderá estar mais disponível para as lavouras em sucessão, após ocorrer a mineralização do P orgânico dos restos vegetais (SOUZA et al., 2004). Deste modo, diversos trabalhos têm destacado algumas espécies como promissoras, tanto em relação a absorção de P em condições de baixa disponibilidade, bem como no uso eficiente deste nutriente (OLIVEIRA et al., 2005; FOLONI et al., 2008; RAMOS et al., 2009; RAMOS et al., 2010). Espécies do gênero *Brachiaria* têm apresentado índices de aproveitamento relativamente elevado de nutrientes derivados de adubos pouco solúveis (GOEDERT et al., 1986; SOUSA et al., 2004), além de produzir elevada quantidade de biomassa. Plantas como milheto e sorgo também vem sendo utilizadas em grande escala em sucessão à soja, pois proporcionam grande ciclagem de P e, por apresentarem maior taxa de decomposição dos resíduos em relação à *Brachiaria brizantha*, podem disponibilizar o P presente em seus tecidos em menor prazo e assim promover ganhos de produtividade da cultura subsequente nos primeiros anos.

No cerrado brasileiro, plantas de cobertura como braquiária, sorgo e milheto apresentam elevado potencial de utilização para produção de palhada, principalmente nos sistemas que envolvem a produção de soja. Deste modo, o presente trabalho objetivou avaliar

a capacidade de absorção de fósforo e o desenvolvimento inicial de soja, sorgo, milheto e braquiária em função da aplicação de fosfatos solúveis e naturais ao solo.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado nos meses de janeiro e fevereiro de 2010, na Universidade do Estado de Santa Catarina – Centro de Ciências Agroveterinárias, na cidade de Lages, SC. Utilizou-se amostra de um solo coletado na camada de 0-20 cm de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, de textura argilosa, que estava sob cultivo com pastagem de *Brachiaria brizantha* no município de Matupá – MT (Latitude 10°10'18" S e Longitude 54°51'33"). O solo foi seco ao ar, passado em peneira com malha de 2 mm de abertura, e apresentava as seguintes características: pH em água: 5,4; P (Mehlich 1): 0,5 mg dm⁻³; K: 1,4 mmol_c dm⁻³; Ca: 7,0 mmol_c dm⁻³; Mg: 4,2 mmol_c dm⁻³; Al: 4,2 mmol_c dm⁻³; H+Al: 54,8 mmol_c dm⁻³; matéria orgânica: 30 g dm⁻³; CTC_(pH 7,0): 67,4 mmol_c dm⁻³; saturação por bases (V): 19 %; areia: 296 g kg⁻¹; silte: 165 g kg⁻¹; argila: 538 g kg⁻¹.

Visando elevar a saturação por bases do solo a 50%, conforme recomendação de Sousa e Lobato (2004), realizou-se a aplicação e incorporação de 1,2 g de calcário dolomítico (filler) por kg de solo, dose esta equivalente a 2,4 t ha⁻¹. Em seguida, o solo foi incubado por 20 dias com umidade próxima à retida na capacidade de campo, com a finalidade de proporcionar a reação das partículas do calcário com o solo. Posteriormente, o solo foi seco, subdividido em 48 amostras de 400 g e acondicionado em vasos de 500 cm³.

Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, com 4 repetições. Os tratamentos, arranjados em esquema fatorial 3x4, constaram da aplicação de duas fontes de fósforo (fosfato natural reativo de Arad – Arad, e superfosfato triplo – SFT), além de uma testemunha sem P, e do cultivo de quatro espécies de plantas (*Glycine max* (L.) Merrill - soja, *Brachiaria brizantha* Hochst Stapf - braquiária, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Brown - milheto e *Sorghum bicolor* (L.) Moench - sorgo). Com exceção do tratamento testemunha, as demais unidades experimentais (vasos com 400 g de solo) receberam a aplicação e incorporação de dose equivalente a 140 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (28 mg de P₂O₅ vaso⁻¹) a partir das fontes de fósforo representantes de cada tratamento, conforme recomendação de Sousa e Lobato (2004). Em seguida, realizou-se a semeadura de três sementes viáveis de cada espécie. Com a finalidade de identificar a viabilidade das sementes, as mesmas foram pré-germinadas em folhas de papel umedecidas e, assim, foram selecionadas apenas as sementes que apresentavam emissão

da radícula. Visando obter o teor de P nas sementes de cada espécie, realizou-se a secagem de 3 amostras de cada espécie em estufa a 65° C, para determinação do peso de 100 sementes, seguido de digestão sulfúrica descrita por Tedesco et al. (1995), e determinação da concentração de P no extrato, através do método colorimétrico proposto por Murphy e Riley (1962).

Após a aplicação dos tratamentos, os vasos foram acondicionados em casa-de-vegetação, e a umidade do solo mantida próxima a 70% da capacidade de campo, através de regas diárias com base na diferença de peso das unidades experimentais. No dia da semeadura, as unidades experimentais receberam a aplicação de 25 mg kg⁻¹ de N (exceto para a soja) e 50 mg kg⁻¹ de K via solução, a partir das fontes uréia e cloreto de potássio, respectivamente. Nos vasos onde a soja foi semeada, realizou-se a aplicação de inoculante líquido (*Bradyrhizobium japonicum*), na dose correspondente a 200 mL ha⁻¹. Aos 5 dias após a semeadura, foi realizado o desbaste das plantas, deixando-se apenas uma planta por vaso. Aos 14 dias após a semeadura, foi realizada a aplicação, via solução, de 25 mg kg⁻¹ de N aos vasos (exceto para a soja).

Aos 28 dias após a semeadura, procedeu-se o corte da parte aérea das plantas rente à superfície do solo para armazenamento. Em seguida, as raízes de cada vaso foram separadas do solo. Tanto a parte aérea como as raízes das plantas foram secas em estufa a 65°C até peso constante, e posteriormente foram pesadas para a determinação da massa seca (MS). Para avaliar o teor de fósforo nos tecidos das plantas (parte aérea e raiz), foi realizada a digestão sulfúrica descrita por Tedesco et al. (1995). O fósforo disponível no solo foi estimado por resina de troca aniônica, em lâminas, conforme metodologia descrita por Miola (1995). Para a determinação do fósforo, tanto do tecido vegetal como do solo, utilizou-se o método colorimétrico proposto por Murphy e Riley (1962).

Com base nos valores de produção de MS da parte aérea e raízes, procedeu-se o cálculo da relação raiz/parte aérea e, relacionando-se a produção de MS com as concentrações de P no tecido das plantas, obteve-se a quantidade total de P acumulada pelas espécies. Com os valores de P acumulados no tecido (parte aérea e raízes) de cada espécie, foi calculada a eficiência relativa (ER) do fosfato reativo de Arad em relação ao SFT, através da seguinte equação: ER = (y₂ - y₁)/(y₃-y₁), onde: y₂ = fósforo acumulado no tecido no tratamento com fosfato reativo de Arad; y₁ = fósforo acumulado no tecido no tratamento sem aplicação de P e; y₃ = fósforo acumulado no tecido no tratamento com superfosfato triplo (valor de referência).

Os dados experimentais foram transformados em $z = (y+3/8)^{0,5}$ visando obter normalidade e homogeneidade de variância (BANZATO e KRONKA, 2006) e então submetidos à análise de variância, e quando significativo, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Houve interação entre as fontes de P e as espécies cultivadas para massa seca da parte aérea (MSPA), relação raiz/parte aérea (RRPA) e teor de fósforo nas raízes (PR) (Tabela 1), optando-se pelo desdobramento e análise dos efeitos simples nestas variáveis (Tabela 2). Para massa seca de raízes (MSR), teor de fósforo na parte aérea (PPA), fósforo acumulado no tecido (PAC) e fósforo disponível no solo (PDS) restringiu-se a análise apenas dos efeitos principais (Tabela 1).

Tabela 1 - Massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca de raízes (MSR), relação raiz/parte aérea (RRPA), teor de fósforo na parte aérea (PPA), teor de fósforo nas raízes (PR), fósforo acumulado no tecido (PAC) e fósforo disponível no solo (PDS) em função de fontes de fósforo e espécies vegetais cultivadas.

FATOR	MSPA	MSR	RRPA	PPA	PR	PAC	PDS ¹
Fonte de P (1)	----- g vaso ⁻¹ -----			----- g kg ⁻¹ -----		mg vaso ⁻¹	mg kg ⁻¹
Testemunha	0,080	0,043b	0,62	1,46	1,12	0,039	0,86c
Arad	0,099	0,049b	0,64	1,34	1,10	0,045	2,99b
SFT	0,171	0,066a	0,38	1,52	0,99	0,059	6,22a
Valor de F	21,80 ^{**}	6,96 ^{**}	11,99 ^{**}	0,50 ^{ns}	1,18 ^{ns}	3,07 ^{ns}	105,17 ^{**}
Espécie (2)							
Braquiária	0,063	0,025b	0,50	1,33b	1,27	0,031b	3,30
Sorgo	0,073	0,041b	0,64	1,13b	1,09	0,039b	3,26
Milheto	0,064	0,022b	0,57	2,33a	1,17	0,028b	3,80
Soja	0,267	0,122a	0,47	0,97b	0,74	0,092a	3,09
Valor de F	63,46 ^{**}	70,15 ^{**}	1,94 ^{ns}	7,99 ^{**}	8,59 ^{**}	19,00 ^{**}	0,63 ^{ns}
Interação 1 x 2	3,58 ^{**}	1,60 ^{ns}	2,42 [*]	0,41 ^{ns}	5,17 ^{**}	1,95 ^{ns}	0,38 ^{ns}
CV (%)	4,3	2,2	9,4	18,1	9,4	2,8	15,5

Dentro de cada fator, médias seguidas de letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

¹ = fósforo disponível de P no solo extraído por resina trocadora de íons (Miola, 1995).

* = significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste F.

** = significativo a 1% de probabilidade de erro pelo teste F.

ns = não significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste F.

Arad = fosfato natural reativo de Arad.

SFT = superfosfato triplo.

Na comparação das espécies em cada fonte fosfatada, observou-se superioridade na produção de MSPA com o cultivo da soja em relação às demais culturas, independente da fonte testada (Tabela 2). Ao analisarmos os efeitos das fontes de P na MSPA em cada espécie, observa-se que a soja foi a única cultura não influenciada pelas fontes de P, enquanto as demais apresentaram maior produção de MSPA com a aplicação do SFT, sendo que a utilização de Arad não diferiu da testemunha. Para MSR (Tabela 1), a aplicação de SFT proporcionou maiores valores quando comparada aos tratamentos Arad e testemunha. Dentre as espécies, novamente a soja destacou-se com maiores valores de MSR frente às demais (Tabela 1). Esta ausência de resposta às fontes de P por parte da soja, e sua consequente superioridade em relação às demais espécies quanto à produção de MSPA e MSR, evidenciam que em seu desenvolvimento inicial o fornecimento de P para a planta não é dependente do solo. Neste caso, até 28 dias após a semeadura, a provável origem do P para o desenvolvimento inicial desta cultura foi a própria semente, tendo em vista a elevada quantidade de P por semente ($0,465 \text{ mg semente}^{-1}$) em relação às demais espécies (Tabela 3). Trigo et al. (1997), ao avaliarem o desenvolvimento de plantas de soja oriundas de sementes com diferentes teores de P, observaram incremento linear na massa seca de plântulas de soja com 21 dias de idade com o aumento no teor de P na semente, destacando assim a importância do P presente na semente para o desenvolvimento inicial de soja, principalmente em solos com baixa disponibilidade deste elemento.

Para a RRPA, as fontes de P apresentaram comportamento diferenciado entre as espécies, não havendo respostas do sorgo e da soja às fontes para esta variável (Tabela 2). Para braquiária, maiores valores foram observados no tratamento testemunha, e os menores no SFT, enquanto a aplicação de Arad proporcionou valores intermediários sem diferir dos demais tratamentos. Com o cultivo do milheto, observou-se diminuição na RRPA com a utilização de SFT. Esses dados reafirmam a idéia de que sob deficiência de P no solo, as plantas (braquiária e milheto neste experimento) produzem maior sistema radicular em detrimento da parte aérea (BURAUEL et al., 1990), conforme relatado por Yaseen e Malhi (2009), e assim podem aumentar a capacidade de absorção de P tendo em vista a baixa mobilidade deste elemento no solo.

Tabela 2 - Interação entre fontes de fósforo e espécies vegetais para as variáveis massa seca de parte aérea (MSPA), relação raiz/parte aérea (RRPA) e teor de fósforo nas raízes (PR).

Fonte de P	Espécie			
	Braquiária	Sorgo	Milheto	Soja
MSPA (g vaso ⁻¹)				
Testemunha	0,027bB	0,036bB	0,013bB	0,246aA
Arad	0,037bB	0,047bB	0,014bB	0,295aA
SFT	0,124aB	0,137aB	0,163aB	0,259aA
RRPA				
Testemunha	0,65aA	0,71aA	0,62aA	0,51aA
Arad	0,51abAB	0,74aAB	0,84aA	0,45aB
SFT	0,34bA	0,47aA	0,24bA	0,46aA
PR (g kg ⁻¹)				
Testemunha	1,21abAB	1,53aA	1,03abAB	0,73aB
Arad	1,64aA	0,99bB	0,98bB	0,79aB
SFT	0,97bAB	0,77bB	1,49aA	0,72aB

Médias seguidas de letras distintas, minúsculas na coluna e maiúsculas na linha, diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Arad = fosfato natural reativo de Arad.

SFT = superfosfato triplo.

Quanto ao PPA, os valores obtidos para as plantas de milheto foram superiores aos encontrados para braquiária, sorgo e soja, onde estes três últimos não diferiram entre si (Tabela 1). Não houve diferenças entre as fontes de P para esta variável. Deste modo, em comparação com as demais espécies avaliadas, verificamos que o milheto apresenta capacidade de acumular maior quantidade de P em sua parte aérea em reduzido tempo de cultivo, conforme relatado por Braz et al. (2004), sendo esta uma característica desejável para a ciclagem de P, desde que mantida boa produção de fitomassa.

Não houve efeitos das fontes de P sobre o teor de fósforo nas raízes (PR) da cultura da soja. Maiores valores de PR foram observados nos tratamentos Arad, testemunha e SFT com o cultivo de braquiária, sorgo e milheto, respectivamente (Tabela 2). Para a braquiária e o sorgo, observamos que a utilização do SFT proporcionou diminuição no PR, podendo este fato estar relacionado à maior produção de massa seca de raízes e consequente efeito de diluição do P absorvido. Na comparação das espécies em cada fonte de P, observamos menor PR para a soja no tratamento testemunha, maior para braquiária no Arad e para milheto e braquiária no SFT, evidenciando assim o comportamento diferenciado das espécies em função da disponibilidade de P. Isto ocorre porque espécies mais adaptadas a solos de baixa fertilidade geralmente apresentam alta concentração de nutrientes nos tecidos (CHAPIN e BIELESKI, 1982).

O PAC não foi influenciado pelas fontes de P avaliadas, provavelmente pelo elevado PAC da soja, independente da fonte fosfatada. Na comparação entre as espécies, maior valor de PAC foi encontrado com o cultivo da soja ($0,092 \text{ mg vaso}^{-1}$), enquanto o sorgo ($0,039 \text{ mg vaso}^{-1}$), a braquiária ($0,031 \text{ mg vaso}^{-1}$) e o milheto ($0,028 \text{ mg vaso}^{-1}$) não diferiram entre si (Tabela 1). Ao observarmos a quantidade de P na semente de cada espécie (Tabela 3), verificamos que o PAC na soja representou apenas 20% do total presente na semente, enquanto que o PAC no sorgo, na braquiária e no milheto representou 61, 135 e 133% do P na semente, respectivamente. Deste modo, podemos observar maior capacidade de extração de P do solo pela braquiária e pelo milheto, mesmo no início de seu desenvolvimento, indicando que estas plantas poderiam ser preferenciais para ciclagem de P do solo.

Maior valor de fósforo disponível no solo (PDS) foi alcançado com a aplicação de SFT ($6,22 \text{ mg kg}^{-1}$), enquanto a utilização de Arad e o tratamento testemunha proporcionaram valores de PDS de $2,99 \text{ mg kg}^{-1}$ e $0,86 \text{ mg kg}^{-1}$, respectivamente (Tabela 1). Como esperado, o PDS não foi influenciado pelo cultivo de diferentes espécies.

Tabela 3 - Peso de cem sementes (PCS), teor de fósforo nas sementes (TPS) e conteúdo de fósforo nas sementes (PS) de cada uma das espécies vegetais avaliadas.

Planta	PCS	TPS	PS
	g	g kg^{-1}	mg semente^{-1}
Braquiária	0,66	3,5	0,023
Sorgo	2,48	2,6	0,064
Milheto	0,57	3,7	0,021
Soja	10,82	4,3	0,465

O cálculo da eficiência relativa (ER) do Arad comparativamente ao SFT em cada cultura com base na quantidade de P acumulada no tecido demonstrou que apenas a braquiária e o milheto responderam à aplicação do fosfato natural, atingindo valores de ER de 51% e 8%, respectivamente. A soja e o sorgo apresentaram valores negativos de ER, indicando ausência de incremento no acúmulo de P com a aplicação do Arad. Deste modo, observamos a expressiva capacidade da braquiária em elevar seu PAC em comparação com as demais espécies, demonstrando assim seu potencial de absorção de P quando aplicada uma fonte de baixa solubilidade como o fosfato natural reativo de Arad. Esta característica é desejável para plantas de cobertura cultivadas em solos com a aplicação de fosfatos naturais, cuja finalidade seja a ciclagem de fósforo. Foloni et al. (2008), comparando o desenvolvimento e acúmulo de P de diversas espécies de plantas quando aplicados fosfatos naturais, também verificaram

grande absorção de P com o cultivo da braquiária. Isso se deve a alta adaptabilidade desta cultura a solos tropicais (MACEDO, 2004; SOUSA et al., 2004), podendo tal adaptação estar relacionada à características morfológicas do sistema radicular e aos parâmetros cinéticos de absorção de nutrientes.

De modo geral, uma das explicações para a baixa eficiência do fosfato natural reativo de Arad é a pouca acidez e o moderado teor de Ca do solo, características estas alcançadas com a calagem efetuada antes da instalação do experimento, e que dificultam a solubilização do fosfato natural, (GATIBONI et al., 2003; GUIDRY e MACKENZIE 2003; AGBENIN, 2004). No entanto, no presente estudo, justifica-se a aplicação de calcário para elevar a saturação por bases do solo, conforme recomendado por Sousa e Lobato (2004), a fim de mantermos apenas a deficiência de P como fator limitante para o desenvolvimento das culturas. Outro fator comumente citado como determinante na elevação da eficiência de utilização de fosfatos naturais em relação aos fosfatos solúveis, é o tempo de aplicação. As fontes de P de alta solubilidade, ao disponibilizarem praticamente todo o P em curto prazo, favorecem a adsorção específica de grande parte do P, caso este não seja absorvido. Isto não ocorre com os fosfatos de menor solubilidade, os quais necessitam da remoção (absorção, adsorção ou lixiviação) tanto de P como de Ca da solução do solo para que mantenham sua solubilização e possam favorecer a produção das culturas através de cultivos sucessivos, conforme relatado por Scholefield et al., (1999), Moreira et al. (2002), e Gatiboni et al. (2003).

3.6 CONCLUSÕES

A soja, em seu desenvolvimento inicial, não responde à aplicação de fósforo ao solo.

Dentre as plantas de cobertura, a braquiária tem a maior capacidade de absorção de P em solo fertilizado com fosfato reativo de Arad e pode ser indicada como recicladora deste nutriente nestas condições.

4 CAPÍTULO II: MODIFICAÇÕES NO pH E FORMAS DE FÓSFORO NA RIZOSFERA DE DIFERENTES ESPÉCIES

4.1 RESUMO

As plantas, por intermédio de diversos mecanismos, têm demonstrado respostas distintas à adubação com fosfato natural, principalmente através da alteração de atributos do solo rizosférico. O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações no pH do solo e nos teores de diferentes formas de fósforo num solo adubado com fosfato natural, em função do cultivo de espécies de plantas. Foi desenvolvido um experimento em casa-de-vegetação, no Centro de Ciências Agroveterináris da Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV/UDESC), no período de janeiro a março de 2010. Neste experimento, se cultivou diversas espécies de plantas em colunas de PVC preenchidas com solo e, separadas ao meio por uma tela de nylon com abertura de 25 µm (para impedir o crescimento radicular para além desta camada). Os tratamentos constaram do cultivo de quatro espécies de plantas (braquiária, milheto, soja e sorgo) e uma testemunha (ausência de planta). Após 45 dias de cultivo, o solo imediatamente abaixo da tela foi seccionado nas camadas de 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-7, 7-9, e 9-14 mm a partir da tela, e seco ao ar, para então determinar-se o pH(CaCl_2) e os teores de P pelo fracionamento de Hedley, sendo: P por resina de troca aniónica (P_{resina}), P por NaHCO_3 0,5 mol L⁻¹ (P_{bic} e P_{obic}), P por NaOH 0,1 mol L⁻¹ (P_{hid} e P_{ohid}), P por HCl 0,5 mol L⁻¹ (P_{HCl}) e P residual (P_{residual}) das amostras. Os dados foram submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$) e as médias de cada espécie comparadas com a testemunha pelo teste de Dunnett. Nas camadas de 1-2 e 2-3 mm, a soja foi a única planta que diferiu da testemunha quanto ao pH. Nas demais camadas, não houve alterações no pH com o cultivo de plantas. O sorgo diminuiu o teor de P_{resina} , porém, apenas na camada mais próxima às raízes. Observou-se diminuição significativa no teor de P_{bic} na camada de 0-1 mm com o cultivo de braquiária, milheto e sorgo. Para as demais formas de P, não se observou efeito do cultivo das plantas.

Palavras - chave: Fracionamento de fósforo. Plantas de cobertura. Solos de cerrado.

4.2 ABSTRACT

Plants have shown different responses to soil fertilization with rock phosphate through various mechanisms, mainly through changes in soil properties near rhizosphere. Thus, the purpose of this study was to evaluate changes on soil pH and on forms of P in soil fertilized with rock phosphate, as affected by the growth of various plant species. The experiment was conducted in a greenhouse, at Santa Catarina State University, Brazil, in 2010. The species were grown in PVC columns filled with soil, which were separated in two equal parts by using a nylon net of 25 micrometer opening to prevent root growth below the upper half. Treatments consisted of cultivation of four plant species (brachiaria, millet, sorghum and soybeans) besides a control with no plants. After 45 days of growth, the soil just below the screen was sectioned in layers of 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-7, 7-9, and 9-14 mm, subsequently air-dried and then analyzed for pH (CaCl_2) and for the following soil P forms, according to the Hedley's fractionation procedure: P by anion exchange resin (P_{resin}), P by NaHCO_3 0.5 mol L-1 (P_{bic} and P_{bic}), P by NaOH 0.1 mol L-1 (P_{hid} and P_{hid}), P by HCl 0.5 mol L-1 (P_{HCl}) and residual P (P_{residual}). The data were submitted to analysis of variance ($p \leq 0.05$) and the averages of each species were compared with the control by the Dunnett test. In the 1-2 and 2-3 mm layers, soybeans was the only species where soil pH differed from the control. In the other layers, there were no changes on soil pH caused by plant growth regardless of species. Sorghum decreased P_{resin} content, but only in the layer closest to the roots. A significant decrease in the content of P_{bic} in the layer of 0-1 mm was found where brachiaria millet and sorghum were cultivated. All other forms of soil P were not affected by plant growth.

Keywords: Phosphorus fractionation. Soil cover crops. Cerrado soils.

4.3 INTRODUÇÃO

A necessidade de elevar a produtividade dos cultivos com menor dependência de insumos é um dos principais problemas da atualidade, tendo em vista a grande demanda por alimentos e a escassez dos recursos naturais. A deficiência de fósforo (P) tem sido uma das maiores limitações à elevação da produtividade em regiões tropicais, sendo a produção de alimentos altamente dependente da utilização de fertilizantes fosfatados, especialmente de

fontes solúveis. Estas proporcionam boa disponibilidade de P logo após sua aplicação (PROCHNOW et al., 2004), porém apresentam elevado custo de produção e baixo efeito residual no solo, devido a grande adsorção do P oriundo dos fertilizantes a fase mineral do solo.

Visando diminuir os custos de produção das culturas, tem se observado o aumento na utilização de fontes de P de menor solubilidade, como os fosfatos naturais (FN). Tais fosfatos necessitam de baixos valores de pH e drenos de P e Ca do solo para favorecer sua dissolução e disponibilização de P (ROBINSON e SYERS, 1990; SANYAL e DATTA, 1991). Porém, estas características não devem ser limitantes ao desenvolvimento das plantas. Neste sentido, inúmeros trabalhos têm estudado a rizosfera, a micro região do solo que possui características desejáveis a dissolução de FN (HINSINGER e GILKES, 1995; ZOYSA et al., 1997, 1998; RAMIREZ et al., 2001; PEARSE et al., 2007; PEREZ et al., 2007).

Diversas espécies de plantas possuem capacidades distintas de proporcionar alterações químicas no solo rizosférico (HINSINGER e GILKES, 1996, 1997; BERTRAND et al., 1999; MOREL e HINSIGER, 1999; PEARSE et al., 2006, 2007) para aumentar a disponibilidade de P (RADERSMA e GRIERSON, 2004), tais como, a acidificação da rizosfera, a exsudação de ácidos orgânicos e a secreção de fosfatases (LI et al., 2008). A acidificação do solo da rizosfera é causada, pela maior absorção de cátions em relação aos ânions, com consequente excreção de H^+ (BARBER, 1995; HINSINGER, 1998; TANG e RENGEL, 2003; ARCAND et al., 2006), por exsudação de ácidos orgânicos pelas raízes das plantas (CHIEN et al., 2003), e também por causa da absorção de OH^- para manter a eletronegatividade da planta após a liberação de ácidos orgânicos aniónicos (HINSINGER et al., 2003). Como consequência, o aumento na concentração de H^+ e a diminuição do teor de Ca (absorção) próximo as partículas dos FN favorecem a reação de dissolução destes fosfatos. Contudo, os ácidos orgânicos também promovem a dissolução dos FN através de reações de complexação (ARCAND et al., 2006), ou mobilizam P do solo pela competição desses ácidos com os sítios de adsorção de P na superfície dos óxidos de Fe e Al, através de reações de troca de ligantes (TROLOVE et al., 2003). Além disso, as raízes também podem induzir a alta atividade de fosfatase na rizosfera, que aumenta a disponibilidade de P às plantas (GAHOONIA e NIELSEN, 2004), a partir de formas menos disponíveis. Assim, por intermédio destes mecanismos, algumas espécies de plantas têm apresentado maior capacidade de absorção de P a partir das diversas formas deste nutriente nos solos onde sua disponibilidade é limitada (HINSINGER e GILKES, 1996, 1997; BERTRAND et al., 1999; MOREL e HINSIGER, 1999; PEARSE et al., 2006, 2007), e a

identificação destas espécies com posterior introdução das mesmas em um sistema de rotação/sucessão de culturas poderá beneficiar as plantas mais sensíveis a deficiência de P, através da decomposição dos restos vegetais e consequente disponibilização do P presente em seus tecidos (SOUZA et al., 2004).

Na região central do Brasil, diversas espécies de gramíneas têm apresentado potencial de utilização como plantas de cobertura no período de entressafra da soja, destacando-se a braquiária, o sorgo e o milheto. Contudo, ainda não foi testado o potencial destas plantas em utilizar mecanismos para aumentar a absorção de P, quando do uso de fosfatos naturais. O objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações no pH e nos teores de diferentes formas de fósforo na rizosfera de um solo fertilizado com fosfato natural, em função do cultivo de soja, braquiária, milheto e sorgo.

4.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no período de janeiro a março de 2010, na Universidade do Estado de Santa Catarina – Centro de Ciências Agroveterinárias, na cidade de Lages, SC. Utilizou-se amostra de um solo coletado na camada de 0-20 cm de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, de textura argilosa, que estava sob cultivo com pastagem de *Brachiaria brizantha* no município de Matupá – MT (Latitude 10°10'18" S e Longitude 54°51'33"). O solo foi seco ao ar e passado em peneira com malha de 2 mm de abertura, e apresentava as seguintes características: pH em água: 5,4; P (Mehlich 1): 0,5 mg dm⁻³; K: 1,4 mmol_c dm⁻³; Ca: 7,0 mmol_c dm⁻³; Mg: 4,2 mmol_c dm⁻³; Al: 4,2 mmol_c dm⁻³; H+Al: 54,8 mmol_c dm⁻³; matéria orgânica: 30 g dm⁻³; CTC_(pH 7,0): 67,4 mmol_c dm⁻³; saturação por bases: 19 %; areia: 296 g kg⁻¹; silte: 165 g kg⁻¹; argila: 538 g kg⁻¹.

Com a finalidade de elevar a saturação por bases do solo a 50%, conforme recomendação de Sousa e Lobato (2004), realizou-se a aplicação e incorporação de calcário dolomítico (filler) na dose equivalente a 2,4 t ha⁻¹. Posteriormente, o solo foi incubado por 20 dias com umidade próxima à retida na capacidade de campo, visando proporcionar a reação das partículas do calcário com o solo. Em seguida, foram adicionados ao solo 140 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (14 mg de P₂O₅ vaso⁻¹) e 100 kg ha⁻¹ de K₂O, nas formas de fosfato natural de Arad e cloreto de potássio, respectivamente.

Para a condução do experimento em casa-de-vegetação, foram confeccionadas colunas de PVC com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, as quais eram compostas por uma coluna

superior de 5 cm de altura, uma coluna intermediária de 2 cm de altura e uma coluna inferior de 3 cm de altura. Na base da coluna superior foi fixada uma tela de nylon com abertura de 25 μm (com a finalidade de impedir o crescimento radicular para as colunas inferiores), e na base da coluna inferior, fixou-se uma tela de nylon de 50 μm de abertura (para permitir a ascensão da água). Estas colunas foram preenchidas com solo até alcançar densidade de 1 g cm^{-3} , e então acondicionadas sobre vasos de 12 dm^{-3} preenchidos com areia. Havendo contato entre as colunas de PVC e a areia, a umidade do solo era mantida por ascensão capilar, uma vez que os vasos com areia eram interligados a um reservatório de água, o qual mantinha constante o nível de água dentro dos vasos (15 cm abaixo das colunas de PVC), proporcionando um potencial de água de -1,5 kPa (Figura 1).

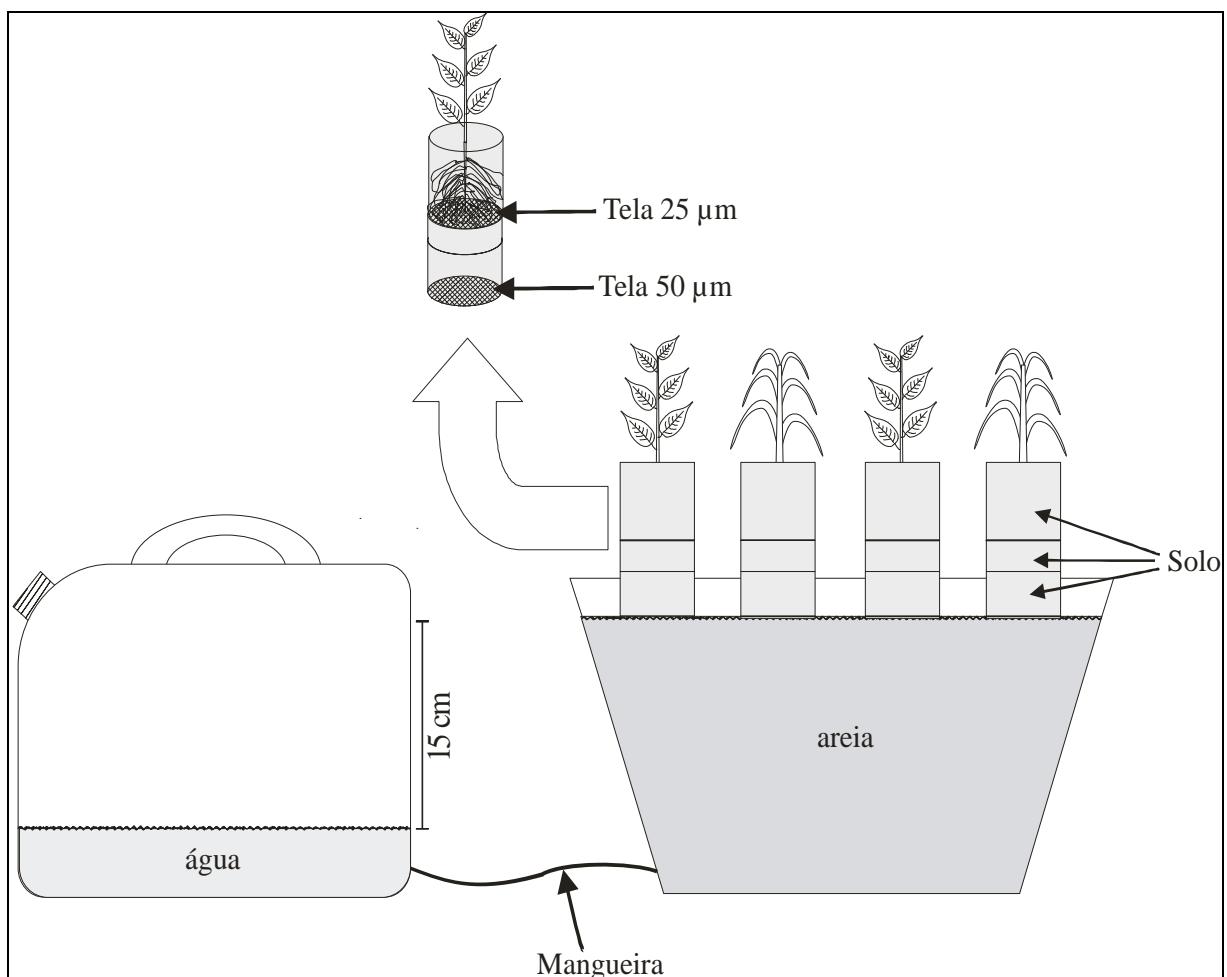


Figura 1 - Representação esquemática do sistema de manutenção de umidade por ascensão capilar e divisão das colunas de PVC com as telas de nylon para impedir o crescimento radicular das plantas.

Utilizou-se o delineamento experimental de blocos ao acaso (para controlar o erro de uma possível diferença de umidade entre os vasos de areia), com 4 repetições, onde os blocos

eram representados pelos vasos de areia. Cada unidade experimental foi constituída por 3 colunas de PVC, para obter-se a quantidade de solo requerida nas determinações químicas realizadas, totalizando 15 colunas de PVC por bloco. Os tratamentos constaram do cultivo de quatro espécies de plantas (*Glycine max* (L.) Merrill - soja, *Brachiaria brizantha* Hochst Stapf - braquiária, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Brown - milheto e *Sorghum bicolor* (L.) Moench - sorgo) e uma testemunha (ausência de planta).

Para obter o teor de P nas sementes de cada espécie, realizou-se a secagem de 3 amostras de cada espécie em estufa a 65° C, para determinação do peso de 100 sementes, seguido de moagem e digestão sulfúrica descrita por Tedesco et al. (1995), e determinação da concentração de P no extrato, através do método colorimétrico proposto por Murphy e Riley (1962).

Foi realizada a semeadura de duas sementes viáveis de cada espécie avaliada. Com a finalidade de identificar a viabilidade das sementes, as mesmas foram pré-germinadas em folhas de papel umedecidas e, assim, foram selecionadas apenas as sementes que apresentavam emissão da radícula. No dia da semeadura, as unidades experimentais receberam a aplicação de 25 mg kg⁻¹ de N via solução (exceto para a soja) e, nos vasos onde a soja foi semeada, realizou-se a aplicação de inoculante líquido (*Bradyrhizobium japonicum*), na dose correspondente a 200 mL ha⁻¹. Aos cinco dias após a semeadura, foi realizado o desbaste das plantas, deixando-se apenas uma planta por vaso. Aos 14 e 28 dias após a semeadura, foi realizada a aplicação de 25 mg kg⁻¹ de N aos vasos (exceto para a soja) por meio de solução.

Aos 45 dias após a semeadura, procedeu-se o corte da parte aérea das plantas rente à superfície do solo para armazenamento. Em seguida, as raízes de cada vaso foram separadas do solo. Neste dia, também realizou-se a separação das colunas de PVC. O solo contido na coluna intermediária, cuja parte superior estava em contato com a tela que impedia o crescimento das raízes, foi seccionado nas seguintes camadas a partir da tela: 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-7, 7-9, e 9-14 mm. Para tanto, a coluna intermediária contendo solo úmido foi fixada em um cilindro metálico com o auxílio de abraçadeira. Na base da coluna (lado oposto àquele que estava em contato com a tela de nylon) foi adicionado um disco plástico com diâmetro idêntico ao diâmetro interno da coluna, sendo este disco acoplado a uma haste metálica com rosca e marcações a cada milímetro para a medição das camadas de solo a serem seccionadas. A cada avanço em um milímetro que era realizado na haste em direção ao interior da coluna, o solo também movia-se na mesma escala para fora da coluna, sendo então seccionado com o

auxílio de uma lâmina metálica. Em seguida, as amostras de solo foram secas ao ar para posterior determinação, do pH (CaCl_2), conforme descrito por Tedesco et al. (1995), e das principais formas de fósforo do solo segundo metodologia proposta por Hedley et al. (1982), sendo: P extraível por resina de troca iônica (P_{resina}); P inorgânico extraível com bicarbonato 0,5 mol L^{-1} (P_{bic}); P orgânico extraível com bicarbonato 0,5 mol L^{-1} (P_{bic}); P inorgânico extraível com NaOH 0,1 mol L^{-1} após sonificação (P_{hid}); P orgânico extraível com NaOH 0,1 mol L^{-1} após sonificação (P_{hid}); P inorgânico extraível com HCl 0,5 mol L^{-1} (P_{HCl}) e P residual (P_{residual}). A determinação da concentração de P nos diferentes extratos foi realizada por meio do método colorimétrico proposto por Murphy e Riley (1962).

Após a colheita, as plantas foram secas em estufa a 65°C até peso constante e, em seguida, forma pesadas para a determinação da massa seca da parte aérea e das raízes. A avaliação do teor de fósforo nos tecidos das plantas foi realizada através da digestão sulfúrica descrita por Tedesco et al. (1995). A determinação do fósforo nos extratos dos tecidos das plantas foi realizada utilizando-se o método colorimétrico proposto por Murphy e Riley (1962).

Os dados foram submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$). Para os dados de fósforo acumulado no tecido, procedeu-se a comparação das médias pelo teste de Tukey. Para os dados de solo em que houve efeito dos tratamentos pelo teste F, foram comparadas as médias de cada espécie com a média da testemunha pelo teste de Dunnett; os resultados de teores de fósforo no solo e pH foram apresentados com base na diferença (Δ) entre as médias de cada espécie e da testemunha, calculada pela seguinte equação: $\Delta = \text{média da espécie} - \text{média da testemunha}$.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A soja foi a cultura que mais acumulou P em seu tecido (parte aérea e raízes), enquanto a braquiária e o sorgo acumularam as menores quantidades e o milheto não diferiu das demais espécies (Tabela 4).

Houve variação nos valores de pH (CaCl_2) e nos teores das diferentes formas de P avaliadas com o aumento da distância a partir da tela de nylon de 25 μm , em todos os tratamentos, inclusive na testemunha (Apêndice A). Este fato provavelmente se deve à sedimentação das partículas mais finas do solo e do fertilizante que ocorreu no momento do preenchimento das colunas de PVC. Contudo, ao serem calculadas as variações provocadas

no solo pelo cultivo das plantas (Figura 2), foram observados efeitos sobre o pH e as formas inorgânicas de fósforo mais lábeis (P_{resina} e P_{bic}).

Tabela 4 - Fósforo acumulado no tecido após o cultivo (PAC), peso de cem sementes (PCS), teor de fósforo na semente (TPS), quantidade de fósforo por semente (QPS) e porcentagem do fósforo acumulado proveniente da semente (PPS) nas espécies avaliadas.

Planta	PAC	PCS	TPS	QPS	PPS
	mg vaso ⁻¹	g	g kg ⁻¹	mg semente ⁻¹	%
Braquiária	0,214b	0,66	3,5	0,023	11
Milheto	0,287ab	0,57	3,7	0,021	7
Soja	0,442a	10,82	4,3	0,465	105
Sorgo	0,146b	2,48	2,6	0,064	44
Valor de F	7,0 **	-	-	-	-
CV (%)	35,3	-	-	-	-

Médias seguidas por letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. ** = significativo a 1% de probabilidade de erro.

O cultivo da soja proporcionou maiores valores de pH (CaCl_2) em relação à testemunha apenas nas camadas de 1-2 e 2-3 mm (Figura 2a). As demais espécies, não diferiram da testemunha em todas as camadas para a variável pH (CaCl_2). Esta variação do pH apresentada no cultivo da soja pode ser explicada pela não utilização de adubação nitrogenada nesta cultura, tendo em vista sua capacidade de simbiose com bactérias fixadoras de N. Assim, com a fertilização de N nas gramíneas e na testemunha, parte deste nutriente aplicado ao solo, que inicialmente estava na forma de N-NH_4^+ , provavelmente passou a N-NO_3^- liberando H^+ para o meio e, com isso reduziu os valores de pH do solo nestes tratamentos e, como para a soja não houve aplicação de N, não ocorreu esta redução, explicando os maiores valores encontrados nas camadas 1-2 e 2-3 mm. No entanto, na camada mais próxima das raízes (0-1 mm) o pH no tratamento soja não diferiu da testemunha, evidenciando assim a redução no valor desta variável com o cultivo desta espécie. Como a variação no pH do solo mais próximo às raízes é governada principalmente pelo balanço na absorção entre cátions e ânions (HAYNES, 1990; BARBER, 1995), reduções no pH com o cultivo de leguminosas sem a aplicação de N são esperadas (LI et al., 2008), pois, sendo o N o nutriente mais requerido pela maioria das culturas, e não havendo absorção deste diretamente do solo, o mesmo não é contabilizado no balanço da absorção. Assim, como as plantas necessitam de maiores quantidades de nutrientes catiônicos como K, Ca e Mg, quando comparados aos aniônicos, como P e S, há maior extrusão de prótons pelas plantas a fim de manter seu pH interno (MARSCHNER, 1995).

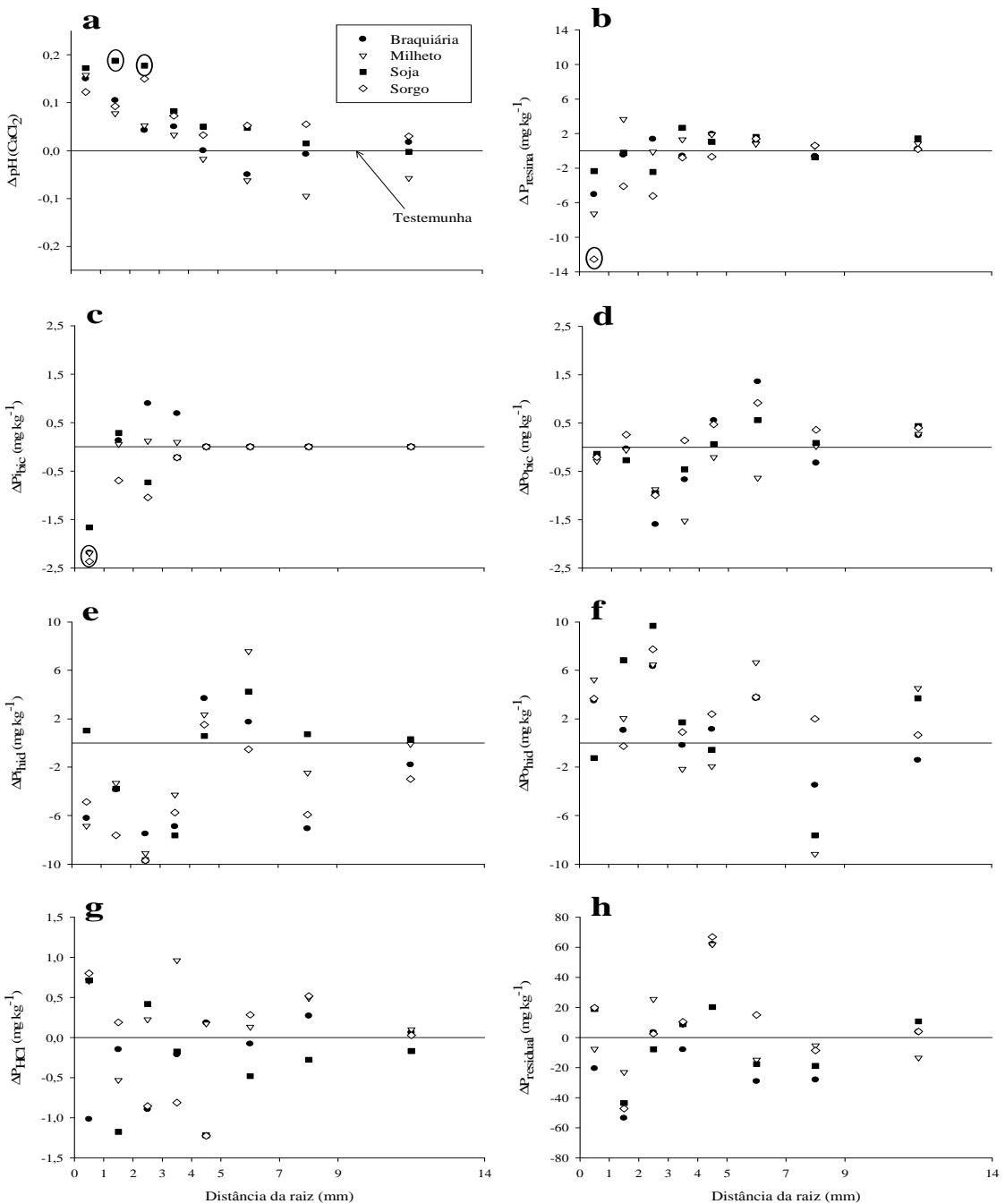


Figura 2 - Variação (Δ) em relação à testemunha ($y = 0$) nos valores de pH (CaCl_2) (a) e nos teores de P_{resina} (b), P_{bic} (c), $\text{P}_{\text{o_bic}}$ (d), P_{hid} (e), $\text{P}_{\text{o_hid}}$ (f), P_{HCl} (g) e $\text{P}_{\text{residual}}$ (h) proporcionados pelo cultivo de plantas, em diferentes camadas do solo a partir da rizosfera. Símbolos circulados indicam diferença significativa das respectivas espécies em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade de erro.

O sorgo foi a única espécie que diminuiu o teor de P_{resina} , porém, apenas na camada mais próxima as raízes (Figura 2b). Nas demais camadas, não houve efeito do cultivo das diferentes espécies. Para o teor de P_{bic} , houve redução com o cultivo de braquiária, milheto e sorgo apenas na camada mais próxima as raízes, enquanto que com o cultivo de soja não foi observada diferença no teor desta forma de P em nenhuma das camadas (Figura 2c).

Considerando o P_{resina} e o P_{bic} como formas disponíveis de P as plantas (HEDLEY et al., 1982; BECK e SANCHES, 1984; TIJESSEN et al., 1984; SHARPLEY e SMITH, 1985; STEWART e TIJESSEN, 1987; GUO e YOST, 1998; HENRIQUEZ e KILLORN, 2005; GATIBONI et al., 2007), podemos observar que houve depleção significativa de P com o cultivo de plantas, evidenciado pela diminuição nos teores destas formas na camada mais próxima às raízes. Contudo, a diminuição do P_{bic} em todos os tratamentos com gramíneas e do P_{resina} apenas com o sorgo não indica necessariamente absorção preferencial desta forma por determinadas espécies, e sim que existe uma interligação entre os compartimentos das frações de P no solo, conforme já relatado por Gatiboni et al. (2007). Desta forma, com a absorção de P_{resina} pelas plantas, é provável que esta forma foi reposta por outras formas, como o P_{bic} , explicando assim a diminuição apenas nos teores de P_{bic} com o cultivo de braquiária e milheto. Assim, observamos que somente as gramíneas proporcionaram depleção significativa de P na camada mais próximas às raízes, evidenciando sua maior capacidade de absorção deste nutriente no período de condução do experimento. Provavelmente, a principal fonte de P para a soja durante o período avaliado foi a própria semente (TRIGO et al., 1997), conforme pode ser observado nos valores de porcentagem do fósforo acumulado proveniente da semente (Tabela 4), que para a soja superou 100%, indicando que após o cultivo esta espécie acumulou em todo seu tecido valores de P menores do que os encontrados na semente de origem.

Em todas as camadas, os teores de P_{bic} , P_{hid} , P_{ohid} , P_{HCl} e $P_{residual}$ não foram influenciados pelo cultivo das diferentes espécies (Figuras 2d, 2e, 2f, 2g e 2h), fato este, justificado por estas formas de P serem consideradas menos disponíveis, e principalmente porque o período de cultivo foi muito curto e, por isso, a necessidade de P das culturas foi baixa. Gatiboni et al. (2008) observaram que quanto menor foi a disponibilidade de P às plantas, maior foi a extração de fosfatases com o objetivo de acessar formas orgânicas de P. Sendo assim, as plantas acessam as formas de P menos disponíveis principalmente quando necessitam de elevadas quantidades de P e há baixos teores das formas mais lábeis deste nutriente (GATIBONI et al., 2007), o que não ocorreu nas camadas mais próximas às raízes neste experimento, provavelmente devido a sedimentação de partículas tanto de solo como do fosfato natural que ocorreu no momento da confecção das colunas.

Para as variáveis onde houve efeito do cultivo de plantas, pH ($CaCl_2$), P_{resina} e P_{bic} , a alteração nos valores destas restringiram-se a camada mais próxima das raízes (0-1 mm), evidenciando a restrição espacial da alteração nos atributos químicos do solo em função do

desenvolvimento de raízes, conforme já relatado por Zoysa et al. (1997), Chen et al. (2002) e Li et al. (2008).

4.6 CONCLUSÕES

A soja diminuiu o pH do solo na camada mais próxima às raízes.

As gramíneas diminuíram as frações de P_{resina} e P_{bic} do solo na camada de 0-1 mm.

As alterações nos valores de pH e nas formas de P no solo proporcionadas pelo cultivo de plantas restringiram-se à camada mais próxima às raízes.

5 CAPÍTULO III: CINÉTICA DE ABSORÇÃO DE FÓSFORO E MORFOLOGIA DO SISTEMA RADICULAR DE SOJA, BRAQUIÁRIA, MILHETO E SORGO

5.1 RESUMO

As espécies de plantas apresentam características distintas de morfologia radicular e habilidade de absorção de fósforo. Este trabalho objetivou avaliar as características morfológicas do sistema radicular e os parâmetros cinéticos de absorção de P das plantas de soja, milheto, sorgo e braquiária cultivadas em solução nutritiva. Para tanto, foi desenvolvido um experimento em câmara de crescimento no Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV/UDESC), no período de outubro a novembro de 2010. Utilizou-se o delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições, e os tratamentos constaram do cultivo de soja, braquiária, milheto e sorgo. Sementes destas espécies foram germinadas em folhas papel umedecidas com água durante 7 dias e depois foram transplantadas para vasos contendo 4 L de solução nutritiva. Aos 22 dias após a semeadura, estas plantas foram transferidas para vasos com a concentração de P ajustada para $15 \mu\text{mol L}^{-1}$ para a realização da cinética de absorção de P, que consistiu na retirada de alíquotas da solução dos vasos durante 10 horas, em intervalos de uma hora, para quantificação do teor de P. Para estimativa do C_{\min} , foi retirada uma alíquota de cada vaso 24 horas após a retirada das primeiras alíquotas. Posteriormente, foram determinadas características da parte aérea (massa seca) e de raízes (massa fresca, massa seca, comprimento, volume, área e raio). Com base nas concentrações de P nas alíquotas retiradas e na massa seca de raízes foram estimados os valores de I_{\max} e K_m . Os dados foram submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$) e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Tukey. A soja obteve maior produção de fitomassa, e consequentemente maior comprimento, área e volume de raízes. A braquiária teve maior incremento na taxa de absorção de fósforo com a elevação da concentração deste nutriente na solução, em relação às demais espécies. A braquiária apresentou maior I_{\max} e a soja o menor C_{\min} .

Palavras – chave: Michaelis-Menten. Parâmetros cinéticos de absorção. Solução nutritiva.

5.2 ABSTRACT

Root morphology and the ability to uptake phosphorus vary with plant species. This study aimed to evaluate the morphological characteristics of the root system and the kinetic parameters of P uptake of soybean, millet, sorghum and brachiaria, determined in nutrient solution. The experiment was conducted in a growth chamber at Santa Catarina State University, Brazil, in 2010. It was conducted in a completely randomized design with four replications. Seeds of these four species were germinated in paper sheets. After 7 days they were transferred to pots containing 4 L of solution culture. Twenty-two days after sowing, the plants were transferred to pots containing $15 \mu\text{mol L}^{-1}$ of P in order to quantify the uptake kinetics for P. Samples of 10 mL of the nutrient solution were collected every hour during 10 hours for P determination. To estimate the C_{\min} value a sample was collected 24 hours after the beginning of the sampling procedure. Subsequently, the shoot dry weight and the following root parameters were determined: fresh weight, dry weight, length, volume, area and radius. Based on P concentrations in the solution culture aliquots collected overtime and on dry weight of roots, the values of K_m and I_{\max} were estimated. Data were submitted to analysis of variance ($p \leq 0.05$) and treatments means were compared by the Tukey test. Soybeans presented the highest biomass yield, and consequently the greatest values for length, area and volume of roots. Brachiaria had the highest increase in the rate of phosphorus uptake with increases on P concentration in the solution culture. Brachiaria had the highest I_{\max} and soybeans the lowest C_{\min} .

Keywords: Michaelis-Menten. Uptake kinetics parameters. Solution culture.

5.3 INTRODUÇÃO

A deficiência de fósforo (P) é uma das principais limitações ao desenvolvimento e à produtividade das culturas em solos do Cerrado brasileiro e, por isso, diversas espécies de plantas têm desenvolvido habilidades distintas para a aquisição de P do solo. Dentre elas, destacam-se as características morfológicas do sistema radicular (BIELESKI, 1973;

FURLANI, 1988; MACHADO e FURLANI, 2004) e os parâmetros cinéticos de absorção de nutrientes (HORN et al., 2006). Assim, maior desenvolvimento de raízes com consequente exploração de um grande volume de solo tem sido desejável (VILELA e ANGHINONI, 1984), principalmente em condições de disponibilidade reduzida de P (RÖMER et al., 1989), pois como o coeficiente de difusão de P no solo é extremamente baixo (ERNANI e BARBER, 1990) e as raízes têm capacidade de absorver P mais rapidamente do que ele pode ser fornecido por difusão (MARTINEZ et al., 1993), há formação de uma zona de depleção de P nos solos, que poderá ser contornada em parte, pela presença de um amplo sistema radicular. Deste modo, diferenças morfológicas neste sistema podem propiciar maior eficiência na absorção de P para certos grupos de plantas, pois em diversos trabalhos têm sido observada maior tolerância a baixos níveis de P no solo por parte das gramíneas, quando comparadas as leguminosas (CARADUS, 1980; DE MARIA e CASTRO, 1993; FOLONI et al., 2008). A maior eficiência das gramíneas foi explicada, além das diferenças na morfologia do sistema radicular, pelo aumento, da absorção de P por unidade de raiz, do acúmulo de P no sistema radicular (CARADUS, 1980) e da razão raiz/parte aérea (FÖHSE et al., 1988).

Contudo, além da morfologia radicular, os parâmetros cinéticos de absorção obtidos em condições controladas podem também indicar diferenças na capacidade de adaptação das plantas a situações de estresse nutricional (CLARKSON, 1985; HORN et al., 2006). Deste modo, através do cultivo de plantas em solução nutritiva podemos determinar o influxo máximo (I_{max}), a concentração de nutriente na solução em que ocorre a metade do I_{max} (K_m), bem como a concentração mínima de nutriente na solução para que ocorra absorção deste (C_{min}). Alterações em qualquer desses parâmetros poderão proporcionar maior ou menor eficiência de absorção de fósforo, onde o aumento nos valores de K_m e C_{min} significa redução na eficiência de absorção de nutrientes (NIELSEN e BARBER, 1978), enquanto a elevação no valor do I_{max} implica em maior eficiência de absorção. Assim, em situações de estresse nutricional de P, poderão ocorrer alterações em alguns desses parâmetros visando a nutrição adequada da planta. O aumento no influxo máximo induzido pelo estresse nutricional representa a primeira resposta das plantas para manter a absorção de nutrientes e preservar o crescimento (GLASS e SIDDIQI, 1984; CLARKSON, 1985; MUCHHAL e RAGHOTHAMA, 1999). Porém, além de aumentar a taxa de absorção, também é necessário reduzir a perda de P para o meio externo, pois segundo Bieleski e Ferguson (1983), nas células da superfície radicular, onde o apoplasto está em contato direto com a solução do solo, o plasmalema é a única barreira às potentes forças físicas que tendem a dirigir o P para a

solução. Deste modo, sob taxas constantes de efluxo, a saída de P seria significativa em condições de baixa disponibilidade do nutriente (MARTINEZ et al., 1993).

Pelo exposto, a determinação das características morfológicas do sistema radicular e dos parâmetros cinéticos de absorção poderá auxiliar na identificação de espécies com maior eficiência de absorção de fósforo, bem como na indicação de determinada espécie para compor um sistema de rotação/sucessão de culturas visando a ciclagem de P. Dentre as espécies cultivadas no Cerrado, a soja destaca-se como principal cultura produtora de grãos, e o milheto tem sido utilizado como planta de cobertura no período de entressafra. Contudo, outras espécies como o sorgo e a braquiária têm apresentado potencial para utilização como planta de cobertura nesta região. Deste modo, o presente trabalho objetivou avaliar as características morfológicas do sistema radicular e os parâmetros cinéticos de absorção de P de plantas de soja, milheto, sorgo e braquiária cultivadas em solução nutritiva.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado durante os meses de outubro e novembro de 2010, na Universidade do Estado de Santa Catarina – Centro de Ciências Agroveterinárias, na cidade de Lages, SC. Os tratamentos constaram do cultivo de *Glycine max* (L.) Merrill - soja, *Brachiaria brizantha* Hochst Stapf - braquiária, *Pennisetum glaucum* (L.) R. Brown - milheto e *Sorghum bicolor* (L.) Moench - sorgo) em delineamento experimental inteiramente casualizado com quatro repetições.

Sementes de cada espécie foram germinadas entre folhas de papel-toalha com base imersa numa solução com 0,2% de Ca. Sete dias após a semeadura, foram selecionadas quatro plantas de cada espécie por repetição (similares quanto ao desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular) e, em seguida, foram transplantadas em vasos plásticos contendo quatro litros de solução nutritiva. Na parte superior interna de cada vaso, foi ajustada uma lâmina de isopor com quatro furos equidistantes a, aproximadamente, um centímetro acima do nível da solução para manter as plantas eretas. Esses vasos foram transferidos para câmara de crescimento, ajustada para fotoperíodo diário de 12 horas, com temperatura de 30 °C, 75 % de umidade relativa do ar e radiação fotossinteticamente ativa ao nível da planta de 350 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. As 12 horas de escuro foram conduzidas com 25 °C e umidade relativa do ar de 85%. Na primeira semana após o transplante, empregou-se a metade da concentração da solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950), e a partir da segunda semana utilizou-se a

concentração integral da mesma, sendo esta substituída duas vezes por semana e seu pH ajustado diariamente para $5,5 \pm 0,2$.

Os parâmetros cinéticos de absorção, ou seja, o influxo máximo (I_{max}), a constante de Michaelis Menten (K_m), e a concentração abaixo da qual as plantas deixam de absorver os nutrientes (C_{min}) foram determinados pelo princípio descrito por Claassen e Barber (1974), o qual consiste na quantificação da diminuição da concentração do nutriente na solução de acordo com a absorção. Para tanto, aos 22 dias após a semeadura, as plantas foram transferidas para vasos contendo quatro litros de água destilada com a finalidade de elevar a capacidade de absorção de P (JUNGK, 1975). Após a permanência em água destilada por 24 horas, estas plantas retornaram a solução nutritiva contendo a concentração integral dos nutrientes, exceto para o P, o qual teve sua concentração ajustada para $15 \mu\text{mol L}^{-1}$. Esta concentração foi estimada com base na quantidade de P absorvida pelas plantas em 24 horas em ensaio prévio. As plantas permaneceram nesta solução por uma hora, para que o sistema atingisse as condições de estado estacionário de absorção requeridas para a aplicação do modelo cinético (EPSTEIN e HAGEN, 1952), e então foram transferidas para uma nova solução contendo as mesmas concentrações de nutrientes, inclusive com o ajuste do P para $15 \mu\text{mol L}^{-1}$. Em seguida, iniciou-se a coleta de alíquotas (10 mL) da solução de cada vaso, em intervalos de uma hora, durante 10 horas. Após 24 horas do início da coleta das alíquotas, procederam-se mais três coletas intercaladas em 3 horas para se ter certeza da obtenção do C_{min} das diferentes espécies. A determinação dos teores de P nas alíquotas foi realizada empregando-se o método colorimétrico proposto por Murphy e Riley (1962). A evapotranspiração de água dos vasos durante as dez horas de coleta foi estimada com base na diferença de peso do conjunto vaso + solução + planta entre o início e o fim das coletas.

Ao término da coleta das alíquotas, foi determinada a massa fresca de raízes através da pesagem das mesmas após ficarem pressionadas entre folhas de papel-toalha durante 2 minutos. Em seguida, foram retiradas amostras de, aproximadamente, 0,2 g de raízes frescas para a determinação do comprimento de raízes. Posteriormente, procedeu-se a secagem das plantas em estufa a 65°C até peso constante, para então determinar-se a massa seca de parte aérea e raízes.

Os valores dos parâmetros cinéticos I_{max} e K_m foram calculados por meio do “software” Cinética (RUIZ e FERNANDES FILHO, 1992), que se baseia no princípio desenvolvido por Claassen e Barber (1974). O C_{min} foi estimado a partir da última coleta, realizada 30 horas após o início do processo de retirada das alíquotas.

Os parâmetros morfológicos do sistema radicular foram determinados conforme método apresentado por Schenk e Barber (1979). O comprimento (L) foi medido pelo método de intersecção, descrito por Tennant (1975). O raio médio (R) da raiz foi calculado pela fórmula $R=(Pf/L\pi)^{0,5}$, sendo Pf o peso fresco das raízes. Essa fórmula pressupõe que as raízes tenham forma cilíndrica e densidade de $1,0 \text{ g cm}^{-3}$. A área (AR) e o volume (VR) foram calculados por meio das fórmulas $AR=(2\pi RL)$ e $VR=(\pi R^2)L$, respectivamente. Também foi calculada a relação entre a massa seca de raiz e a massa seca de parte aérea.

Os dados foram submetidos à análise de variância e para as causas de variações significativas a 5% de probabilidade de erro, procedeu-se o teste de Tukey para comparação das médias dos tratamentos.

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As espécies apresentaram diferença para a maioria das características da parte aérea e do sistema radicular avaliadas, exceto para o raio médio de raízes (Tabela 5). Para a massa fresca de raízes (MFR), a soja e a braquiária apresentaram os maiores e menores valores, respectivamente, enquanto o sorgo e o milheto apresentaram valores intermediários às duas outras espécies. De modo semelhante à MFR, a soja apresentou maiores valores de massa seca de raízes (MSR) em relação ao sorgo e a braquiária, porém sem diferir do milheto, e a braquiária apresentou o menor valor de MSR em relação às demais espécies.

Tabela 5 - Valores de massa fresca de raízes (MFR), massa seca de raízes (MSR), massa seca de parte aérea (MSPA), relação raiz/parte aérea (RRPA), comprimento de raízes (CR), raio médio de raízes (RMR), área de raízes (AR) e volume de raízes (VR) de soja, milheto, braquiária e sorgo.

Planta	MFR	MSR	MSPA	RRPA	CR	RMR	AR	VR
	----- g -----				m planta ⁻¹	mm	cm ² planta ⁻¹	cm ³ planta ⁻¹
Braquiária	3,84c	0,24c	0,93c	0,26b	9,4c	0,29	172c	2,5c
Milheto	11,85b	0,63ab	2,11b	0,30b	23,0ab	0,32	458ab	7,3ab
Soja	17,56a	0,79a	2,69a	0,29b	30,9a	0,33	639a	10,5a
Sorgo	9,55b	0,53b	1,39c	0,38a	19,6bc	0,31	380bc	5,9b
Valor de F	44,7**	23,2**	46,1**	16,4**	11,5**	2,5 ^{ns}	15,4**	17,8**
CV (%)	18	20	14	9	22	6	21	21

Médias seguidas de letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

** = significativo a 1% de probabilidade de erro pelo teste F.

^{ns} = não significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste F.

A soja produziu mais massa seca de parte aérea (MSPA), comparativamente às demais espécies, enquanto o sorgo e a braquiária apresentaram os menores valores para esta característica. O milheto apresentou valores de MSPA intermediários entre a soja e o sorgo. Com base na MFR, na MSR e na MSPA, observamos que a soja sempre apresentou maiores valores devido ao seu rápido desenvolvimento inicial em relação às demais espécies, e que dentre as gramíneas, o milheto demonstrou maior capacidade de acúmulo de massa seca durante o período de condução do experimento, onde esta característica é desejável para espécies de cobertura.

Contudo, ao analisarmos a relação raiz/parte aérea (RRPA), observamos que o sorgo apresentou maior valor (0,38) em relação às demais espécies. No entanto, os valores apresentados por todas as espécies estão abaixo dos comumente encontrados quando do cultivo destas plantas em solos com baixa disponibilidade de P. Isto ocorre porque plantas sob deficiência de P produzem maior sistema radicular em detrimento da parte aérea, buscando aumentar a absorção do nutriente em deficiência (BURAUEL et al., 1990; YASEEN e MALHI, 2009) e, como a concentração de P empregada na solução nutritiva neste experimento não representava limitação para absorção pelas plantas, estas privilegiaram o desenvolvimento da parte aérea.

A soja apresentou maior comprimento de raízes (CR) e área do sistema radicular (AR), comparativamente ao sorgo e à braquiária, porém, não diferiu do milheto. A braquiária apresentou menores valores em relação à soja e ao milheto, e não diferiu do sorgo, que por sua vez, não diferiu do milheto. De modo semelhante ao CR e a AR, a soja também apresentou maior volume de raiz (VR) em relação ao sorgo e à braquiária, contudo sem diferir do milheto. Menores valores para esta característica foram observados para a braquiária, e o sorgo apresentou valores intermediários entre a soja e a braquiária, porém não diferiu do milheto. Como maior CR, AR e VR são características desejáveis em plantas cultivadas, principalmente em solos com baixa fertilidade, uma vez que a absorção de nutrientes que se movem preferencialmente por difusão é proporcional ao volume de solo ocupado pelas raízes (VILELA e ANGHINONI, 1984; ERNANI et al., 1994), observarmos que a soja poderá apresentar maior absorção de P em relação as demais espécies. Contudo, é importante ressaltar o curto período de condução do experimento e as excelentes condições em que as plantas se desenvolveram (ambiente controlado e solução nutritiva), quando comparadas às encontradas em cultivo a campo, onde o comportamento das espécies poderá ser diferente.

Na avaliação dos parâmetros cinéticos de absorção, houve diferença entre os tratamentos para o influxo máximo de P (I_{max}) e para a concentração mínima de nutriente na solução para que ocorra absorção ($C_{mín}$), enquanto a concentração de nutriente na solução em que ocorre a metade do I_{max} (K_m), não diferiu entre as espécies (Tabela 6). Para I_{max} , a braquiária apresentou maiores valores em relação à soja, enquanto o sorgo e o milheto apresentaram valores intermediários, sem diferir de ambos os extremos. Segundo Furlani (1988), menores valores de K_m são sempre desejáveis numa planta eficiente na absorção de P em soluções muito diluídas. Contudo, como o K_m é calculado com base no I_{max} , e expressa apenas a concentração do nutriente na solução, e não a taxa de influxo que ocorre naquela concentração, a comparação direta entre o K_m das espécies só é válida se estas apresentarem I_{max} semelhantes, onde, K_m iguais representariam influxos parecidos, fato este não ocorrido neste experimento. Por outro lado, a comparação isolada do I_{max} só terá importância quando ocorrerem elevadas concentrações de nutriente na solução, situação esta de difícil ocorrência para o P em solos tropicais. Por isso, sugerimos o cálculo da relação K_m/I_{max} , que considera as variáveis K_m e I_{max} conjuntamente, onde menores valores desta relação, alcançados com baixo K_m e/ou alto I_{max} , sugerem a maior capacidade de absorção de nutrientes. Deste modo, ao observarmos a relação K_m/I_{max} das espécies avaliadas (Tabela 6), destacamos a braquiária com baixo valor desta relação, devido ao maior I_{max} em relação às demais espécies, tendo em vista a ausência de diferenças entre os K_m . Assim, a braquiária é promissora para compor um sistema de rotação/sucessão com a soja, desde que haja tempo e disponibilidade hídrica suficiente para considerável acúmulo de massa seca desta planta, tendo em vista seu lento desenvolvimento inicial e a escassez de chuvas no período de entressafra no Cerrado.

Tabela 6 - Valores de influxo máximo de fósforo (I_{max}), concentração de fósforo na solução em que ocorre a metade do I_{max} (K_m), concentração mínima de fósforo na solução para que ocorra absorção ($C_{mín}$) e relação K_m/I_{max} estimados para soja, milheto, braquiária e sorgo.

Planta	I_{max}	K_m	$C_{mín}$	K_m/I_{max}
	$\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$		
Braquiária	10,93a	1,80	1,44ab	0,16
Milheto	7,23ab	2,86	1,22ab	0,40
Soja	4,92b	1,92	0,61b	0,39
Sorgo	5,63ab	2,62	1,97a	0,47
Valor de F	4,4*	1,3 ^{ns}	6,1**	-
CV (%)	37	42	38	-

Médias seguidas de letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

** = significativo a 1% de probabilidade de erro pelo teste F.

* = significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste F.

ns = não significativo a 5% de probabilidade de erro pelo teste F.

Para o $C_{mín}$, a soja apresentou menores valores em relação ao sorgo, enquanto o milheto e a braquiária não diferiram das outras espécies. De acordo com Horn et al. (2006), quando não há limitação na chegada dos nutrientes às raízes, o $C_{mín}$ não tem muita importância, pois não limita a absorção, contudo, quando o suprimento pelo solo é pequeno, como ocorre em solos com baixa concentração de nutrientes ou em períodos de déficit hídrico, o $C_{mín}$ exerce grande influência na absorção. Deste modo, sob condições de disponibilidade restrita de P no solo, a soja poderá apresentar maior capacidade de absorção de P quando comparada as demais espécies avaliadas.

Na Figura 3, observamos as curvas de absorção de fósforo de cada uma das espécies avaliadas em função da concentração deste nutriente na solução, com destaque para a curva da braquiária, a qual apresenta maior aumento na taxa de absorção de P com a elevação na concentração de P na solução em relação às demais espécies, caracterizando esta espécie como mais responsiva a pequenas variações no teor de P na solução. Nesta mesma figura, também observamos que o maior incremento na absorção de P pelas espécies ocorre até a concentração de aproximadamente $5 \mu\text{mol L}^{-1}$ de P na solução, concentração esta passível de ocorrer no solo, pois de acordo com Fardeau (1996), os teores de P na solução de solos agrícolas variam de $0,06 - 65 \mu\text{mol L}^{-1}$.

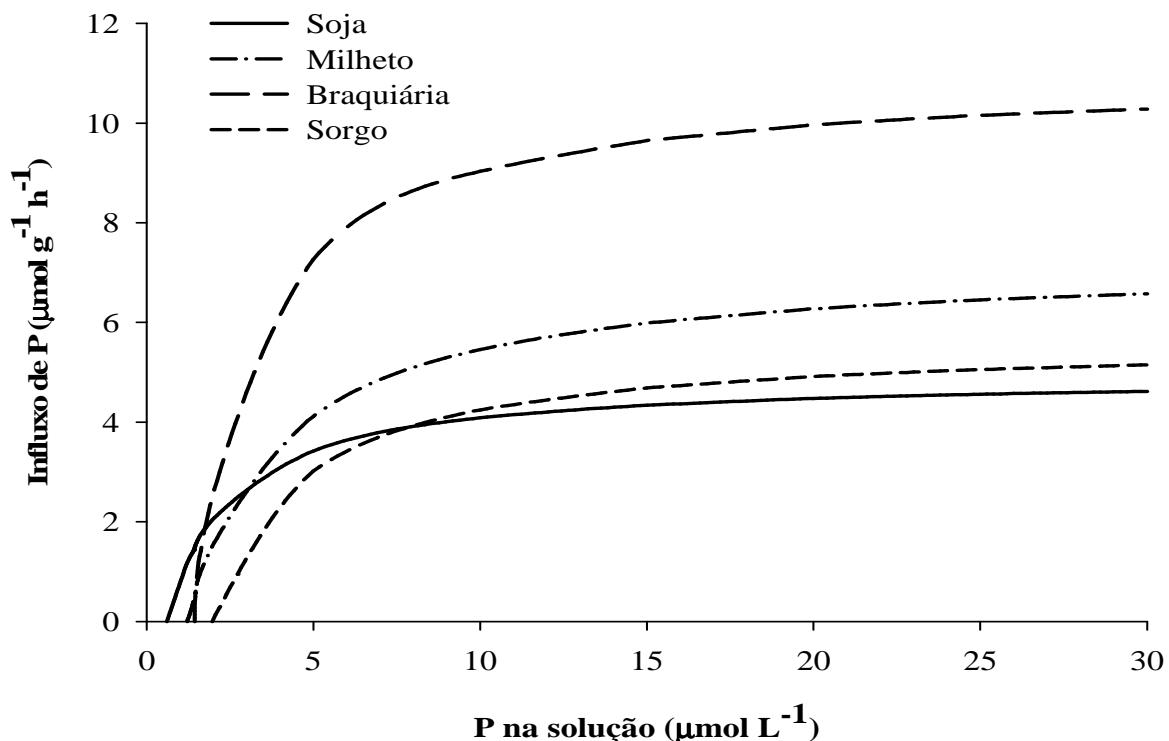


Figura 3 - Taxa de absorção de fósforo de soja, milheto, braquiária e sorgo em função da concentração de fósforo na solução.

5.6 CONCLUSÕES

A soja e o milheto apresentam maior sistema radicular e capacidade de exploração do solo em relação às demais espécies.

A braquiária apresenta maior incremento na taxa de absorção de fósforo com a elevação da concentração deste nutriente na solução, em relação às demais espécies.

Dentre as espécies, a braquiária apresenta maior taxa de absorção de P em elevadas concentrações deste nutriente na solução, enquanto a soja apresenta maior capacidade de absorção de P em baixas concentrações na solução.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em experimentos de curta duração, a quantidade de nutrientes na semente e a velocidade de desenvolvimento inicial das plantas parecem ser características determinantes para a diferenciação de espécies quanto ao crescimento e acúmulo de nutrientes, principalmente em condições de baixa fertilidade do solo. Assim, experimentos futuros objetivando comparar espécies vegetais quanto à eficiência de absorção de nutrientes deverão ter um maior tempo de cultivo, a fim de que se esgotem as reservas de nutrientes da semente.

A braquiária apresentou maior eficiência no aproveitamento do fosfato natural de Arad quando comparada às demais espécies, caracterizando esta como promissora na ciclagem de P. Tal eficiência pode estar relacionada com o maior I_{max} e a menor relação K_m/I_{max} desta cultura, o que permite que a planta tenha um maior incremento na sua capacidade de absorção de P mesmo com pequeno aumento na concentração deste elemento na solução, em relação às demais espécies. Contudo, é válido ressaltar o lento desenvolvimento inicial desta espécie, característica esta, que poderá ser limitante a sua utilização como planta de cobertura em solos de cerrado fertilizados com fosfato natural quando não houver tempo hábil para seu desenvolvimento, como no caso da colheita de cultivares tardias de soja na região centro-oeste do país, devido à escassez de chuvas a partir do mês de abril. Nesta situação, seria recomendado utilizar o milheto como planta de cobertura, pois também demonstrou um índice positivo de aproveitamento relativo do Arad, embora menor que o da braquiária, e apresenta um rápido desenvolvimento inicial, proporcionando bom acúmulo de fitomassa antes do início da escassez das chuvas. Em síntese, seria recomendável implantar a braquiária após a colheita de cultivares precoces de soja e o milheto após culturares tardias.

Outro entrave na utilização da braquiária como planta de cobertura visando à ciclagem de nutrientes refere-se à baixa taxa de decomposição dos resíduos desta espécie, sendo esta característica responsável pela lenta mineralização dos nutrientes presentes no tecido. Deste modo, os efeitos da utilização da braquiária como planta de cobertura na ciclagem de nutrientes poderão ser observados apenas em longo prazo.

Na avaliação da rizosfera, o pH do solo foi mais influenciado pela adubação nitrogenada do que pelo cultivo de plantas, provavelmente devido a baixa absorção diferencial entre cátions e ânions durante o curto período de cultivo. Por isso, tais alterações no pH em função do desenvolvimento das plantas ocorreram de forma pouco expressiva e não influenciaram significativamente a disponibilidade de P.

Observamos também que as formas de P predominantemente acessadas pelas plantas foram o P_{resina} e o P_{bic} , provavelmente devido a baixa exigência de P pelas plantas no período de condução do experimento e, também devido a sedimentação das partículas de solo e fertilizante que proporcionaram elevadas concentrações de P disponível nas camadas de solo mais próximas as raízes. Assim, na condução de novos experimentos utilizando colunas de solo com o objetivo de avaliar a rizosfera deve-se ter especial atenção para não ocorrer sedimentação de partículas mais finas que possam interferir nos resultados.

Na caracterização dos parâmetros cinéticos de absorção de P, observamos diferenças entre o I_{max} e o $C_{\text{mín}}$ de algumas espécies. Contudo, como a concentração de P na solução do solo é variável tanto espacialmente, como no caso da aplicação de fertilizantes onde haverá altas concentrações de P próximos aos grânulos de adubo, como temporalmente, quando há maior ou menor umidade do solo, o I_{max} pode ser o parâmetro mais importante no acúmulo de nutrientes pelas plantas quando comparado ao $C_{\text{mín}}$. Assim, em regiões ou períodos de alta concentração de P, as plantas com maior I_{max} poderão absorver grandes quantidades deste nutriente. Entretanto, plantas com baixo $C_{\text{mín}}$ terão lenta, mas contínua absorção de P mesmo em baixas concentrações na solução, porém dependendo do período de atuação do $C_{\text{mín}}$ a quantidade acumulada poderá não equivaler a absorvida pelas plantas com maior I_{max} .

REFERÊNCIAS

AE, N.; ARIHARA, J.; OKADA, K. Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of the Indian subcontinent. **Science**, New York, v. 248, p. 477-480, 1990.

AGBENIN, J.O. Free energy and kinetics of dissolution of Sokoto rock phosphate and the implications for replenishing phosphorus in the savanna soil of Nigeria. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 55, p. 55-61, 2004.

ALCÂNTARA, F.A.; FURTINI NETO, A.E.; PAULA, M.B.; MESQUITA, H.A.; MUNIZ, J.A. Adubação verde na recuperação da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Escuro degradado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 277-288, 2000.

ALCÂNTARA, P.B.; BUFARAH, G. **Plantas forrageiras: gramíneas e leguminosas**. 5. ed. São Paulo: Nobel, 1998. 162 p.

ALVES, V.M.C.; PARENTONI, S.N.; VASCONCELLOS, C.A.; PITTA, G.V.E.; FRANÇA, C.C.M. Cinética de absorção de fósforo e crescimento do sistema radicular de genótipos de milho contrastantes para eficiência a fósforo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 1, p. 85-92, 2002.

ARCAND, M.M; SCHNEIDER, K.D. Plant and microbial bases mechanisms to improve the agronomic effectiveness of phosphate rock: a review. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, Rio de Janeiro, v. 78, p. 791-807, 2006.

ASMAR, F. Variation in activity of root extracellular phytase between genotypes of barley. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 195, p. 61-64, 1977.

BANZATO, D.A.; KRONKA, S.N. **Experimentação agrícola**. 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 237 p.

BARBER, S.A. **Soil Nutrient Bioavailability**. 2. ed. New York: John Wiley and Sons, 1995. 414 p.

BECK, M.A.; SANCHES, P.A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. **Soil Science**, Baltimore, v. 34, p. 1424-1431, 1994.

BERTRAND, I.; HINSINGER, P.; JAILLARD, B.; ARVIEU, J.C. Dynamics of phosphorus in the rhizosphere of maize and rape grown on synthetic, phosphated calcite and goethite. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 211, p. 111-119, 1999.

BIELESKI, R.L. Phosphate pool, phosphate transport, and phosphate availability. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 24, p. 225-252, 1973.

BIELESKI, R.L.; FERGUSON, I.B. Physiology and metabolism of phosphate and its compounds. In: LAUCHLI, A.; BIELESKI, B.L. **Encyclopedia of plant physiology: inorganic plant nutrition**. Berlin: Springer-Verlag, 1983. p. 442-449.

BOLAN, N.S.; ELLIOT, J.; GREGG, P.E.H.; WEIL, S. Enhanced dissolution of phosphate rocks in the rhizosphere. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 24, p. 169-174, 1997.

BRAZ, A.J.B.P.; SILVEIRA, P.M.; KLIEMANN, H.J.; ZIMMERMANN, F.J.P. Acumulação de nutrientes em folhas de milheto e dos capins braquiária e mombaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 34, p. 83-87, 2004.

BURAUEL, P.; WIENEKE, J.; FUHR, F. Carbohydrate status in roots of two soybean cultivars: a possible parameter to explain different efficiencies concerning phosphate uptake. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 123, p. 169-174, 1990.

CARADUS, J.R. Distinguishing between grass and legume species for efficiency of phosphorus use. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Wellington, v. 23, p. 75-81, 1980.

CARVALHO, A.M.; FAGERIA, N.K.; OLIVEIRA, I.P.; KINJO, T. Resposta do feijoeiro à aplicação de fósforo em solos dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 61-67, 1995.

CHAPIN, S.L.; BIELESKI, R.L. Mild phosphorus stress in barley and related low-phosphorus-adapted barleygrass: phosphorus fractions and phosphate absorption on relation to growth. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 54, p. 309-317, 1982.

CHEN, C.R.; CONDRON, L.M.; DAVIS, M.R.; SHERLOCK, R.R. Phosphorus dynamics in the rhizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and radiate pine (*Pinus radiate* D. Don.). **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 34, p. 487-499, 2002.

CHIEN, S.H.; CARMONA, G.; HENAO, J.; PROCHNOW, L.I. Evaluation of rape response to different sources of phosphate rock in an alkaline soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, p. 1825-1835, 2003.

CHIEN, S.H.; HAMMOND, L.L. A comparison of various laboratory methods for predicting the agronomic potential of phosphate rocks for direct application. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 42, p. 935-939, 1978.

CHIEN, S.H.; MENON, R.G. Factors affecting the agronomic effectiveness of phosphate rock for direct application. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 41, p. 227-234, 1995.

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

CLARK, R.B. Physiology of cereals for mineral nutrient uptake, use, and efficiency. In: BALIGAR, V.C.; DUNCAN, R.R. **Crops as enhancers of nutrient use**. San Diego: Academic Press, 1990. p. 131-209.

CLARKSON, D.T. Factors affecting mineral nutrients acquisition by plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v. 36, p. 77-115. 1985.

COOK, R.L. Divergent influence of degree of base saturation of soils on the availability of native, soluble, and rock phosphates. **Journal of the American Society of Agronomy**, Madison, v. 27, p. 297-311, 1935.

DAROLT, M.R. Princípios para implantação e manutenção do sistema. In: DAROLT, M.R. **Plantio direto: pequena propriedade sustentável**. Londrina: IAPAR, 1998. p. 16-45 (Circular, 101).

DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M. Fósforo, potássio e matéria orgânica em um Latossolo Roxo, sob sistemas de manejo com milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 471-477, 1993.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A. Requisitos para a implantação e a manutenção do sistema plantio direto. In: CNPT-EMBRAPA, FUNDACEP-FECOTRIGO, FUNDAÇÃO ABC. **Plantio direto no Brasil**. Passo Fundo: Aldeia Norte, 1993. p. 19-27.

DREW, M.C.; SAKER, L.R. Uptake and long-distance transport of phosphate, potassium and chloride in relation to internal ion concentrations in barley: evidence of nonallosteric regulation. **Planta**, Berlin, v. 160, p. 500-507, 1984.

DUDA, G.P.; GUERRA, J.G.M.; MONTEIRO, M.T.; DE-POLLI, H.; TEIXEIRA, M.G. Perennial herbaceous legumes as live soil mulches and their effects on C, N and P of the microbial biomass. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 60, p. 139-147, 2003.

EPSTEIN, E.; HAGEN, C.E. A kinetic study of the absorption of alkali cations by barley roots. **Plant Physiology**, Palo Alto, v. 27, p. 457-474, 1952.

ERNANI, P.R., BARBER, S.A. Comparison of P-availability from monocalcium diammonium phosphates using a mechanistic nutrient uptake model. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v. 22, p. 15-20, 1990.

ERNANI, P.R.; SANTOS, J.C.P.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. Prediction of phosphorus uptake by a mechanistic model in a low phosphorus highly weathered soil as affected by mycorrhizae inoculation. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 17, p. 1067-1078, 1994.

FARDEAU, J.C. Dynamics of phosphate in soils: an isotopic outlook. **Fertility Research**, Dordrecht, v. 45, p. 91-100, 1996.

FLACH, E.N.; QUAK, W.; VAN DIEST, A. A comparison of the rock phosphate-mobilizing capacities of various crop species. **Tropical Agriculture**, Trinidad, v. 64, p. 347-352. 1987.

FÖHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. Phosphorus efficiency of plants. I. External and internal P requirement and P uptake efficiency of different plant species. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 110, p. 101-109, 1988.

FOLONI, J.S.S.; TIRITAN, C.S.; CALONEGO, J.C.; ALVES JUNIOR, J. Aplicação de fosfato natural e reciclagem de fósforo por milheto, braquiária, milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1147-1155, 2008.

FURLANI, A.M.C. Variações em parâmetros de cinética de absorção de fósforo de três linhagens de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, p. 77-80, 1988.

GAHOONIA, T.S.; CLAASSEN, N.; ALBRECHT, J. Mobilization of phosphate in different soils by ryegrass supplied with ammonium or nitrate. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 140, p. 241-248, 1992.

GAHOONIA, T.S.; NIELSEN, N.E. Root traits as tools for creating phosphorus efficient crop varieties. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 206, p. 47-57, 2004.

GARDNER, W.K.; BARBER, D.A.; PARBERY, K.G. The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L. III. The probable mechanism by which phosphorus movement in the soil/root interface is enhanced. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 70, p. 107-124, 1983.

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, D.S.; RHEINHEIMER, D.S.; BRUNETTO, G. Superphosphate and rock phosphates as phosphorus sources for Grass-clover pasture on a limed acid soil in southern Brazil. **Communications in soil science and plant analysis**, New York, v. 34, p. 2503-2514, 2003.

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; BRUNETTO, G. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatases ácidas durante a diminuição do fósforo disponível no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 1085-1091, 2008.

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; FLORES, J.P.C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 691-699, 2007.

GERKE, J.; RÖMER, W.; JUNGK, A. The excretion of citric and malic acid by proteoid roots of *Lupinus albus* L.: effects on soil solution concentrations of phosphate, iron, and aluminium in the proteoid rhizosphere samples of an Oxisol and a Luvisol. **Z Pflanzenernaehr Bodenk**, Weinheim, v. 157, p. 289-294, 1994.

GLASS, A.D.M.; SIDDQI, M.Y. The control of uptake rates in relation to the inorganic composition of plants. In: TINKER, P.B.; LAÜCHLI, A. **Advances in Plant Nutrition**. New York: Praeger Pub, 1984. p. 103-147.

GOEDERT, W.J.; SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W.J., ed. **Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel, 1986. p. 129-166.

GUIDRY, M.W.; MACKENZIE, F.T. Experimental study of igneous and sedimentary apatite dissolution: Control of pH, distance from equilibrium, and temperature on dissolution rates. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Washington, v. 67, p. 2949-2963, 2003.

GUO, F.; YOST, R.S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Science**, Baltimore, v. 163, p. 822-833, 1998.

HAYNES, R.J. Active ion uptake and maintenance of cation-anion balance: a critical examination of their role in regulating rhizosphere pH. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 126, p. 247-264, 1990.

HAYNES, R.J. Relative ability of a range of crop species to use phosphate rock and monocalcium phosphate as P sources when grown in soil. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 60, p. 205-211, 1992.

HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; GHUAHAN, B.S. Changes in inorganic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 970-976, 1982.

HENRIQUEZ, C.; KILLORN, R. Soil P forms and P uptake under intensive plant growth in the greenhouse. **Agronomía Costarricense**, San José, v. 29, p. 83-97, 2005.

HINSINGER, P. How do plant roots acquire mineral nutrients? Chemical processes involved in the rhizosphere. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 64, p. 225-265, 1998.

HINSINGER, P.; GILKES, R. J. Root-induced dissolution of phosphate rock in the rhizosphere of lupins grown in alkaline soil. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 33, p. 477-489, 1995.

HINSINGER, P.; GILKES, R.J. Dissolution of phosphate rock in the rhizosphere of five plant species grown in an acid, P fixing mineral substrate. **Geoderma**, Amsterdam, v. 75, p. 231-249, 1997.

HINSINGER, P.; PLASSARD, C.; TANG, C.; JAILLARD, B. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 248, p. 43-59, 2003.

HINSINGER, P; GILKES, R.J. Mobilization of phosphate from phosphorus rock and alumina-sorbed phosphate by the roots of ryegrass and clover as related to rhizosphere pH. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 47, p. 533-544, 1996.

HOAGLAND, D.R.; ARNON, D.I. **The Water-cultured method for growing plants without soil**. California: California Agricultural Experiment Station, 1950. 32 p. (Circular, 347).

HOFFLAND, E.; FINDENEGG, G.R.; NELEMANS, J.A. Solubilization of rock phosphate by rape. II. Local root exudation of organic acids as a response to P-starvation. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 113, p. 161-165, 1989.

HORN, D.; ERNANI, P.R.; SANGOI, L.; SCHWEITZER, C.; CASSOL, P.C. Parâmetros cinéticos e morfológicos da absorção de nutrientes em cultivares de milho com variabilidade genética contrastantes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 77-85, 2006.

HOROWITZ, N.; MEURER, E.J. Eficiência agronômica dos fosfatos naturais. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S., eds. **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAPOS, 2004. p. 605-651.

HORST, B.G.; WASCHKIES, C. Phosphorus nutrition of springwheat in mixed culture with white lupin (*Lupinus albus* L.). **Z Pflanzenernaehr Bodenkd**, Weinheim, v. 150, p. 1-8, 1987.

JONES, D.L. Organic acids in the rhizosphere: a critical review. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 205, p. 25-44, 1998.

JUNGK, A. Phosphate uptake characteristics of intact root systems in nutrient solution as affected by plants species age and P supply. In: INTERNATIONAL COLLOQUIUM ON PLANT ANALYSIS AND FERTILITY PROBLEMS, 7., 1975, Hannover. **Proceedings...** Hannover, West Germany: J. Wehrmann, 1975. p. 185-196.

KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. **Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo.** Santa Maria: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1997. 31 p. (Boletim Técnico, 3)

KANDELER, E.; MARSCHNER, P.; TSCHERKO, D.; GAHOONIA, T.S.; NIELSEN, N.E. Microbial community composition and functional diversity in the rhizosphere of maize. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 238, p. 301-312, 2002.

KHASAWNEH, F.E.; DOLL, E.C. The use of phosphate rock for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 30, p. 159-206, 1978.

KLIEMANN, H.J.; LIMA, D.V. Eficiência agronômica de fosfatos naturais e sua influência no fósforo disponível em dois solos de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 31, p. 111-119, 2001.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L.F. Desempenho de culturas anuais sobre palhada de braquiária. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L.F.; AIDAR, H. **Integração lavoura-pecuária**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. p. 499-522.

LANGE, A.; CABEZAS, W.A.R.L.; TRIVELIN, P.C.O. Matéria seca e ciclagem de nutrientes na palha em solo arenoso em sistema semeadura direta no cerrado. In: FERTBIO, 2004, Lages. **Resumos...** Lages: UDESC, 2004. (CD-ROM).

LÄUCHLI, A. Soil science in the next twenty five years: does a biotechnology play a role? **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, p. 1405-1409, 1987.

LEE, R.B. Selectivity and kinetics of ion uptake by barley plant following nutrient deficiency. **Annual Botany**, London, v. 50, p. 429-449, 1982.

LEHR, J.R.; McCLELLAN. **A revised laboratory reactivity for evaluating phosphate rocks for direct application.** Muscle shoals: National Fertilizer Development Center, 1972. 36 p. (Bulletin, Y-43).

LI, H.; SHEN, J.; ZHANG, F.; CLAIROTTE, M.; DREVON, J.J.; LE CADRE, E.; HINSIGER, P. Dynamics of phosphorus fractions in the rhizosphere of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and durum wheat (*Triticum turgidum durum* L.) grown in monocropping and intercropping systems. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 312, p. 139-150, 2008.

LI, S.M.; LI, L.; ZHANG, F.S.; TANG, C. Acid phosphatase role in chickpea/maize intercropping. **Annals of Botany**, Oxford, v. 94, p. 297-303, 2004.

MACEDO, M.C.M. Adubação fosfatada em pastagens cultivadas com ênfase na região do Cerrado. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S., eds. **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p. 359-396.

MACHADO, C.T.T.; FURLANI, A.M.C. Kinetics of phosphorus uptake and root morphology of local and improved varieties of maize. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, p. 69-76, 2004.

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

MARTINEZ, H.E.P.; NOVAIS, R.F.; RODRIGUES, L.A.; SACRAMENTO, V.S. Comportamento de variedades de soja cultivadas em diferentes doses de fósforo: I. cinética de absorção de fósforo e ajustes morfológicos da planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 17, p. 231-238, 1993.

MIOLA, G. R. **Extração de P, K, Ca, e Mg do solo por diferentes métodos e avaliação da disponibilidade de P às plantas**. 1995. 127 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1995.

MNKENI, P.N.S.; CHEN, S.H.; CARMONA, G. Effectiveness of Panda Hills phosphate rock compacted with triple superphosphate as source of phosphorus for rape wheat maize and soybean. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 31, p. 3163-3175, 2000.

MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; MORAES, L.A.C. Eficiência de fontes e doses de fósforo na alfafa e centrosema cultivadas em Latossolo Amarelo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 1459-1466, 2002.

MOREL, C.; HINSINGER, P. Root-induced modifications of the exchange of phosphate ion between soil solution and soil solid phase. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 211, p. 103-110, 1999.

MUCHHAL, U.S.; RAGHOTHAMA, K.G. Transcriptional regulation of plant phosphate transporters. **Proceedings of the National Academy of Science**, Washington, v. 96, p. 5868-5872, 1999.

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

NIELSEN, N.E.; BARBER, S.S. Differences among genotypes of corn in the kinetics of P uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v. 70, p. 695-698, 1978.

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

NURUZZAMAN, M.; LAMBERS, H.; BOLLAND, M.D.A.; VENEKLAAS, E.J. Distribution of carboxylates and acid phosphatase and depletion of different phosphorus fractions in the rhizosphere of a cereal and three grain legumes. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 281, p. 109-120, 2006.

NYING, C.S.; ROBINSON, S.J. Factors influencing the dissolution of phosphate rock in a range of high P-fixing soils from Cameroon. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 37, p. 2627-2645, 2006.

OLIVEIRA, T.K.; CARVALHO, G.J.; FURTINI NETO, A.N.; LIMA, P.C.; MORAES, R.N.S. Atributos químicos do solo sob diferentes plantas de cobertura na implantação do sistema plantio direto. **Revista Agricultura Tropical**, Cuiabá, v. 8, p. 57-71, 2005.

OLIVEIRA, T.K.; CARVALHO, G.J.; MORAES, R.N.S. Plantas de cobertura e seus efeitos sobre o feijoeiro em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, p. 1079-1087, 2002.

OMAR, S.A. The role of rock-phosphate-solubilizing fungi and vesicular - arbuscular - mycorrhiza VAM) in growth of wheat plants fertilized with rock phosphate. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, Dordrecht, v. 14, p. 211-218, 1998.

PEARSE, S.J.; VENEKLAAS, E.J.; CAWTHRAY, G.; BOLLAND, M.D.A.; LAMBERS, H. Carboxylate composition of root exudates does not relate consistently to a crop species ability to use phosphorus from aluminium, iron or calcium phosphate sources. **New Phytologist**, Lancaster, v. 173, p. 181-190, 2007.

PEARSE, S.J.; VENEKLAAS, E.J.; CAWTHRAY, G.; BOLLAND, M.D.A.; LAMBERS, H. *Triticum aestivum* shows a greater biomass response to a supply of aluminium phosphate than *Lupinus albus* despite releasing fewer carboxylates into the rhizosphere. **New Phytologist**, Lancaster, v. 169, p. 515-524, 2006.

PEREZ, M.J.; SMYTH, T.J.; ISRAEL, D.W. Comparative effects of two forage species on rhizosphere acidification and solubilization of phosphate rocks of different reactivity. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 30, p. 1421-1439, 2007.

PROCHNOW, L.I.; ALCARDE, J.C.; CHIEN, S.H. Eficiência agronômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S., eds. **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: POTAPOS, 2004. p. 605-651.

RADERSMA, S.; GRIERSON, P.F. Phosphorus mobilization in agroforestry: Organic anions, phosphatase activity and phosphorus fractions in the rhizosphere, **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 259, p. 209-219, 2004.

RAMIREZ, R.; FERNANDEZ, S.M.; LIZASO, J.I. Changes of pH and available phosphorus and calcium in rhizosphere of aluminum-tolerant maize germplasm with phosphate rock. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 32, p. 1551-1565, 2001.

RAMOS, S.J.; FAQUIN, V.; RODRIGUES, C.R.; SILVA, C.A.; ÁVILA, F.W.; SAMPAIO, R.A. Utilização de fósforo e produção de feijoeiro: influência de gramíneas forrageiras e fontes de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 89-96, 2010.

RAMOS, S.J.; FAQUIN, V.; RODRIGUES, C.R.; SILVA, C.A.; BOLDRIN, P.F. Biomass production and phosphorus use of forage grasses fertilized with two phosphorus sources. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 335-343, 2009.

ROBINSON, J.S.; SYERS, J.K. A critical evaluation of the factors influencing the dissolution of Gafsa phosphate rock. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 41, p. 597-605, 1990.

ROBINSON, J.S.; SYERS, J.K. Effects of solution calcium concentration and calcium sink size on the dissolution of Gafsa phosphate rock in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 42, p. 389-397, 1991.

ROBINSON, J.S.; SYERS, J.K.; BOLAN, N.S. A simple conceptual model for predicting the dissolution of phosphate rock in soils. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 64, p. 397-403, 1994.

RÖMER, W.; AUGUSTIN, J.; SCHILLING, G. The relationship between phosphate absorption and root length in nine wheat cultivars. In: LOUGHMAN, B.C.; GASPAROKOVA, O.; KOLET, J., eds. **Structural and functional aspects of transport in roots**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989. p. 123-125.

ROSOLEM, C.A.; CALONEGO, J.C.; FOLONI, J.S.S. Lixiviação de potássio da palha de espécies de cobertura de solo de acordo com a quantidade de chuva aplicada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 355-362, 2003.

RUIZ, H.A.; FERNANDES FILHO, E.I. Cinética: Software para estimar as constantes V_{max} e K_m da equação de Michaelis-Menten. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 10., Piracicaba, 1992, **Anais...** Piracicaba, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p. 124-125.

RYAN, P.R.; DELHAIZE, E.; JONES, D.L. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 52, p. 527-560, 2001.

SANTOS, H.P.; LHAMBY, J.C.B.; SPERA, S.T. Rendimento de grãos de soja em função de diferentes sistemas de manejo de solo e de rotação de culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 21-29, 2006.

SANYAL, S.K.; DATTA, S.K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. **Advanced Soil Science**, New York, v. 16, p. 102-120, 1991.

SCHENK, M.K.; BARBER, S.A. Phosphate uptake by corn as affected by soil characteristics and root morphology. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, p. 880-883, 1979.

SCHERER, H.W.; SHARMA, S.P. Phosphorus fractions and phosphorus delivery potential of aluvisol derived from loess amended with organic material. **Biology and Fertility of Soils**, Heidelberg, v. 35, p. 414-419, 2002.

SCHJORRING, J.K.; JENSÉN, P. Phosphorus export from roots to shoots of barley, buckwheat and rape seedlings with different P status. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v. 70, p. 58-64, 1987.

SCHOLEFIELD, D.; SHELDICK, R.D.; MARTYN, T.M.; LAVENDER, R.H. A comparison of triple superphosphate and Gafsa ground rock phosphate fertilisers as P-sources for grass-clover swards on a poorly-drained acid clay soil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Netherlands, v. 53, p. 147-155, 1999.

SHARPLEY, A.N.; SMITH, S.J. Fractionation of inorganic and organic phosphorus in virgin and cultivated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 127-130, 1985.

SHI, W.; WANG, X.; YAN, W. Distribution patterns of available P and K in rape rhizosphere in relation to genotypic difference. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 261, p. 11-16, 2004.

SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; BUZZETTI, S.; VELOSO, M.E.C.; TRIVELIN, P.C.O. Aproveitamento do nitrogênio (^{15}N) da crotalária e do milheto pelo milho sob plantio direto em Latossolo Vermelho de Cerrado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 739-746, 2006.

SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E. Calagem e adubação para culturas anuais e semiperenes. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E., eds. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p. 283-316.

SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E.; REIN, T.A. Adubação com fósforo. In: SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E., eds. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p. 147-168.

STEWART, J.W.B.; TIESSEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. **Biogeochemistry**, Netherlands, v. 4, p. 41-60, 1987.

TANG, C.; RENGEL, Z. Role of plant cation/anion uptake ratio in soil acidification. In: RENGEL, Z., ed. **Handbook of Soil Acidity**. New York: Marcel Dekker, 2003. p. 57-81.

TARAFDAR, J.C.; JUNGK, A. Phosphatase activity in the rhizosphere and its relation to the depletion of soil organic phosphorus. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 3, p. 199-204, 1987.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: UFRGS/FA/DS, 1995. 174 p.

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

TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 853-858, 1984.

TRIGO, L.F.N.; PESKE, S.T.; GASTAL, F.C.; VAHL, L.C.; TRIGO, M.F.O. Efeito do conteúdo de fósforo na semente de soja sobre o rendimento da planta resultante. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 19, p. 111-115, 1997.

TROLOVE, S.N.; HEDLEY, M.J.; KIRK, G.J.D.; BOLAN, N.S.; LOGANATHAN, P. Progress in selected areas of rhizosphere research on P acquisition. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 41, p. 471-479, 2003.

TROUGHTON, A. The effect of phosphorus nutrition upon the growth and morphology of young plants of *Lolium perene* L. **Annals of Botany**, Oxford, v. 41, p. 85-92, 1977.

VILELA, L.; ANGHINONI, I. Morfologia do sistema radicular e cinética de absorção de fósforo em cultivares de soja afetados pela interação alumínio-fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 8, p. 91-96, 1984.

YASEEN, M.; MALHI, S.S. Differential growth response of wheat genotypes to ammonium phosphate and rock phosphate phosphorus sources. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 32, p. 410-432, 2009.

ZHANG, H.; HUANG, Y.; YE, X.; SHI, L.; XU, F. Genotypic differences in phosphorus acquisition and the rhizosphere properties of *Brassica napus* in response to low phosphorus stress. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 320, p. 91-102, 2009.

ZOYSA, A.K.N.; LOGANATHAN, P.; HEDLEY M.J. Effect of forms of nitrogen supply on mobilization of phosphorus from a phosphate rock and acidification in the rhizosphere of tea. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v. 36, p. 373-387, 1998.

ZOYSA, A.K.N.; LOGANATHAN, P.; HEDLEY, M.J. A technique for studying rhizosphere processes in tree crops: soil phosphorus depletion around camellia (*Camellia japonica* L.) roots. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 190, p. 253-265, 1997.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Valores de pH (CaCl_2) e teores de P_{resina} , Pi_{bic} , Po_{bic} , Pi_{hid} , Po_{hid} , P_{HCl} e $\text{P}_{\text{residual}}$ em diferentes camadas a partir da tela de 25 μm no tratamento sem cultivo de plantas (testemunha).

Camada (mm)	pH (CaCl_2)	P_{resina}	Pi_{bic}	Po_{bic}	Pi_{hid}	Po_{hid}	P_{HCl}	$\text{P}_{\text{residual}}$
0 - 1	5,26	30,94	3,89	6,07	56,98	22,62	4,41	304,6
1 - 2	5,28	21,90	2,13	5,46	58,91	27,30	4,67	334,6
2 - 3	5,29	18,42	1,21	6,40	58,54	20,82	4,42	291,3
3 - 4	5,36	8,41	0,22	4,91	49,78	29,12	2,73	295,9
4 - 5	5,40	7,69	0,00	3,43	39,30	31,06	2,84	248,1
5 - 7	5,43	6,96	0,00	2,82	34,56	27,99	2,10	289,1
7 - 9	5,46	5,48	0,00	2,50	36,57	37,22	1,28	285,2
9 - 14	5,46	3,48	0,00	1,94	34,07	31,09	1,31	276,1