

**CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO FOSFATADA DO
FEIJOEIRO EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO VIA
RADICULAR E FOLIAR DE FOSFITO**

JOSINALDO LOPES ARAUJO

2008

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Araújo, Josinaldo Lopes.

Crescimento e nutrição fosfatada do feijoeiro em função da aplicação de fosfito via radicular e foliar / Josinaldo Lopes Araújo. – Lavras : UFLA, 2008.

77 p. : il.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2008.

Orientador: Valdemar Faquin.

Bibliografia.

1. Fosfito de potássio. 2. Fosfatase ácida. 3. Adubação foliar. 4. Frações de fósforo. 5. Eficiência nutricional. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 635.652891

JOSINALDO LOPES ARAUJO

**CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO FOSFATADA DO FEIJOEIRO EM
FUNÇÃO DA APLICAÇÃO VIA RADICULAR E FOLIAR DE FOSFITO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para a obtenção do título de “Doutor”.

Orientador

Prof. Dr. Valdemar Faquin

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL
2008

**CRESCIMENTO E NUTRIÇÃO FOSFATADA DO FEJJOEIRO EM
FUNÇÃO DA APLICAÇÃO VIA RADICULAR E FOLIAR DE FOSFITO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, para a obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 1º agosto de 2008

Profa. Dra. Janice Guedes de Carvalho UFLA

Prof. Dr. Luiz Arnaldo Fernandes UFMG

Prof. Dr. Mário Lúcio Vilela de Resende UFLA

Prof. Dr. Messias José Bastos de Andrade UFLA

Prof. Dr. Valdemar Faquin
UFLA
(Orientador)

LAVRAS
MINAS GERAIS - BRASIL

A Deus,

pelo dom da vida e por nunca abandonar seus filhos,

OFEREÇO

Aos meus pais, Izaura Lopes Araujo e José dos Santos Araujo; aos meus irmãos,
Joseildo, Maria José, Josefa, Josean, Judivan e José Julho.

Também a minha tia Maria de Lourdes e minha avó, Rita Santos, pela confiança
depositada,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e pela oportunidade única.

Ao Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, pela acolhida durante estes cinco anos; aos professores e alunos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e também pela amizade e companheirismo.

Agradeço à Capes, pela concessão da bolsa de estudos.

Agradeço ao Professor Valdemar Faquin, pelos valiosos ensinamentos, paciência, confiança, orientação e apoio fornecidos durante o curso e, principalmente, pelo exemplo de dedicação e ética na profissão.

Ao Dr. Luiz Bottino, representante da empresa Quimifol, por gentilmente ter cedido o ácido fosforoso utilizado nos experimentos.

Ao professor Mário Guerreiro, do Departamento de Química da UFLA, pelo auxílio na preparação do fosfito de potássio.

Aos professores Mário Lúcio Vilela de Resende, Messias José Bastos de Andrade e a professora Janice Guedes de Carvalho, pelos conselhos e sugestões na correção do presente trabalho.

Ao Prof. Luiz Arnaldo Luiz Fernandes, pelas valiosas sugestões e orientações na avaliação da enzima fosfatase ácida.

Ao laboratorista do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas, Roberto Lelis Mesquita, pela ajuda prestada nas diversas etapas do trabalho e à funcionária “Dona Leninha”, pela sua tão simples mais valiosa contribuição. Ao “Pezão”, pela ajuda nas casas de vegetação e pelos momentos de descontração.

Aos amigos e irmãos de república, Dr. José Zilton Santos e ao mestrando Fabrício Willian de Ávila, pela agradável convivência durante estes anos.

À secretária do DCS, Daniela, pela paciência e dedicação no trabalho.

Aos amigos e colegas de curso, Tácio de Oliveira, Bruno Dias e Leandro Flávio Carneiro, Flávio, José Roberto, Sílvio Junio, Marcos e Jussara Frazão.

À Gláucia Alves e Silva pelo empenho na preparação das cópias para entrega na pró-reitoria de pós-graduação.

Ao Professor Rivaldo Vital, pela amizade e ensinamentos que alicerçaram meus conhecimentos e aos professores José Romilson e Jacob Silva, pela amizade.

Um agradecimento especial à doutoranda Sheila Isabel do Carmo Pinto, pelo companheirismo e pela feliz coincidência de um “atraso”, permitindo meu ingresso no programa de Doutorado em Ciência do Solo da UFLA. Obrigado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
RESUMO GERAL	iv
GENERAL ABSTRACT	vi
1 INTRODUÇÃO GERAL	1
2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	7
CAPÍTULO I: Utilização de fosfito como fonte de fósforo por plantas de feijoeiro cultivadas em solução nutritiva	10
RESUMO	11
ABSTRACT	12
1 INTRODUÇÃO	13
2 MATERIAL E MÉTODOS	16
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	19
3.1 Experimento 1: Efeito de concentrações e formas de P.....	19
3.2 Experimento 2: Efeito de proporções de fosfato (Pi) e fosfito (Phi)....	26
4 CONCLUSÕES	35
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
CAPÍTULO II: Efeito do fosfito e do fosfato via foliar sobre o crescimento e nutrição fosfatada do feijoeiro	41
RESUMO	42
ABSTRACT	44
1 INTRODUÇÃO	46
2 MATERIAL E MÉTODOS	49
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
3.1 Produção de matéria seca e teores e acúmulo de P.....	52
3.2 Eficiência de utilização e frações de P, atividade da fosfatase ácida e correlações entre variáveis.....	59
4 CONCLUSÕES	66

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	67
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
ANEXOS.....	73

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
CAPÍTULO I	
FIGURA 1 Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) (a) e de raízes (MSR) (b) de plantas de feijoeiro em função das concentrações de fosfato (Pi) e fosfito (Phi) na solução nutritiva.....	20
FIGURA 2 Aspecto das plantas de feijoeiro aos 10 dias após o transplântio, cultivadas na concentração de 20 mg L ⁻¹ P-Phi (a) e efeito comparativo do fosfato (Pi) e fosfito (Phi) no crescimento de plantas de feijoeiro cultivadas em solução nutritiva nas concentrações de P indicadas (b-f).....	21
FIGURA 3 Teores de P na MSPA e na MSR (a, b), acúmulo de P nessas partes (b,c) translocação de P (e) e eficiência de utilização de P (f) em plantas de feijoeiro, em função das concentrações de fosfato e fosfito na solução nutritiva.....	23
FIGURA 4 Teores de fenóis totais (a) e de lignina (b) em folhas de plantas de feijoeiro em função das concentrações de fosfato (Pi) e fosfito (Phi) na solução nutritiva.....	26
FIGURA 5 Matéria seca da parte aérea (MSPA) (a) e raízes (MSR)(b) em função da percentagem de P-Phi na solução de plantas de feijoeiro cultivadas em solução nutritiva.....	27
FIGURA 6 Teores de P na matéria seca da parte aérea (MSPA) e na matéria seca de raízes (MSR) (a,b), acúmulo de P nessas partes (c,d) translocação (e) e eficiência de utilização (f) de P em feijoeiro, em função da percentagem de P-Phi na solução nutritiva.....	29
FIGURA 7 Atividade da fosfatase ácida (a) e teores de fósforo (b) solúvel em ácido. Pi = fósforo inorgânico; Po = fósforo orgânico e Pts = fósforo total em função das percentagens de P-Phi na solução nutritiva.....	31

FIGURA 8	Teores de fenóis solúveis totais (a) e lignina (b) em folhas de plantas de feijoeiro em função da percentagem de P-Phi na solução nutritiva.....	34
-----------------	--	----

CAPÍTULO II

FIGURA 1	Área foliar (AF)(a), matéria seca da parte aérea (MSPA)(b), matéria seca de raízes (MSR)(c) e relação raíz:parte aérea (d) do feijoeiro em função de tratamentos de aplicação foliar com cloreto de potássio (KCl), fosfito de potássio (Phi) e fosfato de potássio (Pi) e concentrações de fosfato na solução nutritiva, baixa (1,5 mg L ⁻¹) e adequada (20 mg L ⁻¹).....	53
FIGURA 2	Aspecto do feijoeiro aos 20 dias após o transplântio, cultivadas em solução nutritiva com as concentrações de 1,5 mg L ⁻¹ P (a) e 20 mg L ⁻¹ P (b) nos tratamentos de aplicação foliar com cloreto de potássio (KCl), fosfito de potássio (Phi) e fosfato de potássio (Pi).....	55
FIGURA 3	Teores (a,b) e acúmulo (c,d) de fósforo em plantas de feijoeiro em função de tratamentos de aplicações foliares com cloreto de potássio (KCl), fosfito de potássio (Phi) e fosfato de potássio (Pi) e concentrações de fosfato na solução nutritiva, baixa (1,5 mg L ⁻¹) e adequada (20 mg L ⁻¹).....	57
FIGURA 4	Teores (a) e acúmulo (b) de P na matéria seca de raízes (MSR) de do feijoeiro em função das concentrações de fosfato na solução nutritiva, baixa (1,5 mg L ⁻¹) e adequada (20 mg L ⁻¹).....	59
FIGURA 5	Eficiência de utilização de P (EUP) de plantas de feijoeiro em função de tratamentos de aplicações foliares com cloreto de potássio (KCl), fosfito de potássio (Phi) e fosfato de potássio (Pi) e concentrações de fosfato na solução nutritiva, baixa (1,5 mg L ⁻¹) e adequada (20 mg L ⁻¹).....	60

- FIGURA 6** Teores de P inorgânico (Pi), P total (Pts) e P orgânico (Po) solúveis em ácido nos tecidos foliares de plantas de feijoeiro cultivadas em solução nutritiva com baixa ($1,5 \text{ mg L}^{-1}$) e alta (20 mg L^{-1}) disponibilidade de fósforo (Pi)..... 62
- FIGURA 7** Atividade da fosfatase ácida (AFA) em plantas de feijoeiro em função de tratamentos de aplicações foliares com cloreto de potássio (KCl), fosfito de potássio (Phi) e fosfato de potássio (Pi), concentrações de fosfato na solução nutritiva, baixa ($1,5 \text{ mg L}^{-1}$) e adequada (20 mg L^{-1}) (a) e do número de aplicações foliares (b)..... 63

RESUMO GERAL

ARAÚJO, Josinaldo Lopes. **Crescimento e nutrição fosfatada do feijoeiro em função da aplicação via radicular e foliar de fosfito.** 2008. 77 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG¹.

O trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito do fosfito fornecido via radicular e foliar, em comparação ao fosfato, sobre o crescimento e nutrição fosfatada de plantas de feijoeiro. Três experimentos, em delineamento inteiramente casualizado, foram conduzidos em solução nutritiva. No primeiro experimento, os tratamentos foram arranjados em fatorial 5 x 2, sendo cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva: 0,5; 10; 20; 30 e 60 mg L⁻¹ e duas formas de fósforo: fosfito (Phi) e fosfato (Pi), com quatro repetições. No segundo experimento, os tratamentos foram constituídos por cinco proporções de Pi:Phi em solução nutritiva: 100:0, 25:75, 50:50, 75:25 e 100:0, com cinco repetições. No terceiro experimento, os tratamentos foram arranjados num fatorial 2 x 3 x 2, combinando-se duas concentrações de fosfato na solução nutritiva (1,5 mg L⁻¹ = baixo fósforo e 20 mg L⁻¹ = fósforo adequado), três produtos de aplicação foliar: KH₂PO₃ (fosfito monobásico de potássio), KH₂PO₄ (fosfato monobásico de potássio) e KCl (cloreto de potássio) como testemunha e dois tratamentos referentes ao número de aplicações (aplicação única, no surgimento do primeiro trifólio e duas aplicações: uma no surgimento do primeiro trifólio e a outra aplicação no pré-florescimento), com quatro repetições. Na época do pré-florescimento do feijoeiro, avaliaram-se a atividade *in vivo* da fosfatase ácida (AFA), os teores solúveis Pi (fósforo inorgânico), Po (fósforo orgânico) e P_t (fósforo total) (exceto no experimento 1) e os teores de fenóis totais e lignina (exceto no experimento 3) nas folhas recém-maduras do feijoeiro. Na mesma época, foram obtidos a matéria seca da parte aérea (MSPA), e a matéria seca de raízes (MSR), os teores e o acúmulo de P total nestes tecidos, a translocação (exceto no experimento 3) e a eficiência de utilização de P (EUP). Além dessas variáveis, no experimento 3, determinaram-se também a relação raiz:parte aérea e a área foliar. Os resultados mostraram que as plantas cultivadas com fosfito como única forma de P ou em elevadas proporções de Phi na solução nutritiva apresentaram redução drástica na MSPA e MSR, refletindo em valores desprezíveis para o acúmulo de P nesses tecidos e baixa EUP. Da mesma forma, a AFA apresentou decréscimo com o aumento das proporções de Phi, enquanto os teores de Pi solúvel diminuíram. Os tratamentos de aplicação foliar sob suprimento adequado de P, não afetaram a MSPA, MSR, AF, AFA,

¹Orientador: Prof. Valdemar Faquin – DCS/UFLA

EUP e a relação raiz parte:aérea. Contudo, sob baixa disponibilidade desse nutriente, a aplicação de Phi foliar teve efeito negativo sobre estas variáveis. Independentemente do nível de fosfato na solução e do número de aplicações, os teores e o acúmulo de P total nos tecidos da parte aérea e raízes, bem como as frações de P solúveis nos tecidos frescos das folhas do feijoeiro, foram pouco afetados pelos tratamentos de aplicação foliar. Concluiu-se que o fosfito não foi capaz de substituir o fosfato na nutrição fosfatada de plantas de feijoeiro; na ausência de fosfato, o fosfito em baixas concentrações na solução nutritiva foi tóxico às plantas de feijoeiro, contudo, sob suprimento adequado de Pi, esse efeito foi pouco pronunciado. Da mesma forma, o efeito negativo do fosfito aplicado via foliar só se manifestou em condições de deficiência nesse nutriente.

GENERAL ABSTRACT

ARAÚJO, Josinaldo Lopes. **Growth and phosphated nutrition of bean plant in function of radicular and foliar application of phosphite.** 2008. 77 p. Thesis (Doctorate in Soil Science) – Federal University of Lavras, Lavras, MG².

The work aimed to evaluate the effect of radicular and foliar applied phosphite, in comparison with phosphate, on the growth and phosphated nutrition of bean plants. Three experiments in an entirely random layout were conducted in nutrient solution. In the first experiment the treatments were arranged in 5x2 factorial, having five phosphorus concentrations in the nutrient solution: 0.5; 10; 20; 30 and 60 mg L⁻¹ and two phosphorus forms: phosphite (Phi) and phosphate (Pi) with four repetitions. In the second experiment the treatments were made up of five proportions of Pi:Phi in nutrient solution: 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100 with five repetitions. In the the third experiment, the treatments were arranged in a 2 x 3 x 2 factorial, combining two concentrations of phosphate in the nutrient solution (1.5 mg L⁻¹ = low phosphorous and 20 mg L⁻¹ = adequate phosphorous), three foliar application products: KH₂PO₃ (monobasic potassium phosphite), KH₂PO₄ (monobasic potassium phosphate) and KCl (potassium chloride) as control and two treatments referring to the number of applications (one application, at the appearance of the first trifoliolate leaf and two applications: one at the appearance of the first trifoliolate leaf and the other application at the pre-flowering), with four repetitions. At the time of the pre-flowering of the bean plant, the *in vivo* acid phosphatase activity (APA), the levels soluble Pi (inorganic phosphorus), Po (organic phosphorus) and Pts (total phosphorus) (except in experiment 1) and the levels of total phenols and lignin (except in experiment 3) in the recently-matured leaves of the bean plant were evaluated. At the same time, the aerial part dry matter (APDM), root dry matter (RDM) the levels and the accumulation of total P in these tissues, the translocation (except in the experiment 3) and the P use efficiency (PUE) were obtained. Besides those variables, in experiment 3 the root:aerial part ratio and the foliar area (FA) were also determined. The results showed that the plants cultivated with phosphite as the only form of P or with high proportions of Phi in the nutrient solution presented a drastic reduction in APDM and RDM, resulting in poor values for P accumulation in these tissues and low PUE. In the same way, the APA presented a decrease with the increase of the Phi proportion, while the levels of soluble Pi decreased. The foliar application

²Advisor: Prof. Valdemar Faquin – DCS/UFLA

treatments under an appropriate supply of P, did not affect APDM, RDM, FA, APA, PUE and the root:aerial part ratio. However, under low readiness of this nutrient, the foliar application of Phi had a negative effect on these variables. Independent of the phosphate level in the solution and the number of applications, the levels and the accumulation of total P in the aerial part and root tissues, as well as the fractions of soluble P in the fresh tissues of the bean plant leaves, were little affected by the foliar application treatments. It was concluded that the phosphite was not capable of substituting phosphate in the phosphated nutrition of bean plants; in the absence of phosphate, the phosphite in low concentrations in the nutrient solution was poisonous to the bean plants, however, under an appropriate supply of Pi, that effect was little pronounced. In the same way, the negative effect of the foliar applied phosphite only showed itself under deficiency conditions of same.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A utilização de produtos à base de fosfitos na agricultura tem se intensificado nos últimos anos. Alguns desses produtos são comercializados como fungicidas, mas a maioria deles é registrada no Ministério da Agricultura para uso como fertilizante (Nojosa et al., 2005). Uma das preocupações em relação ao uso desses fertilizantes é a falta de conhecimento dos reais benefícios que eles possam proporcionar às plantas e o seu reflexo na produtividade das culturas. Embora sua comercialização não seja recente, restam muitas perguntas a serem respondidas sobre seus efeitos na nutrição das plantas, em especial a nutrição fosfatada. Neste aspecto, chama a atenção o fato de muitos desses produtos serem denominados de “fonte superior de fósforo (P)”.

Dentre os nutrientes de plantas, não há dúvida que o fósforo (P) é aquele que mais tem recebido atenção pela pesquisa em fertilidade do solo e nutrição de plantas, haja vista sua complexa dinâmica, especialmente em solos tropicais, onde sua disponibilidade para as plantas é bastante limitada (Novais & Smith, 1999). Dessa forma, embora o P seja, dentre os macronutrientes, um dos menos exigidos pelas plantas, é o mais usado em adubações no Brasil.

O P não ocorre na natureza como elemento livre. Devido à sua alta reatividade, ele se combina rapidamente com outros elementos como o oxigênio e o hidrogênio para formar oxianions fosfatos (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} e PO_4^{3-}), os quais fazem parte dos diversos minerais fosfatados que, por sua vez, são a fonte primária do elemento para a produção dos diversos fertilizantes à base de fósforo.

Os ânions fosfatos liberados pelos fertilizantes são absorvidos pelas plantas e, como tal, entram no metabolismo vegetal para desempenhar suas múltiplas funções (Mengel & Kirby, 2001; Epstein & Bloom, 2006). O P faz parte de importantes biomoléculas, como DNA, RNA e fosfolipídios das

membranas celulares. Atua como transportador de substratos, como na glucose fosfato e muitas coenzimas, e como transportador e transdutor de energia química, como na adenosina trifosfato (ATP), além de participar da sinalização celular, como no inositol trifosfato e modificar proteínas irreversivelmente (Epstein & Bloom, 2006).

O fosfato é a forma mais oxidada do fósforo, entretanto, ele pode existir também em formas mais reduzidas, como fosfine (PH_4), hipofosfito (H_2PO_2^-) e fosfito (HPO_3^-), entre outras. As formas reduzidas de P não são encontradas naturalmente como os fosfatos, mas são produzidas pela indústria química num processo de redução que demanda grande quantidade de energia. Contudo, a presença dessas formas de P em alguns organismos, como bactérias, tem sugerido a presença de reações de oxirredução do elemento na natureza (McDonald et al., 2001; White & Metcalf, 2007).

Dentre as formas reduzidas de P, os íons fosfitos (Phi) são os que mais despertam interesse na agricultura. O motivo desse interesse é o fato de que, por volta da década de 1970, foi demonstrado que o Phi, comercializado na forma etil-fosfonato (Fosetil-Al), efetivamente controlava várias doenças de plantas que vivem no solo, causadas por pseudo-fungos da classe dos Oomycetos, particularmente, *Phytophthora* sp. (Grant et al., 1992; Griffith et al., 1993). Quando a patente da marca registrada Alliete expirou, várias indústrias começaram a produzir diversos produtos à base de fosfito pela simples reação do ácido fosforoso (H_3PO_3) com hidróxidos de amônio, potássio, sódio, cálcio e alumínio, sendo o fosfito de potássio o mais produzido.

Com relação à eficácia do Phi sobre o controle de *Phytophthora* sp., a pesquisa é ampla e os resultados são convergentes (Johnson et al., 2004; Brackmann et al.; 2005; Daniel & Guest, 2006; Lovatt & Mikkelsen, 2006; Shearer et al., 2007). Embora não se conheçam os mecanismos exatos do modo de ação do Phi sobre estes patógenos de plantas, seu controle seria atribuído a

efeitos diretos e indiretos. O efeito direto seria devido à redução do crescimento micelial, da formação de esporângios e da liberação de zoósporos (Wilkinson et al., 2001). Já os efeitos indiretos estariam associados com a capacidade eliciadora (elicitores são compostos que induzem a síntese de substâncias de defesa do hospedeiro) do Phi na ativação dos mecanismos de defesa das plantas, em que haveria um aumento na síntese de compostos do metabolismo secundário da planta, como as fitoalexinas (Saindrenan et al., 1990), compostos fenólicos simples e lignina (Daniel & Guest, 2006).

Atualmente, muitos produtos à base de fosfitos são comercializados não só como fungicidas, mas também como fertilizantes para aplicações foliares e para a fertirrigação. Sua recomendação como fertilizante em geral está associada ao fato de possuírem, em sua composição, nutrientes como o cálcio, o amônio e o potássio, dependendo da base utilizada para neutralizar o H_3PO_3 e o próprio fósforo. Conforme as informações contidas nos rótulos desses produtos, a aplicação do fosfito é sugerida para qualquer cultivo, incluindo culturas de grãos, espécies frutíferas, olerícolas e plantas ornamentais.

Muitas empresas produtoras de agroquímicos dão destaque aos fosfitos como fonte superior de P, enfatizando a melhoria no estado nutricional e vigor das culturas tratadas com tais produtos, principalmente nos estádios de maior atividade metabólica, quando a aplicação do produto representaria um fornecimento suplementar de nutrientes. Embora os nutrientes acompanhantes do íon fosfito, como o cálcio, o amônio e o potássio, possam, normalmente, ser utilizados como nutrientes, não há evidências de que as plantas possam utilizar os fosfitos diretamente como fonte de P e causar os benefícios mencionados. Ao contrário, a maioria das pesquisas realizadas tanto no campo, quanto em condições controladas, tem demonstrado efeitos nulos ou negativos do Phi sobre as plantas em comparação ao fosfato (Pi) quando aplicados via radicular ou foliar (Carswell et al., 1996; Föster et al., 1998; Ticconi et al., 2001; Varadarajan

et al., 2002; Singh et al., 2003; Lee & Tsai, 2005; Schroetter et al., 2006, Thao et al., 2008).

Embora, muito raramente, há, também, relatos do efeito benéfico do fosfito sobre as plantas, como o aumento da intensidade floral, produção, tamanho e qualidade dos frutos (Lovatt & Mikkelsen, 2006). Conforme McDonald et al. (2001), é possível que os efeitos benéficos do Phi sobre as plantas sejam, de forma indireta, pela supressão de patógenos que, mesmo em baixos níveis de doenças, sem apresentar sintomatologia aparente, seriam suficientes para reduzir a produção e a qualidade dos produtos.

Em geral, a redução do crescimento das plantas, devido ao fosfito, é atribuída a diversos efeitos relacionados, diretamente ou indiretamente, ao metabolismo vegetal e à nutrição fosfatada. Os fatores que regulam ou interferem na disponibilidade de fosfato dentro das células têm conseqüências drásticas no desenvolvimento das plantas e da maioria dos organismos (Nojosa et al., 2005).

As evidências mostram que, ao ser absorvido, o Phi é redistribuído por todas as partes das plantas, sendo bastante móvel nos tecidos do floema e do xilema (Bezuidenhout et al., 1987; Schroetter et al., 2006), nos quais se mantém estável como íons fosfito. De fato, após sua aplicação foliar ou radicular, não tem sido encontrado aumento significativo nos teores de P total em comparação ao fosfato aplicado via foliar ou radicular (Vavrina, 1998; Thao et al., 2008). Por outro lado, os teores de Pi solúveis apresentam redução nos seus teores, quando o fosfito é fornecido (Lee & Tsai, 2005; Thao et al., 2008), indicando que este ânion, realmente, não é oxidado a fosfato na planta.

As enzimas que atuam na transferência de grupos fosfatados nos processos metabólicos precisam reconhecer a molécula de fosfato. Como a arquitetura e a distribuição da carga do fosfito são diferentes da molécula do fosfato, que tem um átomo de oxigênio a mais que este último, supõe-se que as enzimas

reconhecem o fosfito, porém, em vez do oxigênio, é o átomo de hidrogênio substituído que fica livre para reagir. Assim, o fosfito pode interferir negativamente nos processos bioquímicos envolvendo o fosfato (McDonald et al., 2001).

Os efeitos negativos do fosfito sobre as plantas, entretanto, se verificam e ou se intensificam quando estas estão sob baixa disponibilidade de P na forma de fosfato (Ticconi et al., 2001; Schroetter et al., 2006, Thao et al., 2008). Esses efeitos são atribuídos à supressão dos mecanismos de superação de deficiência de P, desenvolvidos pelas plantas, os quais estariam associados à expressão de genes ligados ao aumento da atividade de fosfatases (Ticconi et al., 2001; Lee & Tsai, 2005), sinalização para a expressão de genes para transportadores de alta afinidade para P e alongação do sistema radicular (Varadarajan et al., 2002).

De maneira geral, plantas com baixo suprimento de P investem parte dos fotoassimilados para o aumento da produção de raízes e, assim, aumentam o volume de solo a ser explorado pela mesma, tendo como consequência o aumento da quantidade de P extraído do meio. Contudo, em plantas tratadas com fosfito sob deficiência de fosfato, tem-se verificado redução na relação raiz:parte aérea (Varadarajan et al., 2002) e diminuição na densidade de pelos radiculares (Ticconi et al., 2001). As fosfatases, sob baixo suprimento de P, têm sua atividade aumentada como uma resposta da planta para superar as deficiências de P, uma vez que essas enzimas atuam na quebra de compostos orgânicos que contém P para, então, convertê-lo em P inorgânico (Ascencio, 1994). Da mesma forma, tem-se observado diminuição na atividade dessas enzimas, tanto da fosfatase ácida (Singh et al., 2003), quanto da alcalina (Lee & Tsai, 2005) devido ao Phi.

Ao que parece, o efeito do Phi é específico para estas enzimas, uma vez que, para a fosfodiesterase, que também atua na quebra de compostos orgânicos contendo P, este efeito não é observado (Ticconi et al., 2001). Também a

alteração nos parâmetros cinéticos de absorção de fosfato em vegetais tem sido observado, após cultivo prévio com fosfito (Lee & Tsai, 2005). Além disso, no processo de absorção, íons fosfito inibem competitivamente a absorção de fosfato e vice-versa (Griffith et al., 1989).

Finalmente, destaca-se que, devido à sua ação protetora sobre as plantas, o uso de fosfito na agricultura deve se prolongar por muitos anos. Não obstante, as pesquisas sobre o efeito deste íon na nutrição fosfatada de espécies vegetais de importância agrícola, como o feijoeiro, são bastante restritas. Uma vez que seus efeitos são bastante dependentes da nutrição com este elemento, há necessidade de melhor compreensão das proporções entre íons fosfitos e fosfatos no meio de cultivo, assim como do adequado suprimento de fosfato via radicular, de forma que aplicações foliares com Phi possam surtir os efeitos protetores esperados, sem comprometer o crescimento e a produtividade das culturas.

Portanto, este trabalho foi realizado com o objetivo geral de avaliar o efeito do fosfito fornecido via radicular e foliar, em comparação ao fosfato, sobre o crescimento e nutrição fosfatada do feijoeiro cultivado em solução nutritiva.

2 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASCENCIO, J. Acid phosphatase as diagnostic tool. **Communication in Soil Science and Plant Nutrition**, v.25, p.1553-1564, 1994.
- BEZUIDENHOT, J.J.; DARVAS, J.M.; KOTZE, J.M. The dynamics and distribution of phosphite in avocado trees treated with Phosetyl-Al. **South African Growers Association Yearbook**, v.10, p.101-103, 1987.
- BRACKMANN, A.; SESTARI, I; GIEHL, R.F.H.; STEFFENS, C.A.; FAULIN, G.D.C.; PINTO, J.A.V. Controle de podridão pós-colheita de *penicillium* spp. em maçã 'fuji' com fosfitos e fungicidas. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.11, p.251-254, 2005.
- CARSWELL, C.; GRANT, B.R.; THEODOROU, M.E.; HARRIS, J.; NIERE, J.O.; PLAXTON, W.C. The fungicide phosphonate disrupts the phosphate-starvation response in *Brassica nigra* seedlings. **Plant Physiology**, v. 110, p.105-110, 1996.
- DANIEL, R.; GUEST, D. Defense responses induced by potassium phosphonate in *Phytophthora palmivora*-challenged *Arabidopsis thaliana*. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v.67, p. 194–201, 2006.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Planta, 2006. 169p.
- FÖRSTER, H.; ADASKAVEG, J.E.; KIM, D.H.; STANGHELLIN, M.E. Effect of Phosphite on Tomato and Pepper Plants and on Susceptibility of Pepper to *Phytophthora* Root and Crown Rot in Hydroponic Culture. **Plant Disease**, v.82, p.1165-1170, 1998.
- GRANT, B.R.; GRANT, J.; HARRIS, J. Inhibition of growth of *Phytophthora infestans* by phosphate and phosphonate in defined media. **Experimental Mycology**, v.16, p.240-244, 1992.
- GRIFFITH, J.M., COFFEY, M.D., GRANT, B.R. Phosphonate Inhibition as a Function of Phosphate Concentration in Isolates of *Phytophthora palmivora*. **Journal of General Microbiology**, v.139, p.2109-2116, 1993.

JOHNSON, D.; INGLIS, D.A.; MILLER, J.S. Control of Potato Tuber Rots Caused by Oomycetes with Foliar Applications of Phosphorous Acid. **Plant Disease**, v.88, p.1153-1159, 2004.

LEE, T-M.; TSAI, P-F. The effects of phosphate on phosphate starvation responses of *Ulva lactuca* (*Ulvales. chlorophyta*). **Journal of Phycology**, v.41, p.975-982, 2005.

LOVATT, C.J.; MIKKELSEN, R.L. Phosphite fertilizers: What are they? Can you use them? What can they do? **Better Crops**, v. 90, p.1-11, 2006.

LUCAS, R.E.; WARNCKE, D.D.; THORPE, V.A. Phosphite injury to corn. **Agronomy Journal**. v.71, p.1063-1065, 1979.

McDONALD, A.E.; GRANT, B.R.; PLAXTON, W.C. Phosphite (Phosphorous acid): Its relevance in the environment and agriculture and influence on plant phosphate starvation response. **Journal of Plant Nutrition**, v.24, p.1505-1519, 2001.

MENGEL, K.; KIRBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 5.ed. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic, 2001. 849p.

NOJOSA, G.B.A.; RESENDE, M.L.V.; RESENDE, A.V. **Uso de fosfitos e silicatos na indução de resistência**. In: CAVALCANTI, L.S.; DI PIERO, R.M.; CIA, P.; PASCHOLATI, S.F.; RESENDE, M.L.V.; ROMEIRO, R.S. (Ed.). **Indução de resistência em plantas a patógenos e insetos**. Piracicaba: FEALQ, 2005. p.139-153.

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

SAINDRENAN, T.P.; BARCHIETTO, T.; BOMPEIX, G. Effect of phosphonate on the elicitor activity of culture filtrates of *Phytophthora cryptogea* in *Vigna unguiculata*. **Plant Science**, Sofia. v.76. p.245-251, 1990.

SCHRÖETTER, S.; ANGELES-WEDLER, D.; KREUZIG, R.; SCHNUG, E. Effects of phosphite on phosphorus supply and growth of corn (*Zea mays*). **Landbauforschung Volkenrodxe, Fal Agricultural Research**, v.56, p.87-99, 2006.

SHEARER, B.L.; FAIRMAN, R.G. A stem injection of phosphate protects *Banksia* species and *Eucalytus marginata* from *Phytophthora cinnamomi* for at least four years. **Australian Plant Pathology**, v.36, p.78-86, 2007.

SINGH, V.K.; WOOD, S.M.; KNOWLES, V.L.; PLAXTON, W.C. Phosphite accelerates programmed cell death in phosphate-starved oilseed rape (*Brassica napus*) suspension cell cultures. **Planta**, v.218, p.233-239, 2003.

THAO, H.T.B.; YAMAKAWA, T.; SHIBATA, K.; SARR, P.S.; MYINT, A.K. Growth response of komatsuma (*Brassica rapa* var. peruviridis) to root and foliar applications of phosphate. **Plant and Soil**, v.308, p.1-10, 2008.

TICCONI, C.A.; DELATORRE, C.A.; ABEL, S. Attenuation of phosphate starvation responses by phosphite in *Arabidopsis*. **Plant Physiology**, v.127, p.963-972, 2001.

VARADARAJAN, D.K.; KARTHIKEYAN, A.S.; MATILDA, P.D.; RAGHOTHAMA, K.G. Phosphite, an analog of phosphate suppresses the coordinated expression of genes under phosphate starvation. **Plant Physiology**, v.129, p.1-9, 2002.

VAVRINA, C.S. **Soil and foliar application of Nutri-Phite (PO₃) on pepper under drip irrigation in SW Florida**. Florida: Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, 1998.

WHITE, A.K.; METCALF, W.W. Microbial metabolism of reduced phosphorus compounds. **Annual Review of Microbiology**, v.61, p.379-400, 2007.

WILKINSON, C.J.; HOLMES, J.M.; DELL, B.; TYNAN, K.M.; MCCOMB, J.A.; SHEARER, B. L.; COLQUHOUN I.J.; HARDY, G.E. ST.J. Effect of phosphite on in planta zoospore production of *Phytophthora cinnamomi*. **Plant Pathology**, v.50, p.587-593, 2001.

CAPÍTULO I

UTILIZAÇÃO DE FOSFITO COMO FONTE DE FÓSFORO POR PLANTAS DE FEJJOEIRO CULTIVADAS EM SOLUÇÃO NUTRITIVA

RESUMO

ARAUJO, Josinaldo Lopes. Utilização de fosfito como fonte de fósforo por plantas de feijoeiro cultivadas em solução nutritiva. In: **___Crescimento e nutrição fosfatada do feijoeiro em função da aplicação via radicular e foliar de fosfito.** 2008. Cap. 1, p. 10-40. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG³.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito do fosfito sobre o crescimento, a nutrição fosfatada e alguns aspectos bioquímicos do feijoeiro. Dois experimentos em delineamento inteiramente casualizado foram conduzidos em solução nutritiva. No primeiro, os tratamentos foram constituídos por um esquema fatorial 5 x 2, sendo cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva: 0,5; 10; 20; 30 e 60 mg L⁻¹ e duas formas de fósforo: fosfito (Phi) e fosfato (Pi), com quatro repetições. No segundo experimento, os tratamentos foram constituídos por cinco proporções de Pi:Phi em solução nutritiva: 100:0, 25:75, 50:50, 75:25 e 100:0, com cinco repetições. Em ambos os experimentos, na época do pré-florescimento, foram avaliados a atividade *in vivo* da fosfatase ácida, os teores solúveis Pi (fósforo inorgânico), Po (fósforo orgânico) e P_t (fósforo total) (exceto experimento 1) e os teores de fenóis totais e lignina nas folhas recém-maduras do feijoeiro. Na mesma época, determinaram-se, ainda, a matéria seca da parte aérea (MSPA), a matéria seca de raízes (MSR), os teores de P total nestes tecidos, com os quais foram calculados o acúmulo de P na MSPA e na MSR, a translocação e a eficiência de utilização de P (EUP). Os resultados mostraram que as plantas cultivadas com fosfito como única forma de P, ou em elevadas proporções de Phi, apresentaram redução drástica na MSPA e MSR, refletindo em valores desprezíveis para o acúmulo de P nesses tecidos e baixa EUP. Os teores de fenóis, em ambos os experimentos, foram menores quando a forma de P empregada foi o Phi, enquanto, para os teores de lignina, o oposto foi observado. Da mesma forma, a atividade da fosfatase ácida apresentou decréscimo com o aumento das proporções de Phi, enquanto os teores de Pi solúvel diminuíram. Concluiu-se que o fosfito não é capaz de substituir o fosfato na nutrição fosfatada de plantas de feijoeiro; na ausência de fosfato, o fosfito em baixas concentrações é tóxico às plantas de feijoeiro, contudo, sob suprimento adequado de P, esse efeito é pouco pronunciado; a diminuição dos teores de Pi solúveis em ácido com o aumento das proporções de Phi na solução indica que o Phi interfere na absorção de Pi e ou não é oxidado a fosfato no feijoeiro.

Palavras-chave: fosfatase ácida, nutrição fosfatada, frações de fósforo, fosfito de potássio.

³Orientador: Prof. Valdemar Faquin – DCS/UFLA (Orientador)

ABSTRACT

ARAÚJO, Josinaldo Lopes. The use of phosphite as a source of phosphorus for bean plants cultivated in nutrient solution. In: ____ **Growth and phosphated nutrition of bean plant in function of radicular and foliar application of phosphite**. 2008. Chap. 1, p. 10-40. Thesis (Doctorate in Soil Science) – Federal University of Lavras, Lavras, MG⁴.

The present work aimed to evaluate the effect of phosphite on the growth, phosphated nutrition and some biochemical aspects of the bean plant. Two experiments in an entirely random layout were conducted in a nutrient solution. In the first experiment, the treatments were made up of a 5x2 factorial outline, having five phosphorus concentrations in the nutrient solution: 0.5; 10; 20; 30 and 60 mg L⁻¹ and two phosphorus forms: phosphite (Phi) and phosphate (Pi) with four repetitions. In the second experiment the treatments were made up of five proportions of Pi:Phi in nutrient solution: 100:0, 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100 with five repetitions. In both experiments, at the pre-flowering time, the *in vivo* acid phosphatase activity, the levels soluble Pi (inorganic phosphorus), Po (organic phosphorus) and Pts (total phosphorus) (except experiment 1) and the levels of total phenols and lignin in the recently-matured leaves of the bean plant were appraised. At the same time, the aerial part dry matter of the (APDM), root dry matter (RDM) and the levels of total P in these tissues were determined, with which the P accumulation in DMAP and RDM and the translocation and the P use efficiency (PUE) were calculated. The results showed that the plants cultivated with phosphite as the only form of P or with high proportions of Phi, presented drastic reduction in APDM and RDM, resulting in poor values for the accumulation of P in these tissues and low PUE. The levels of phenols, in both experiments, were smaller when the form of P employed was Phi, while for the lignin levels the opposite was observed. In the same way, the acid phosphatase activity presented a decrease with the increase in the Phi proportions, while the soluble Pi levels decreased. It was concluded that the phosphite was not capable of substituting the phosphate in the phosphated nutrition of bean plants; in the absence of phosphate, phosphite in low concentrations is poisonous to the bean plant plants, however, under appropriate supply of P, that effect is little pronounced; the decrease of the levels of Pi soluble in acid with the increase of the proportions of Phi in the solution indicates that Phi interferes in the absorption of Pi and, or, is not oxidized to phosphate in the bean plant.

Key-Words: acid phosphatase, phosphated nutrition, phosphorus fractions, potassium phosphite

⁴Advisor: Prof. Valdemar Faquin – DCS/UFLA (Advisor)

1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um dos elementos mais requeridos por todas as espécies de vida para o crescimento e o desenvolvimento, sendo onipresente no metabolismo das plantas (Epstein & Bloom, 2006). O P participa de vários processos metabólicos em plantas, como transferência de energia, síntese de ácidos nucleicos, glicose, respiração, síntese e estabilidade de membranas, ativação e desativação de enzimas, reações redox e metabolismo de carboidratos, entre outros (Mengel & Kirby, 2001). Embora, entre os macronutrientes, seja um dos menos exigidos pelas plantas, é o mais usado na adubação, no Brasil, devido à sua forte interação com a fase sólida do solo, limitando sua disponibilidade para as plantas (Novais & Smith, 1999).

As plantas absorvem o P da solução do solo na forma de íons fosfatos (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} e PO_4^{3-}), que é a forma mais oxidada do elemento. Nas condições de pH da maioria dos solos cultivados, a forma H_2PO_4^- é a predominante e, portanto, a principal forma absorvida pelas plantas. Assim, as enzimas que atuam na transferência de grupos fosfatos nos processos metabólicos reconhecem este ânion para se ligarem e desempenharem sua atividade (McDonald et al., 2001).

Não há evidências de que as rochas contenham P em formas reduzidas. Contudo, fósforo reduzido na forma de fosfina (PH_3), hipofosfito (H_2PO_2^-) e fosfito (H_2PO_3^-) podem ser encontrados em muitos microrganismos e animais superiores (White & Metcalf, 2007). Essas formas de P são produzidas principalmente pela indústria química e muitas delas fazem parte de importantes medicamentos quando ligado a determinados radicais orgânicos (White & Metcalf, 2007). O processo produção de formas reduzidas de P é, contudo, caro, uma vez que exige grande quantidade de energia no processo de redução do fosfato (McDonald et al., 2001; White & Metcalf, 2007).

O uso de fosfitos na agricultura teve início na década de 1970, quando foi demonstrado que este íon efetivamente poderia controlar vários patógenos de plantas que vivem no solo, como os pseudofungos da classe dos Oomycetos, particularmente *Phytophthora* sp. (Fenn et al., 1989; Guest & Grant, 1991; Grant et al., 1992; Griffith et al., 1993). A partir de então, várias indústrias começaram a produzir diversos produtos à base de fosfito, como sais de metais alcalinos obtidos a partir do ácido fosforoso (H_3PO_3), e os mais produzidos são fosfito de potássio, fosfito de cálcio, fosfito de sódio e fosfito de amônio (McDonald et al., 2001; Schroetter et al., 2006).

Pesquisas já realizadas indicam, conclusivamente, que os fosfitos são eficientes no controle de diversas doenças, principalmente aquelas causadas por pseudofungos do gênero *Phytophthora*, como já mencionado. Neste aspecto, a pesquisa é ampla (Johnson et al., 2004; Sala et al., 2004; Brackmann et al., 2005; Daniel & Guest, 2006; Lovatt & Mikkelsen, 2006; Shearer & Fairman, 2007). Ao que tudo indica, o controle desses patógenos se daria, principalmente, pelo efeito direto do fosfito sobre o patógeno, exigindo, para tal, concentrações elevadas desse íon (Fenn & Coffey, 1984; 1989). Há indicações de que o fosfito pode agir também, de forma indireta, pelo aumento na síntese de compostos de defesa da planta, como fitoalexinas (Afek & Sztejnberg, 1989), compostos fenólicos e lignina (Jackson et al., 2000; Daniel & Guest, 2006).

Atualmente, muitos produtos à base de fosfitos estão sendo comercializados não só como fungicidas, mas também como fertilizantes líquidos para aplicações foliares e para a fertirrigação. A recomendação de tais produtos como fertilizantes provavelmente está associada ao fato de eles apresentarem o elemento fósforo e nutrientes, como cálcio, potássio, amônio e outros, na sua composição, ou devido às dificuldades encontradas pelas indústrias para registrarem o produto como fungicida.

Os trabalhos que investigam o emprego de fosfitos como fonte de P são bastante restritos, principalmente em culturas agrícolas importantes, como o feijoeiro. Não há evidências de que íons fosfitos possam entrar no metabolismo vegetal e desempenhar as mesmas funções exercidas pelo fosfato. Embora escassos, há trabalhos mostrando, para algumas culturas, que o fornecimento de fosfito via radicular ou foliar como fonte de fósforo não tem proporcionado efeito positivo sobre o crescimento das plantas, havendo casos de efeitos nulos (Vavrina, 1998) ou depressivos (Förster et al., 1998; Ticconi et al., 2001; Schroetter et al., 2006), mesmo em baixas concentrações.

As evidências encontradas até o momento apontam para três efeitos principais pelos quais os fosfitos reduzem o crescimento das plantas. O primeiro seria a supressão de genes relacionados com a expressão de mecanismos de superação da deficiência de P, como as fosfatases ácidas e os transportadores de fosfato de alta afinidade (Ticconi et al., 2001; Varadarajan et al. 2002). O segundo seria a inibição competitiva do fosfito com o fosfato, principalmente sob baixa disponibilidade de fosfato (Lee & Tsai, 2005). O terceiro seria a incapacidade das plantas de metabolizarem o P na forma de fosfito (McDonald et al., 2001). É importante ressaltar, entretanto, que esses efeitos surgem ou se intensificam quando as plantas estão com baixo suprimento de fósforo (Varadarajan et al., 2002; Singh et al., 2003; Lee & Tsai, 2005).

Com o presente trabalho, objetivou-se avaliar o efeito do fosfito sobre o crescimento, a nutrição fosfatada e alguns aspectos bioquímicos do feijoeiro, quando fornecido via solução nutritiva.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos dois experimentos em solução nutritiva, em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, com plantas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L. cv. BRS Radiante).

A cultivar BRS Radiante foi escolhida por ser de crescimento determinado, porte ereto, ciclo precoce e comercialmente bem aceita pelo consumidor. As plântulas foram obtidas de sementes germinadas em substrato vermiculita, em bandejas de isopor; após três dias da emergência, elas foram selecionadas conforme o tamanho e a área foliar e transferidas para vasos de três litros contendo solução nutritiva a 50% de sua força iônica original, com os respectivos tratamentos, recebendo arejamento constante. A solução nutritiva empregada foi a proposta por Ruiz et al. (1988), a qual é composta por 0,8 mmol L⁻¹ de N-NH₄⁺; 5,4 mmol L⁻¹ de N-NO₃⁻; 0,8 mmol L⁻¹ de P; 2,0 mmol L⁻¹ de K; 1,7 mmol L⁻¹ de Ca; 0,4 mmol L⁻¹ de Mg; 0,4 mmol L⁻¹ de S; 40 μmol L⁻¹ de Fe-EDTA; 19 μmol L⁻¹ de B; 7,0 μmol L⁻¹ de Mn; 2,0 μmol L⁻¹ de Zn; 0,5 μmol L⁻¹ de Cu e 0,6 μmol L⁻¹ de Mo, com as devidas modificações para o estabelecimento dos tratamentos com fósforo. Após cinco dias de cultivo, a força iônica da solução foi aumentada para 100%, sendo esta mantida até o final dos experimentos. O volume de solução dos vasos foi completado diariamente com água deionizada, sendo a substituição da solução realizada a cada cinco dias. O seu pH foi mantido entre 5,5 e 6,0 pela adição de NaOH ou HCl, 1,0 mol L⁻¹. O fosfito utilizado em ambos os experimentos foi obtido a partir da reação do H₃PO₃ (ácido fosforoso) com o KOH p.a, produzindo-se KH₂PO₃ (fosfito de potássio). Antes de sua utilização, o H₃PO₃ foi previamente padronizado com NaOH, com o objetivo de se conhecer sua concentração exata. Como fonte de fosfato, utilizou-se o KH₂PO₄ (fosfato monobásico de potássio).

No primeiro experimento, foi avaliada a possibilidade de o P fosfito (Phi) substituir o P fosfato (Pi) na nutrição fosfatada do feijoeiro. Para tanto, os tratamentos, em delineamento inteiramente casualizado (DIC), foram constituídos por um esquema fatorial 5 x 2, sendo cinco concentrações de fósforo na solução nutritiva: 0,5; 10; 20; 30 e 60 mg L⁻¹ e duas formas de fósforo, fosfito (Phi) e fosfato (Pi), com quatro repetições, sendo cada repetição constituída por três plantas por vaso.

No segundo experimento objetivou-se verificar a percentagem de P suprido na forma de fosfito, que poderia substituir o fosfato em relação à concentração final de P da solução nutritiva (24,8 mg L⁻¹, conforme Ruiz et al., 1988). Para tanto, os tratamentos distribuídos em DIC foram constituídos por cinco proporções de Pi:Phi em solução nutritiva: 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 e 0:100, com cinco repetições.

Na época do pré-florescimento do feijoeiro (32 dias após transplantio), foi coletada uma planta de cada repetição, da qual foi retirado o último trifólio fisiologicamente maduro para a avaliação da atividade da fosfatase ácida: realização do fracionamento do fósforo na matéria fresca desses tecidos (no experimento 2) e determinação dos teores de fenóis totais e lignina nas folhas (em ambos os experimentos). O fracionamento do P foi realizado conforme Hogue et al. (1970), modificado por Fernandes et al. (2000). Para tanto, foram tomados 0,5 g de tecido fresco para a avaliação das seguintes frações de P solúveis em ácido: Pi (fósforo inorgânico), Po (fósforo orgânico) e P_t (fósforo total). A atividade *in vivo* da fosfatase ácida foi determinada de acordo com Silva & Basso (1993), em que 200 mg de discos foliares foram transferidos para tubos de ensaios envolvidos com papel alumínio e incubados, a 30°C, em banho-maria, com 8 mL de paranitrofenilfosfato a 250 µmol L⁻¹, em tampão-acetato de sódio 0,1 mol L⁻¹, com pH ajustado para 5,0. Após 20 minutos de incubação, foram tomadas alíquotas de 5 mL do meio de reação, às quais foram adicionados

2 mL de NaOH 2,0 mol L⁻¹ para imediatamente serem feitas as leituras em absorvância, em espectrofotômetro, a 410 nm. Os teores de fenóis totais e lignina foram determinados seguindo-se a metodologia descrita com detalhes em Kuhn (2007).

Em ambos os experimentos, as plantas restantes de cada vaso foram separadas em parte aérea e raízes e secas em estufa (65°-70°C), para a avaliação da matéria seca da parte aérea (MSPA) e matéria seca de raízes (MSR). Posteriormente, o material foi moído separadamente para a determinação de P pela digestão nítrico-perclórica, conforme descrito por Malavolta et al. (1997). De posse dos dados de MSPA e MSR e dos teores de P totais do extrato nítrico-perclórico, foram calculados o acúmulo de P e a eficiência de utilização desse nutriente (EUP), de acordo com Siddiqi & Glass (1981), pela fórmula: $EUP = (\text{matéria seca total})^2 / (\text{acúmulo total de P})$ e a translocação de P para a parte aérea [translocação = (acúmulo de P na parte aérea)/(acúmulo total de P) x 100].

A análise estatística das variáveis consistiu na análise de variância e de regressão polinomial, quando pertinente, a 5%, com o auxílio do *software* Sisvar[®] (Ferreira, 2000). No segundo experimento, a análise de regressão foi realizada tomando-se as proporções de P-Phi (fosfito) como variável independente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Experimento 1: efeito de concentrações e formas de P

A análise de variância mostrou que as variáveis avaliadas, à exceção dos teores de lignina, foram influenciadas significativamente pelas formas (Pi e Phi) e concentrações de P, bem como pela interação entre estes fatores (Tabelas 1A, 2A e 3A). A produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) (Figura 1a) e raízes (MSR) (Figura 1b) foi drasticamente reduzida quando a forma de P empregada foi o fosfito. Em média, a produção de MSPA e de MSR pelas plantas de feijoeiro, cultivadas com fosfito (Phi) como fonte de P, foi de 3,8% e 6,3%, respectivamente, em relação à forma de fosfato (Pi). Em plantas de *Arabidopsis* cultivadas em solução nutritiva, Ticconi et al. (2001) obtiveram resultados semelhantes na produção de peso fresco, quando as plantas foram cultivadas com 3,1 mg L⁻¹ de P-Phi, como forma exclusiva de P.

Conforme estimativa das equações de regressão neste trabalho, a máxima produção de MSPA e MSR foi obtida nas concentrações de 34,7 mg L⁻¹ e 34,8 mg L⁻¹ de P-Pi, respectivamente. Por outro lado, os menores valores para estas variáveis foram obtidos nas concentrações de 40,9 mg L⁻¹ de P-Phi e 40,4 mg L⁻¹ de P-Phi, respectivamente (detalhes na figura 1a e 1b). Outros autores observaram resultados semelhantes em outras espécies vegetais, tanto em solo (Lucas et al., 1979; Schoretter et al., 2006) quanto em solução nutritiva (Carswell et al., 1996; Foster et al., 1998; Ticconi et al., 2001; Varadarajan et al., 2002; Singh et al., 2003).

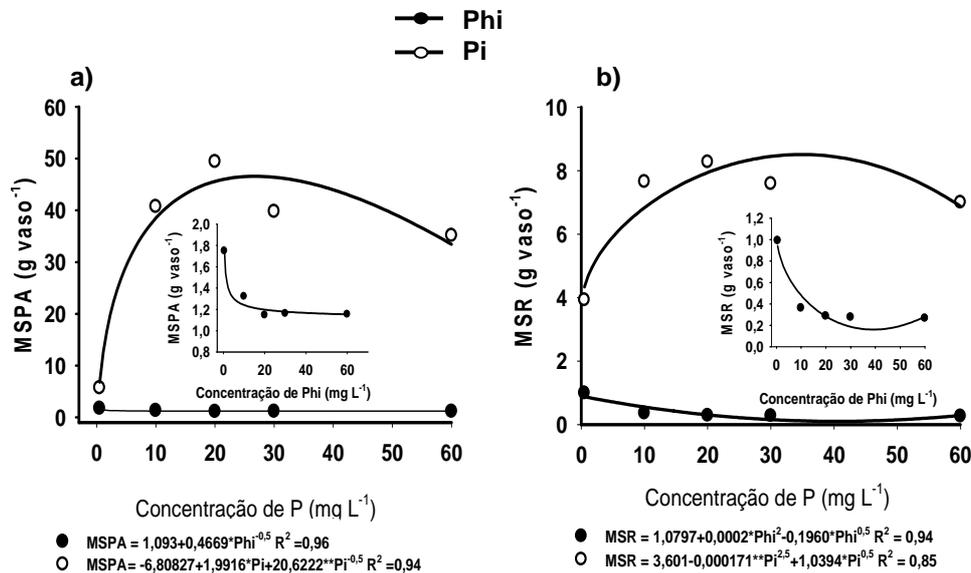


FIGURA 1 Produção de matéria seca da parte aérea (MSPA) (a) e de raízes (MSR) (b) de plantas de feijoeiro em função das concentrações de fosfato (Pi) e fosfito (Phi) na solução nutritiva. O gráfico interno refere-se ao efeito do Phi em escala menor. (*) e (**): significativo, a 5% e a 1%, respectivamente.

Neste trabalho, as plantas de feijoeiro cultivadas em solução contendo Phi como única fonte de P apresentaram, aos 10 dias de cultivo, a partir da concentração 10 mg L⁻¹ de P-Phi, manchas necróticas espalhadas por todo o limbo das folhas primárias (Figura 2a). As folhas novas apresentaram-se cloróticas com reticulado fino e com encarquilhamento da face adaxial com aspecto de “canaoa”, semelhante ao que ocorre com a fitotoxidez por glifosato. Na concentração de 0,5 mg L⁻¹ P-Phi, não foram observadas necroses nas folhas, mas as folhas novas apresentaram a clorose descrita anteriormente, embora com intensidade bem menor. Na concentração de 0,5 mg L⁻¹ P-Pi, as plantas apresentaram sintomas típicos de deficiência de P, com pequeno crescimento da parte aérea, redução da área foliar e folhas de coloração verde-escura, mas sem apresentar os sintomas anteriormente descritos. Em todas as concentrações de P,

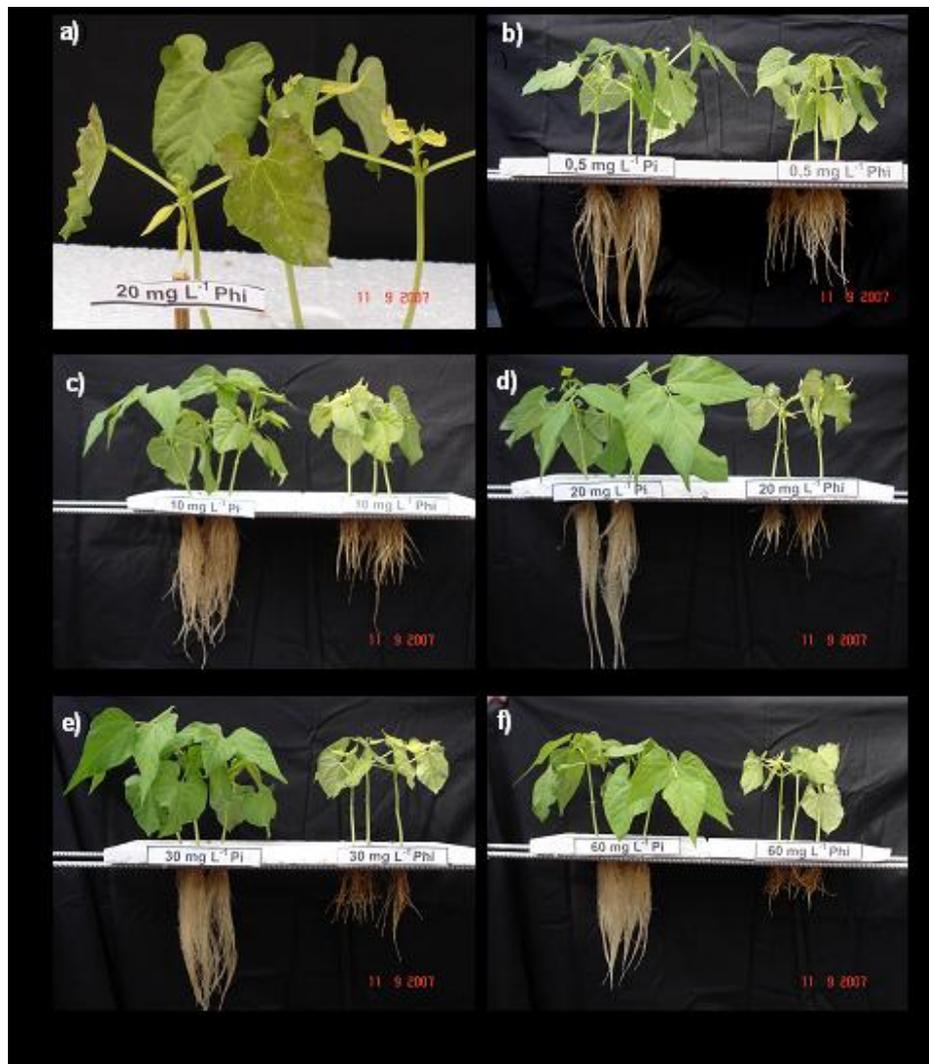


FIGURA 2 Aspecto das plantas de feijoeiro, aos 10 dias após o transplante, cultivadas na concentração de 20 mg L^{-1} P-Phi (a) e efeito comparativo do fosfato (Pi) e fosfito (Phi) no crescimento de plantas de feijoeiro cultivadas em solução nutritiva, nas concentrações de P indicadas (b-f).

houve drástica redução do crescimento da parte aérea e das raízes (Figura 2b-f), quando a fonte de P empregada foi o P-Phi.

Esses resultados concordam com hipótese sustentada por diversos autores de que plantas superiores, e mesmo algas, não metabolizam o P-Phi, o qual, após absorvido, se mantém estável nos compartimentos celulares (Quimette & Coffey, 1989; McDonald et al., 2001; Singh et al., 2003; Pilbeam, 2003; Lee & Tsai, 2005; Schroetter et al., 2006), podendo causar sérias implicações ao metabolismo vegetal. De acordo com Lee & Tsai (2005), embora o P-Phi não seja substrato para enzimas que catalisam as reações de transferência do grupo fosforil, proteínas de plantas e leveduras que se ligam ao Pi, como os transportadores que participam na absorção e na sinalização de respostas moleculares relacionados à deficiência de P, parecem não discriminar entre os ânions Pi e Phi. Dessa forma, os mecanismos de superação da deficiência de P, como aumento da atividade da fosfatase ácida, aumento da síntese de transportadores de Pi de alta afinidade e aumento do comprimento e densidade de pêlos absorventes das raízes, não são expressos na presença do P-Phi. De acordo com Singh et al. (2003), o efeito deletério do fosfito não é específico, uma vez que, sob suprimento adequado de P-Pi (fósforo na forma de fosfato), ele tem sido pouco pronunciado. De fato, isso tem sido confirmado em diversos trabalhos (Carswell et al., 1996; Forster et al., 1998; Ticconi et al., 2001; Varadajan et al., 2002; Schoetter et al., 2006) e será abordado com mais propriedade no segundo experimento.

Quanto à nutrição fosfatada do feijoeiro, observou-se que os teores e o acúmulo de P na MSPA e na MSR, bem como sua translocação e eficiência de utilização, foram afetados significativamente pelas formas (Pi e Phi) e concentrações de P na solução e pela interação entre esses fatores (Tabelas 1A e 2A). Os maiores teores de P na MSPA foram observados quando o P foi fornecido na forma de P-Phi (Figura 3a), decorrente do efeito de concentração,

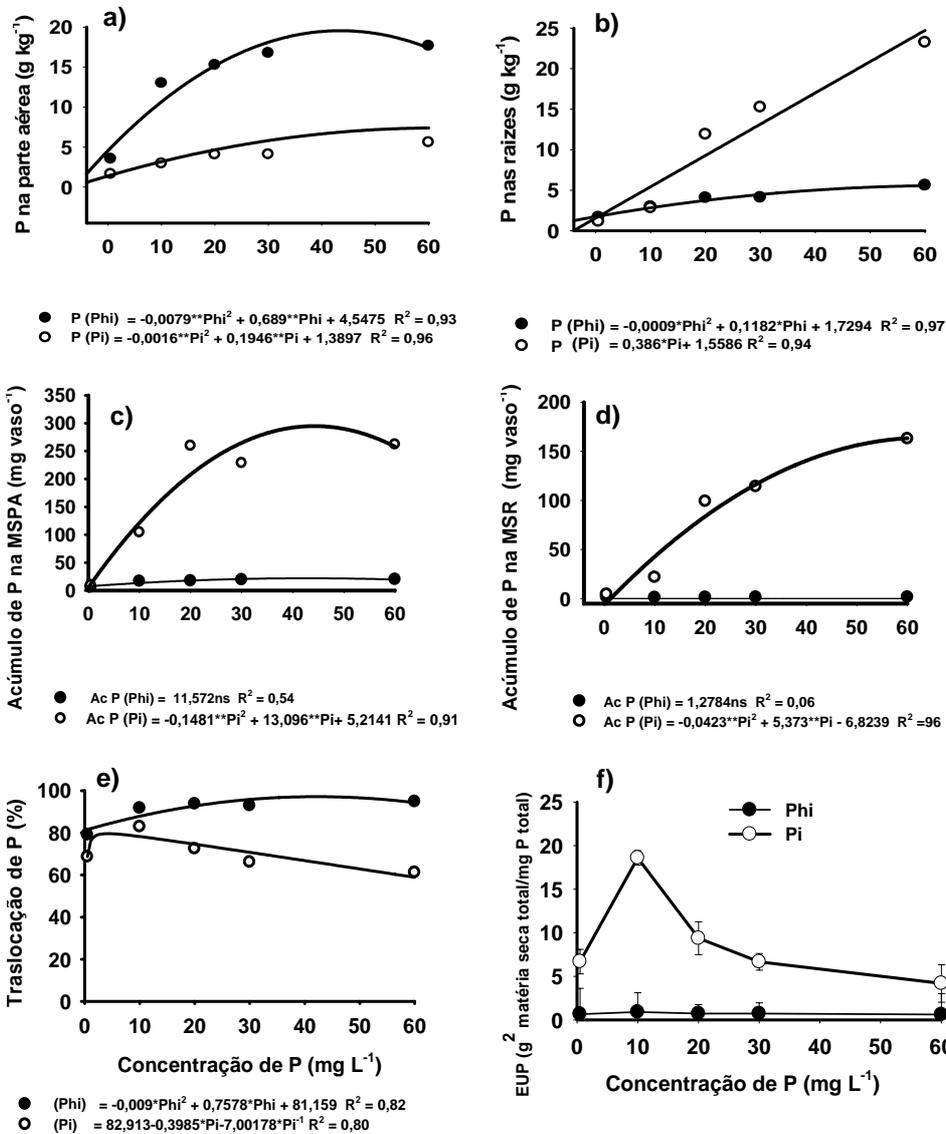


FIGURA 3 Teores de P na MSPA e na MSR (a, b), acúmulo de P nessas partes (b,c), translocação de P (e) e eficiência de utilização de P (f) em plantas de feijoeiro, em função das concentrações de fosfato e de fosfito na solução nutritiva. (**), (*) e ns: significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente. Barras (f) indicam desvio padrão da média.

ou seja, as plantas acumularam o P-Phi absorvido, mas tiveram uma pequena produção de matéria seca. Nas raízes, observou-se o comportamento inverso, em que os maiores teores de P foram obtidos quando a forma de P empregada foi o P-Pi (Figura 3b). É importante destacar que os teores de P quantificados referem-se ao P total contido nos tecidos da planta, ou seja, a soma do P orgânico mais o inorgânico, inclusive o P-Phi absorvido. Embora estável na planta (Pilbeam, 2003), o P-Phi é oxidado a P-Pi na digestão nítrico-perclórica.

O acúmulo de P em ambas as partes da planta (Figuras 3c e 3d), apresentou comportamento similar àqueles mostrados para a produção de MSPA e MSR. Quando foi empregado fosfito como fonte de fósforo, devido à baixa produção de matéria seca com esta forma de P, os valores desta variável atingiram níveis mínimos, quando comparados com os valores obtidos com o fosfato.

O fósforo na forma de Phi parece ser mais facilmente translocado para a parte aérea em relação à forma de Pi, como ilustrado na Figura 3e e já comentado para as Figuras 3a e 3b. Contudo, os maiores teores de P na MSPA com o P-Phi também podem estar relacionados com o “efeito de concentração”, devido à pequena produção de matéria seca com o P-Phi, embora nas raízes esse efeito não tenha sido observado.

A eficiência de utilização (EU) de nutrientes pelas plantas, tradicionalmente, tem sido calculada como a massa seca de material vegetal produzida por unidade do nutriente acumulado no vegetal. Siddiqi & Glass (1981) propuseram o cálculo da EU em função da concentração do nutriente na massa seca e não pela unidade do mesmo acumulado, pelo uso da fórmula citada no item Material e métodos. A pequena produção de matéria seca das plantas de feijoeiro, supridas com P-Phi como forma exclusiva de fósforo, refletiu diretamente na eficiência de utilização de P (EUP), a qual atingiu níveis

desprezíveis, comparada à EUP com P-Pi como forma de P (Figura 3f). Embora a EUP não tenha se ajustado a qualquer modelo matemático, a maior eficiência de utilização de P foi obtida na concentração de 10,0 mg L⁻¹ de P-Pi e, a partir desta concentração, seus valores decresceram. Destaca-se que, nas concentrações de 13,3 mg L⁻¹ de P-Pi e de 16,7 mg L⁻¹ de P-Pi, obteve-se 90% da produção máxima de MSPA e MSR, cujo valor foi calculado pelas equações de regressão da Figura 1a e b.

Os teores de fenóis solúveis totais e de lignina não apresentaram um comportamento definido em função concentrações de P na solução nutritiva em ambas as formas de P. Independentemente das concentrações de P, os teores de fenóis totais foram menores com o uso de P-Phi como forma de P (Figura 4a). Os teores de lignina, por outro lado, foram estatisticamente menores quando o P-Pi foi a forma de P empregada (Figura 4b).

Apesar de haver relatos de que o fosfito proporciona um aumento nos teores de compostos do metabolismo secundário, como fenóis e lignina nas plantas, geralmente, esse efeito é observado apenas quando as plantas tratadas com fosfito (radicular ou foliar) são inoculadas com patógenos como uma resposta da planta ao ataque (Jackson et al., 2000). Contudo, uma possível causa para o comportamento desses compostos observados neste trabalho seria uma exaltação do estresse oxidativo causado pelo P-Phi, aliado à “ausência” de P-Pi no meio de cultivo, o que levaria a uma seqüência de eventos bioquímicos como a síntese de quinonas, por exemplo (a qual é tóxica), a partir de compostos fenólicos (Mayer & Harel, 1979) e lignificação dos tecidos das folhas como mecanismo de superação desse estresse (Lee et al., 2007). Esse processo ocorre

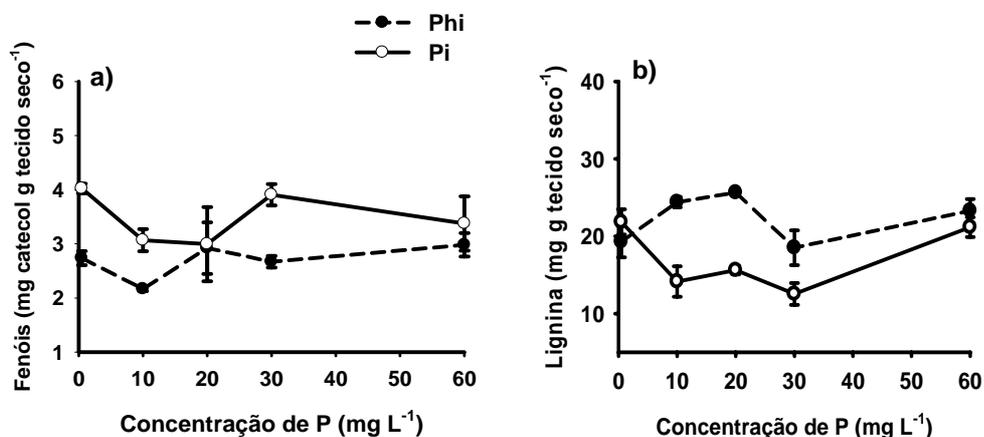


FIGURA 4 Teores de fenóis totais (a) e de lignina (b) em folhas de plantas de feijoeiro, em função das concentrações de fosfato (Pi) e fosfito (Phi) na solução nutritiva. Barras indicam erro padrão da média.

da seguinte forma: a enzima peroxidase, última enzima da rota da lignina, oxida compostos fenólicos à lignina, ao mesmo tempo que reduz o H₂O₂ a H₂O, destoxificando os radicais livres durante a lignificação (Marschner, 1995). Contudo, a análise dos teores de quinonas e a quantificação de formas reativas de oxigênio poderiam auxiliar a interpretação desses resultados de forma mais consistente, em trabalhos futuros.

3.2 Experimento 2: efeito de proporções de fosfato (Pi) e fosfito (Phi)

Com exceção dos teores de P na MSPA e dos teores de P_{ts} (fósforo total solúvel em ácido na matéria fresca) e os teores de fenóis totais, as variáveis avaliadas foram influenciados significativamente pelas proporções de P-Phi na solução (Tabelas 4A, 5A, 6A, e 7A).

A produção de MSPA (Figura 5a) e de MSR (Figura 5b) foi drasticamente reduzida sob as maiores proporções de P-Phi. Na proporção Pi:Phi 0:100, foram observados sintomas semelhantes aos descritos no experimento 1,

para as concentrações de P-Phi na solução. As percentagens de P-Phi que proporcionaram 90% da máxima produção de MSPA e MSR foram de 39,0% e 48,4%, respectivamente. Estes valores correspondem às concentrações de 9,6 mg L⁻¹ P-Phi e 12,0 mg L⁻¹ P-Phi que, por diferença, equivalem a 15,1 mg L⁻¹ P-Pi e 12,8 mg L⁻¹ P-Pi na solução nutritiva, respectivamente.

É importante lembrar que, no experimento 1, concentrações de P-Pi semelhantes a essas também proporcionaram 90% da produção máxima de MSPA e MSR e que, quando as plantas foram supridas com Phi como fonte exclusiva de P, pequenas concentrações (0,5 mg L⁻¹ P-Phi) foram suficientes para acarretar um significativo decréscimo na MSPA e MSR (Figura 1a e 1b). Verifica-se, ainda, que a MSPA foi mais sensível ao aumento da concentração de P-Phi em relação à MSR, a qual apresentou redução do crescimento apenas sob a relação Pi:Phi de 25:75. Neste caso, a redução da MSR também se deve à

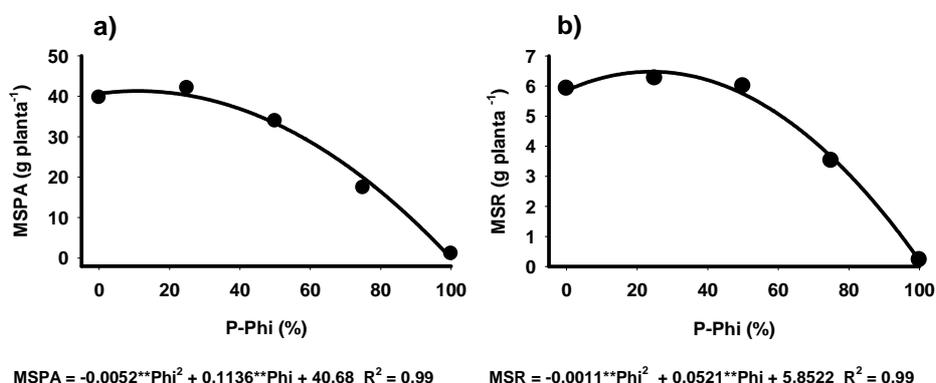


FIGURA 5 Matéria seca da parte aérea (MSPA) (a) e raízes (MSR)(b), em função da percentagem de P-Phi na solução de plantas de feijoeiro cultivadas em solução nutritiva. (**): significativos a 1%.

baixa concentração de P na solução. Esse resultado dá suporte à idéia de que a redução do crescimento das plantas em função do aumento das proporções de P-Phi não é devido à apenas ao efeito tóxico do P-Phi, na solução de cultivo, mas,

provavelmente, ao efeito conjunto da diminuição da concentração de P-Pi em associação com o efeito do aumento da concentração de fosfito.

Observando-se conjuntamente os experimentos 1 e 2, fica evidente que o fornecimento de P-Phi não substitui o P-Pi na solução e que, quando as plantas estiveram com suprimento adequado de P-Pi, o efeito negativo do P-Phi sobre o crescimento do feijoeiro só se manifestou com altas concentrações desse ânion, fato também relatado por outros autores (Förster et al., 1998; Varadaraja et al., 2002; Singh et al., 2003; Schroetter et al., 2006). O efeito negativo do P-Phi sobre as plantas sob baixa disponibilidade de P-Pi se deve, além dos efeitos já comentados no experimento 1, à inibição competitiva do P-Phi sobre o P-Pi no processo de absorção, que diminui ainda mais a absorção de fosfato nos tratamentos com menor proporção Pi:Phi (Griffith et al., 1993; Lee & Tsai, 2005).

Quanto à nutrição fosfatada das plantas, verifica-se que os teores de P (Figura 6a) na MSPA permaneceram constantes, em função das percentagens de P-Phi, apesar de, na MSR, haver tendência de decréscimo linear desta variável com o aumento da proporção de P-Phi (Figura 6b). Esse comportamento pode ter resultado da diminuição da absorção de P devido aos danos do P-Phi sobre o sistema radicular das plantas (Figura 5b), conseqüentemente criando um menor “pool” de P nesses tecidos com o aumento do P-Phi na solução. Sob esta ótica, a maior parte do P que estaria sendo absorvido seria translocado para a parte aérea. Entretanto, essa menor absorção de P pelas raízes não refletiu nos teores da parte aérea, provavelmente devido ao “efeito de concentração” nas maiores proporções de P-Phi, equilibrando os teores de P entre os tratamentos.

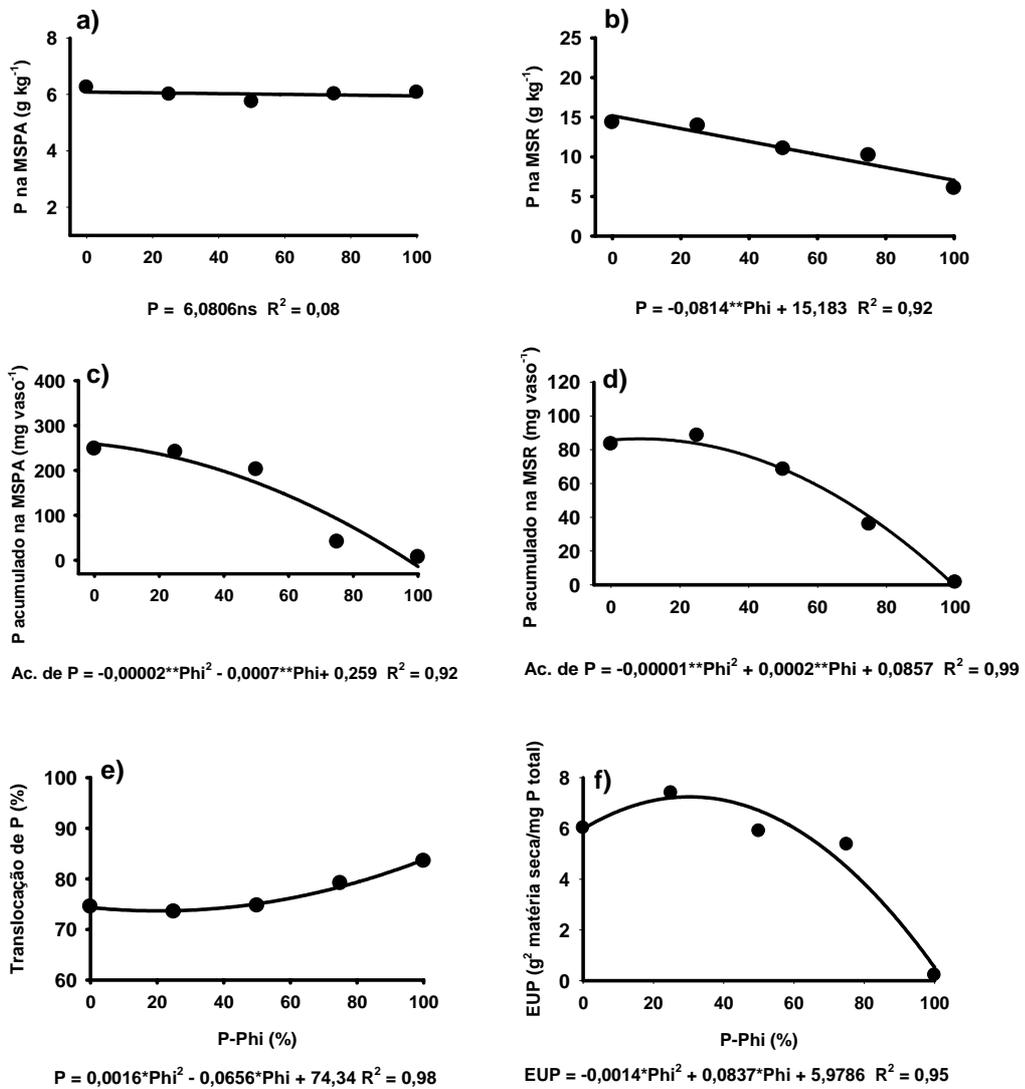


FIGURA 6 Teores de P na matéria seca da parte aérea (MSPA) e na matéria seca de raízes (MSR) (a,b), acúmulo de P nessas partes (c,d) translocação (e) e eficiência de utilização (f) de P em feijoeiro, em função da percentagem de P-Phi na solução nutritiva. (**), (*) e ns: significativo a 1% e 5% e não significativo, respectivamente.

Por outro lado, o acúmulo de P, em ambas as partes da planta (Figura 6c, d), seguiu a mesma tendência mostrada para MSPA e MSR (Figura 5a,b), como um reflexo do comportamento da produção de matéria seca, que apresentou níveis desprezíveis quando as plantas foram cultivadas na ausência de P-Pi, ou seja, na presença de 100% do P na forma P-Phi. Como verificado no experimento 1 (Figura 3e), na Figura 6e mostra-se que o P-Phi parece ter sido mais facilmente translocado para a parte aérea, uma vez que esta variável aumentou com o aumento das proporções de P-Phi. Contudo, esse resultado pode ter sido apenas uma consequência da menor absorção e acumulação de P nas raízes durante o tempo de cultivo da planta, devido aos danos provocados pelo Phi neste órgão (Figura 6f).

A eficiência de utilização de P (EUP) também apresentou decréscimos com proporções elevadas de P-Phi, sendo o máximo atingido com 31,0% P na forma de P-Phi, o equivalente à relação Pi:Phi de 69:31. Ressalte-se aqui que este valor assemelha-se à concentração de P-Pi que proporcionou 90% da produção máxima de MSPA ($15,1 \text{ mg L}^{-1}$ P-Pi), em ambos os experimentos.

A atividade da fosfatase ácida (AFA) e as frações de P solúveis em ácido são apresentadas nas Figuras 7a e 7b, respectivamente. Para estas variáveis, na análise de regressão não foi incluída a proporção Pi:Phi 0:100, uma vez que os danos provocados às plantas sob tal proporção não permitiram a realização do ensaio enzimático nem o fracionamento do P, a qual requer disponibilidade de material vegetal vivo. Observa-se que houve tendência de decréscimo da

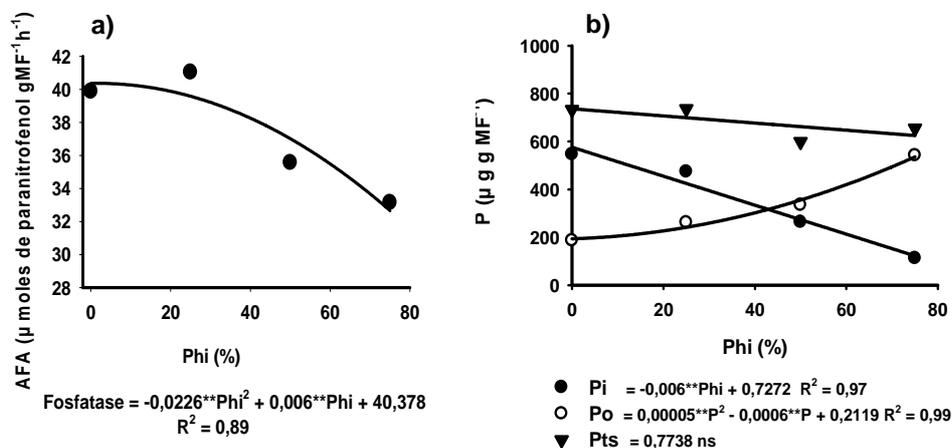


FIGURA 7 Atividade da fosfatase ácida (a) e teores de fósforo (b) solúvel em ácido. Pi = fósforo inorgânico; Po = fósforo orgânico e Pts = fósforo total em função das percentagens de P-Phi na solução nutritiva (**): significativo a 1% e não significativo, respectivamente.

AFA com o aumento da proporção de P-Phi na solução, embora se esperasse o contrário, uma vez que o aumento da concentração de P-Phi na solução implica em diminuição na concentração de P-Pi.

Em geral, sob condições semelhantes, a deficiência de fósforo provoca aumento na atividade da fosfatase ácida em relação a plantas bem supridas com este nutriente, como resposta da planta para superar essa deficiência (Duff et al., 1994; Sarapatika et al., 2004). Esta enzima atua na quebra de compostos orgânicos que contêm P, para, então, convertê-lo em P inorgânico, além de atuar no transporte de Pi do vacúolo para o citoplasma (Ascencio, 1994). Entretanto, em condição de baixo suprimento de P, a adição de fosfito parece impedir a indução, tanto da fosfatase ácida (Ticconi et al.; 2001; Singh et al., 2003), quanto da alcalina (Lee & Tsai, 2005). É importante ressaltar que, nas proporções Pi:Phi de 25:75 e 50:50, as plantas de feijoeiro já apresentavam sintomas visuais da toxidez de fosfito. Assim, as alterações no metabolismo

geral da planta, diminuindo a síntese de proteínas, podem também ter contribuído para o decréscimo na AFA.

Quanto às frações solúveis de P, observa-se que os teores de Pts (Figura 7b), assim como ocorreu para os teores de P total na matéria seca (Figura 6a), não sofreram alterações significativas com o aumento das proporções de P-Phi. Já os teores de Pi decresceram linearmente com a diminuição da proporção de P-Pi na solução (Figura 7b). Isso sugere que o P-Phi realmente foi absorvido, mas não foi oxidado a P-Pi para, posteriormente, ser enzimaticamente incorporado a compostos orgânicos.

Este resultado concorda com o relato de outros autores de que o P-Phi absorvido permanece estável na planta por semanas ou meses (Pilbeam, 2003; Schroetter et al., 2006). Outro mecanismo que contribui para a redução dos teores de Pi solúveis nas folhas do feijoeiro é a inibição competitiva que os íons fosfitos exercem sobre os íons fosfatos, uma vez que ambos competem pelo mesmo sítio de absorção (Smillie et al., 1989; Lee & Tsai, 2005). Como os teores de Pts não foram alterados significativamente com o incremento das proporções de P-Phi, os teores de Po solúveis apresentaram comportamento inverso ao do Pi, como consequência da forma de sua obtenção (por diferença).

Neste trabalho em particular, provavelmente, o mais correto seria chamar o Pts de $Po + Phi + Pi$ e o Po de $Po + Phi$, uma vez que o Phi não consegue ser contabilizado na análise de Pi realizada pelo método colorimétrico, a menos que seja oxidado a Pi, como ocorre na determinação do Pts, na qual, o extrato é originado de uma digestão nítrico-perclórica a cerca de 200°C. Assim, fica clara a necessidade da separação do Phi das outras frações solúveis em ácido fraco, de forma a não ser confundido com o fósforo orgânico, o qual é obtido apenas por diferença. Essa análise é importante para se ter uma idéia da ocorrência de oxidação de fosfito a fosfato pela planta, ou se a mesma estaria metabolizando o Phi. Embora, para fins de pesquisa, a análise de Phi em plantas

já seja realizada há algum tempo em outros países, principalmente com o uso da cromatografia iônica (Fenn & Coffey, 1989; Jackson et al., 2000; Schroetter et al., 2006), no Brasil, ainda não existem metodologias apropriadas para esta finalidade. Isso, provavelmente, ocorre porque as pesquisas realizadas com fosfitos neste país restringem-se ao âmbito da fitopatologia, na qual a nutrição fosfatada da planta não é prioridade.

Assim como no experimento 1, os teores de fenóis totais e de lignina não apresentaram ajuste de regressão significativo em função das proporções de P-Phi na solução nutritiva (Figura 8). Os teores de fenóis (Figura 8a) apresentaram pequena variação em função dos tratamentos, embora com tendência de decréscimo com o aumento das proporções de Phi. Os teores de lignina (Figura 8b) mantiveram-se pouco alterados até a proporção Pi:Phi 75:25, contudo, houve um aumento de mais de 90% quando as plantas foram cultivadas na ausência de P-Pi. Esse comportamento pode ter sido resultado de uma resposta da planta ao estresse ocasionado pela toxidez de fosfito sob altas concentrações, associado à baixa disponibilidade de P. Assim como ocorreu no experimento 1, na proporção Pi:Phi 0:100, aos 10 dias após o transplante já havia necrose nos bordos das folhas primárias, com posterior seca total destas aos 20 dias de cultivo. A elevação do teor de lignina neste tratamento pode estar associada ao estresse oxidativo comentado no experimento 1, como tem sido observado em plantas sob outros estresses ambientais (Lee et al., 2007).

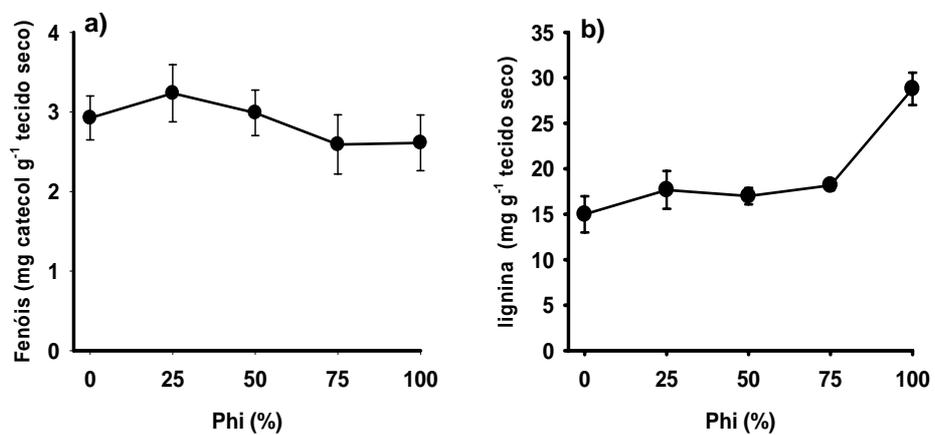


FIGURA 8 Teores de fenóis solúveis totais (a) e lignina (b) em folhas de plantas de feijoeiro, em função da percentagem de P-Phi na solução nutritiva. Barras indicam desvio padrão da média.

4 CONCLUSÕES

O fosfito não é capaz de substituir o fosfato na nutrição fosfatada de plantas de feijoeiro.

Na ausência de fosfato, o fosfito, mesmo em baixas concentrações, é tóxico às plantas de feijoeiro, contudo, sob suprimento adequado de P, esse efeito é pouco pronunciado.

A diminuição dos teores de Pi solúveis em ácido com o aumento das proporções de Phi na solução indica que o Phi interfere na absorção de Pi e ou se mantém estável na planta, não sendo oxidado a fosfato.

A atividade da fosfatase ácida é negativamente influenciada por altas proporções fosfito no meio de cultivo.

Os teores de lignina são maiores nas plantas cultivadas com fosfito como forma exclusiva de P.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFEK, U.; SZTEJNBERG, A. Effects of Fosetyl-Al and phosphorus on scoparone, a phytoalexin associated with resistance of citrus to *Phytophthora*, **Phytopathology**, v.79, p.736-739, 1989.
- ASCENCIO, J. Acid phosphatase as diagnostic tool. **Communication in Soil Science and Plant Nutrition**, v.25, p.1553-1564, 1994.
- BRACKMANN, A.; SESTARI, I.; GIEHL, R.F.H.; STEFFENS, C.A.; FAULIN, G.D.C.; PINTO, J.A.V. Controle de podridão pós-colheita de *penicillium* spp. em maçã 'fuji' com fosfitos e fungicidas. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.11, p.251-254, 2005.
- CARSWELL, C.; GRANT, B.R.; THEODOROU, M.E.; HARRIS, J.; NIERE, J.O.; PLAXTON, W.C. The fungicide phosphonate disrupts the phosphate-starvation response in *Brassica nigra* seedlings. **Plant Physiology**, v.110, p.105-110, 1996.
- DANIEL, R.; GUEST, D. Defense responses induced by potassium phosphonate in *Phytophthora palmivora*-challenged *Arabidopsis thaliana*. **Physiological and Molecular Plant Pathology**, v.67, p. 194 - 201, 2006.
- DUFF, S.M.G.; SARAH, G.; PLAXTON, W.C. The role of phosphatase in plant phosphorus metabolism. **Physiologia Plantarum**, v.90, p.791-800, 1994.
- EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Planta, 2006. 169p.
- FENN, M.E.; COFFEY, M.D. Studies on the *In vitro* and *in vivo* Antifungal Activity of Fosetyl-Al and Phosphorous acid. **Phytopathology**, v. 74, p.606-611, 1984.
- FENN, M.E.; COFFEY, M.D. Quantification of phosphonate and ethyl phosphonate in tobacco and tomato tissues and significance for the mode of action of two phosphonate fungicides. **Phytopathology**, v.79, p.76-82, 1989.
- FERNANDES, L.A.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CURTI, N. Frações de fósforo e atividade da fosfatase ácida em plantas de feijoeiro cultivadas em solos de várzeas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.561-571, 2000.

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

FÖRSTER, H.; ADASKAVEG, J.E.; KIM, D.H.; STANGHELLIN, M.E. Effect of Phosphite on Tomato and Pepper Plants and on Susceptibility of Pepper to *Phytophthora* Root and Crown Rot in Hydroponic Culture. **Plant Disease**, v.82, p.1165-1170, 1998.

GRANT, B.R.; GRANT, J.; HARRIS, J. Inhibition of growth of *Phytophthora infestans* by phosphate and phosphonate in defined media. **Experimental Mycology**, v.16, p.240-244, 1992.

GRIFFITH, J.M.; COFFEY, M.D., GRANT, B.R. Phosphonate Inhibition as a Function of Phosphate Concentration in Isolates of *Phytophthora palmivora*. **Journal of General Microbiology**, v.139, p.2109-2116, 1993.

GUEST, D.; GRANT, B.R. The complex action of phosphonates as antifungal agents. **Biology Review**, v.66, p.159-187, 1991.

HOGUE, E.; WILCOX, G.E.; CANTLIFE, D.J. Effect of soil phosphorus levels on phosphate fractions in tomato leaves. **Journal American Society for Horticultural Science**, v.95, p.174-176, 1970.

JACKSON. T. J.; BURGESS. T.; COLQUHOUN. I.; HARDY. G.E.S.J. Action of the fungicide phosphite on *Eucalyptus marginata* inoculated with *Phytophthora cinnamomi*. **Plant Pathology**, v.49, p.147-154, 2000.

JOHNSON, D.; INGLIS, D.A.; MILLER, J.S. Control of Potato Tuber Rots Caused by Oomycetes with Foliar Applications of Phosphorous Acid. **Plant Disease**, v. 88, p.1153-1159, 2004.

KUHN, O.J. **Indução de resistência em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) por acibenzolar-S-metil e *Bacillus cereus***: aspectos fisiológicos, bioquímicos e parâmetros de crescimento e produção. 2007. 140 f. Tese (Doutorado em Fitopatologia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

LEE, B-R.; KIM, K-Y.; JUNG, W-J.; AVICE, J-C.; ALAIN OURRY, A.; KIM, T-H. Peroxidases and lignification in relation to the intensity of water-deficit stress in white clover (*Trifolium repens* L.). **Journal of Experimental Botany**, v. 13, p.1-9, 2007.

LEE, T-M.; TSAI, P-F. The effects of phosphate on phosphate starvation responses of *Ulva lactuca* (*Ulvales. chlorophyta*). **Journal of Phycology**, v. 41, p.975-982, 2005.

LOVATT, C.J.; MIKKELSEN, R.L. Phosphite Fertilizers: What are they? Can you use them? What can they do? **Better Crops**, v.90, p.1-11, 2006.

LUCAS, R.E.; WARNCKE, D.D.; THORPE, V.A. Phosphite injury to corn. **Agronomy Journal**, v.71, p.1063-1065, 1979.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2.ed. New York: Academic, 1995. 902p.

MACINTIRE, H.W.; S.H.; HARDIN, L.J.; STERGES, A.J.; CLEMENTS, L.B. Fertilizer evaluation of certain phosphorous, phosphorous, and phosphoric materials by means of pot cultures. **Agronomy Journal**, v.42, p.543-549, 1950.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. Piracicaba: Associação Brasileira da Potassa e do Fosfato. 1997. 319p.

MAYER, A.M.; HAREL, E. Polyphenol oxidases in plants. **Phytochemistry**, Oxford, v.18, p.193-215, 1979.

MCDONALD, A.E.; GRANT, B.R.; PLAXTON, W.C. Phosphite (Phosphorous acid): Its relevance in the environment and agriculture and influence on plant phosphate starvation response. **Journal of Plant Nutrition**, v.24, p.1505-1519, 2001.

MENGEL, K.; KIRBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 5.ed. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic, 2001. 849p.

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

QUIMETTE, D.G.; COFFEY M.D. Phosphonate Levels in Avocado (*Persea americana*) Seedlings and Soil Following Treatment with Fosehyl-Al or Potassium Phosphonate. **Plant Disease**, v.73, p. 212-215, 1989.

PILBEAM, R. **Effects of phosphite on disease development and histological responses in *Eucalyptus marginata* infected with *Phytophthora cinnamomi***. 2003. 175f. Tese (PhD) - Murdoch University.

RUIZ, H.A.; HERKEHOFF FILHO, H.E.; BUNICENHA, J.M. Proporções e concentrações de macronutrientes na formulação de soluções nutritivas para culturas de interesse agrônomo. V. Feijão. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 18., Guarapari, 1988. **Resumos...** Vitória, ES: SEAG-ES/EMCAPA/EMATER-ES/SBCS, 1988.

SALA, F.C.; COSTA, C.P.; ECHER, M.M.E.; MARTINS, M.C.; BLAT, S.F. Phosphite effect on hot and sweet pepper reaction to *Phytophthora capsici*. **Scientia Agricola**, v.61, p.492-495, 2004.

SARAPATIKA, B.; DUDOVÁ, L.; KRŠKOVÁ, M. Effect of pH and phosphate supply on acid phosphatase activity in cereal roots. **Biologia Bratislava**, v.59, p.127-131, 2004.

SCHROETTER, S.; ANGELES-WEDLER, D.; KREUZIG, R.; SCHNUG, E. Effects of phosphite on phosphorus supply and growth of corn (*Zea mays*). **Landbauforschung Volkenrodxe, Fal Agricultural Research**, v.56, p.87-99, 2006.

SHEARER, B.L.; FAIRMAN, R.G. A stem injection of phosphate protects *Banksia* species and *Eucalyptus marginata* from *Phytophthora cinnamomi* for at least four years. **Australian Plant Pathology**, v.36, p.78-86, 2007.

SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v.4, p.289-302, 1981.

SILVA, F.C.; BASSO, L.C. Avaliação da atividade in vivo da fosfatase ácida da folha na diagnose da nutrição fosfórica em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.3, p.371-375, 1993.

SINGH, V.K.; WOOD, S.M.; KNOWLES, V.L.; PLAXTON, W.C. Phosphite accelerates programmed cell death in phosphate-starved oilseed rape (*Brassica napus*) suspension cell cultures. **Planta**, v.218, p.233-239, 2003.

SMILLIE, R.; GRANT, B.R.; GUEST, D. The Mode of Action of Phosphite: Evidence for Both Direct and Indirect Action Modes of Action on Three *Phytophthora* spp. in Plants. **Phytopathology**, v.79, p.921-926, 1989.

STEMANN, C.; GRANT, B.R. Inhibition of enzymes of glycolytic pathway and hexose monophosphate bypass by phosphonate. **Pesticide Biochemical Physiology**, v.67, p.23-24, 2000.

TICCONI, C.A.; DELATORRE. C.A.; ABEL. S. Attenuation of phosphate starvation responses by phosphite in *Arabidopsis*. **Plant Physiol**, v.127, p.963 - 972, 2001.

VARADARAJAN, D.K.; KARTHIKEYAN, A.S.; MATILDA, P.D.; RAGHOTHAMA, K.G. Phosphite, an analog of phosphate. suppresses the coordinated expression of genes under phosphate starvation. **Plant Physiology**, v.129, p.1–9, 2002.

VAVRINA, C.S. **Soil and foliar application of Nutri-Phite (PO₃) on pepper under drip irrigation in SW Florida**. Florida: Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, 1998.

WHITE, A.K.; METCALF, W.W. Microbial metabolism of reduced phosphorus compounds. **Annual Review of Microbiology**, v.61, p.379-400, 2007.

CAPÍTULO II

EFEITO DO FOSFITO E DO FOSFATO VIA FOLIAR SOBRE O CRESCIMENTO E A NUTRIÇÃO FOSFATADA DO FEIJOEIRO

RESUMO

ARAÚJO, Josinaldo Lopes. Efeito do fosfito e do fosfato via foliar sobre o crescimento e a nutrição fosfatada do feijoeiro. In:_____ **Crescimento e nutrição fosfatada do feijoeiro em função da aplicação via radicular e foliar de fosfito**. 2008. Cap. 2, p. 41-71. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG⁵.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito do fosfito e do fosfato, aplicados via foliar, sobre o crescimento e a nutrição fosfatada do feijoeiro cultivado em condição de baixo e adequado suprimento de P, em solução nutritiva. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com os tratamentos arranjados em fatorial 2 x 3 x 2, em que foram combinadas duas concentrações de fosfato na solução nutritiva (1,5 mg L⁻¹ = baixo fósforo e 20 mg L⁻¹ = fósforo adequado), três produtos de aplicação foliar: KH₂PO₃ (fosfito monobásico de potássio), KH₂PO₄ (fosfato monobásico de potássio) e KCl (cloreto de potássio) como testemunha e dois tratamentos referentes ao número de aplicações dos produtos (aplicação única, no surgimento do primeiro trifólio e duas aplicações: uma no surgimento do primeiro trifólio e a outra aplicação no pré-florescimento), com quatro repetições. No florescimento do feijoeiro, foram avaliados a área foliar (AF), a atividade *in vivo* da fosfatase ácida (AFA), os teores solúveis de Pi (fósforo inorgânico), Po (fósforo orgânico) e P_t (fósforo total). Na mesma época, determinaram-se, ainda, matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca de raízes (MSR) e teores de P total nestes tecidos, com os quais foram obtidos a relação raiz:parte aérea, o acúmulo de P na MSPA e na MSR e a eficiência de utilização de P (EUP). Os resultados mostraram que MSPA, MSR, AF, AFA, EUP e relação raiz:parte aérea não foram afetadas pelos tratamentos de aplicação foliar sob suprimento adequado de P. Contudo, sob baixa disponibilidade desse nutriente, a aplicação de Phi foliar teve efeito negativo sobre estas variáveis. Os teores e o acúmulo de P total nos tecidos da parte aérea e raízes, bem como as frações de P solúveis nos tecidos frescos das folhas do feijoeiro, foram pouco afetados pelos tratamentos de aplicação foliar. Conclui-se que o fosfito ou o fosfato, aplicados via foliar, não são capazes de corrigir a deficiência de P nas plantas de feijoeiro. Independentemente do número de aplicações, a aplicação foliar de fosfito, em comparação à do fosfato, tem efeito depressivo sobre o crescimento do feijoeiro sob baixo suprimento de P.

⁵Orientador: Prof. Valdemar Faquin – DCS/UFLA

Mecanismos de superação de deficiência de P, como o aumento da relação raiz:parte aérea e a atividade da fosfatase ácida, são afetados negativamente pela aplicação foliar de fosfito.

Palavras-chave: fosfito de potássio, frações de fósforo, fosfatase ácida.

ABSTRACT

ARAÚJO, Josinaldo Lopes. The effect of foliar phosphite and phosphate on the growth and phosphated nutrition of bean plants. In:_____ **Growth and phosphated nutrition of bean plant in function of radicular and foliar application of phosphite.** 2008. Chap. 2, p. 41-71. Thesis (Soil Science) – Federal University of Lavras, Lavras, MG⁶.

The present work aimed to evaluate the effect of foliar applied phosphite and phosphate on the growth and phosphated nutrition of the bean plant cultivated under low and adequate P supply conditions, in nutrient solution. The experiment was conducted in an entirely random layout, with the treatments arranged in a 2x3x2 factorial, where two phosphate concentrations were combined in the nutrient solution (1.5 mg L⁻¹ = low phosphorous and 20 mg L⁻¹ = adequate phosphorous), three foliar application products: KH₂PO₃ (monobasic potassium phosphite), KH₂PO₄ (monobasic potassium phosphate) and KCl (potassium chloride) as control and two treatments referring to the number of applications (one application, at the appearance of the first trifoliolate leaf and two applications: one at the appearance of the first trifoliolate leaf and the other application at the pre-flowering), with four repetitions. At bean plant flowering, the foliar area (FA), the *in vivo* acid phosphatase activity (APA), the levels soluble Pi (inorganic phosphorus), Po (organic phosphorus) and P_t (total phosphorus). At the same time, the aerial part dry matter (APDM), root dry matter (RDM) and the total P levels in these tissues was determined, with which the root: aerial part ratio, the accumulation of P in APDM and in RDM and the P use efficiency (PUE) were obtained. The results showed that APDM, RDM, FA, APA, PUE and root: aerial parte ratio were not affected by the foliar application treatments under appropriate supply of P. However, under low readiness of that nutrient the application of foliar Phi had a negative effect on these variables. The levels and total P accumulation in the aerial part and root tissues, as well as the fractions of soluble P in the fresh tissues of the bean plant leaves were little affected by the foliar application treatments. It was concluded that foliar applied phosphite or phosphate are not capable of correcting the P deficiency in the bean plant. Independent of the number of applications, the foliar application of phosphite in comparison with phosphate, has a depressive effect on the growth of the bean plant under low supply of P. Mechanisms for overcoming the P deficiency such as the increase of the root: aerial parte ratio and the acid

⁶Advisor: Prof. Valdemar Faquin – DCS/UFLA

phosphatase activity, are negatively affected by the foliar application of phosphite.

Key-Words: potassium phosphite, phosphorus fractions, acid phosphatase.

1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é um dos nutrientes que mais limitam a produção das culturas e é, sem dúvida, o que mais desperta o interesse dos pesquisadores (Novais & Smith, 1999). De acordo com esses autores, devido à sua forte interação com a fase sólida do solo, adubações pesadas com este nutriente na forma de fosfatos são necessárias para suprir adequadamente as culturas. O P é absorvido pelas plantas como ânions fosfatos (H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} e PO_4^{3-}) e, como tal, entra no metabolismo vegetal após ser convertido a compostos orgânicos e desempenhar suas múltiplas funções (Mengel & Kirby, 2001; Epstein & Bloom, 2006).

O fósforo pode existir também em formas mais reduzidas, como fosfina (PH_3), hipofosfito (H_2PO_2^-) e fosfito (HPO_3^-), os quais são obtidos por processos de redução pela indústria química (White & Metcalf, 2007). Contudo, esse processo é oneroso, uma vez que requer grande quantidade de energia no processo de redução do fosfato (McDonald et al., 2001).

O uso de fósforo reduzido, como os fosfitos, na agricultura, não é recente. Já na década de 1970, algumas pesquisas demonstravam que este ânion era eficiente no controle de vários patógenos de plantas que vivem no solo, como pseudofungos da classe dos Oomycetos, particularmente *Phytophthora* sp., o que foi confirmado em vários trabalhos posteriores (Fenn et al., 1989; Guest et al., 1991; Grant et al., 1992; Griffith et al., 1993; Jackson et al., 2000; Johnson et al., 2004; Sala et al., 2004; Shearer et al., 2007). A partir de então, várias indústrias começaram a produzir diversos produtos à base de fosfito, como sais de metais alcalinos obtidos a partir do ácido fosforoso (H_3PO_3). Os mais produzidos são os fosfitos de potássio, de cálcio, de sódio e fosfito de amônio (McDonald et al., 2001; Schroetter et al., 2006).

Atualmente, diversos produtos à base de fosfitos são comercializados em todo o mundo, não apenas como fungicidas, mas também têm sido recomendados para adubações foliares, como fonte de P. Contudo, não há evidências de que o fosfito possa ser utilizado como fonte de P pelas plantas. Ao contrário, há indicações de que o fósforo na forma de fosfito não é metabolizado pelas plantas, causando efeitos depressivos sobre seu crescimento (Lucas et al., 1979; Förster et al., 1998; Ticconi et al., 2001; Schroetter et al., 2006). Outros trabalhos, porém, têm mostrado que o efeito depressivo do fosfito sobre as plantas é manifestado apenas quando estas são cultivadas sob baixo suprimento de P, na forma de fosfato (Varadarajam et al., 2002; Singh et al., 2003; Lee & Tsai, 2005; Thao et al., 2008).

Os efeitos negativos do fosfito sob baixa disponibilidade de P, em geral, são atribuídos à supressão dos mecanismos de superação de deficiência de P desenvolvidos pelas plantas. Esses mecanismos estariam associados à expressão de genes ligados ao aumento da atividade de fosfatases (Ticconi et al., 2001; Lee & Tsai, 2005), à sinalização para a expressão de genes para transportadores de alta afinidade para P e à alongação do sistema radicular (Varadarajan et al., 2002). Portanto, há necessidade de um melhor entendimento dos efeitos da aplicação foliar de fosfito sobre o crescimento e a nutrição fosfatada de plantas de interesse agrícola, quando estas estão submetidas a condições de baixo e adequado suprimento de P.

Os trabalhos que avaliam os efeitos da adubação foliar com fosfito sob suprimento adequado ou insuficiente de P são quase inexistentes (Schroetter et al., 2006). Em geral, os mecanismos descritos são investigados com o fornecimento de fosfito via solução nutritiva. Além disso, para culturas de importância agrícola, como o feijoeiro, nada foi encontrado na literatura.

Portanto, o presente trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar o efeito do fosfito e do fosfato, aplicados via foliar, sobre o crescimento e a

nutrição fosfatada do feijoeiro cultivado em condição de baixo e adequado suprimento de P em solução nutritiva.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em solução nutritiva, em casa de vegetação do Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, com feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L. cv. BRS Radiante). As sementes de feijoeiro foram germinadas em substrato vermiculita, em bandejas de isopor. Após três dias da emergência, as plântulas foram selecionadas conforme o tamanho e a área foliar e transferidas para vasos de 3 L contendo solução nutritiva a 50% de sua força iônica original, com os respectivos tratamentos, recebendo arejamento constante.

A solução nutritiva empregada foi a proposta por Ruiz (1988) que, originalmente, continha 0,8 mmol L⁻¹ de N-NH₄⁺; 5,4 mmol L⁻¹ de N-NO₃⁻; 0,8 mmol L⁻¹ de P; 2,0 mmol L⁻¹ de K; 1,7 mmol L⁻¹ de Ca; 0,4 mmol L⁻¹ de Mg; 0,4 mmol L⁻¹ de S; 40 μmol L⁻¹ de Fe-EDTA; 19 μmol L⁻¹ de B; 7 μmol L⁻¹ de Mn; 2 μmol L⁻¹ de Zn; 0,5 μmol L⁻¹ de Cu e 0,6 μmol L⁻¹ de Mo, com as devidas modificações para o estabelecimento das concentrações de P. Após cinco dias de cultivo, a força iônica da solução foi aumentada para 100%, sendo esta mantida até o final do experimento. O volume de solução dos vasos foi completado diariamente com água deionizada, sendo sua substituição realizada a cada cinco dias e seu pH foi corrigido diariamente para valores entre 5,5 e 6,0, pela adição de NaOH ou HCl, 1 mol L⁻¹.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições, em esquema fatorial 2 x 3 x 2, em que foram combinadas duas concentrações de fosfato na solução nutritiva (1,5 mg L⁻¹ = baixo fósforo e 20 mg L⁻¹ = fósforo adequado), três produtos de aplicação foliar: KH₂PO₃ (fosfito monobásico de potássio), KH₂PO₄ (fosfato monobásico de potássio) e KCl (cloreto de potássio) como testemunha e dois tratamentos referentes ao número de aplicações dos produtos (aplicação única no surgimento

do primeiro trifólio e duas aplicações, uma no surgimento do primeiro trifólio e a outra aplicação no pré-florescimento). Cada repetição foi constituída por um vaso com duas plantas. As soluções de P (fosfito e fosfato) e a de KCl foram aplicadas nas concentrações de 40 mmol L⁻¹ (fontes p.a.), em volume médio de 60 mL planta⁻¹, utilizando-se pulverizador costal manual. A concentração de P empregada equivale à dose aproximada de 3 L de fosfito de potássio comercial (30% v/v de P₂O₅) para 400 L de calda, normalmente recomendada para a cultura do feijoeiro. O KH₂PO₃ empregado foi obtido pela reação do ácido fosforoso com o hidróxido de potássio. Objetivando otimizar o efeito das aplicações foliares, em cada solução foi adicionado o espalhante adesivo ADESIL[®] (Agripec), na concentração de 0,2 mL L⁻¹ de solução.

Na época do florescimento do feijoeiro (10 dias após a segunda aplicação dos produtos de aplicação foliar e 32 dias após o transplante), foi coletada uma planta de cada repetição, da qual foi retirado o último trifólio fisiologicamente maduro, para a avaliação da atividade da fosfatase ácida (AFA) e a realização do fracionamento do fósforo na matéria fresca destes tecidos. O fracionamento do P foi realizado conforme Hogue et al. (1970), modificado por Fernandes et al. (2000). Para tanto, foram tomados 0,5 g de tecido para a avaliação das seguintes frações de P solúveis em ácido: Pi (fósforo inorgânico), Po (fósforo orgânico) e P_t (fósforo total). A atividade *in vivo* da fosfatase ácida foi determinada de acordo com Silva & Basso (1993), em que 200 mg de discos foliares foram transferidos para tubos de ensaios envolvidos em papel alumínio e incubados em banho-maria, a 30°C, com 8 mL de paranitrofenilfosfato a 250 μmol L⁻¹, em tampão-acetato de sódio 0,1 mol L⁻¹, com pH ajustado para 5,0. Após 20 minutos de incubação, foram tomadas alíquotas de 5 mL do meio de reação, às quais foram adicionados 2 mL de NaOH 2,0 mol L⁻¹ para imediatamente serem feitas as leituras em espectrofotômetro, a 410 nm.

Na planta restante nos vasos de cada repetição foi avaliada a área foliar (AF) utilizando-se o medidor de área portátil Li-Cor modelo Li 3000A, USA e, em seguida, as plantas foram separadas em parte aérea e raízes, e secas em estufa (65°-70°) para a avaliação da matéria seca da parte aérea (MSPA) e matéria seca de raízes (MSR). Posteriormente, o material foi moído separadamente, para a determinação de P, pela digestão nítrico-perclórica nesses tecidos (Malavolta et al., 1997). De posse dos dados de MSPA, MSR e dos teores de P total do extrato nítrico-perclórico, foram calculados o acúmulo e a eficiência de utilização de P (EUP), de acordo com Siddiqi & Glass (1981), pela fórmula: $EUP = (\text{matéria seca total})^2 / (\text{acúmulo total de P})$.

A análise estatística consistiu na análise de variância e no teste de médias (Tukey, a 5%) com auxílio do *software* Sisvar[®] (Ferreira, 2000) e análise de correlação linear simples entre as variáveis avaliadas, com auxílio do *software* SAEG[®] versão 9.1.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Produção de matéria seca e teores e acúmulo de P

Conforme a análise de variância, a área foliar (AF), a matéria seca da parte aérea (MSPA), a matéria seca de raízes (MSR) e a relação raiz:parte aérea foram influenciados significativamente pelas concentrações de P na solução nutritiva e pelos produtos de aplicação foliar, bem como pela interação entre estes fatores (Tabela 8A). O número de aplicações dos produtos não promoveu efeitos sobre essas variáveis. Ressalta-se que, caso as plantas fossem conduzidas até a produção de grãos, os resultados referentes ao efeito do número de aplicações poderiam não ter sido os mesmos, dada a maior exigência de P nesta época pela planta. Contudo, em função dos objetivos deste trabalho, a condução do experimento por mais tempo não se justificaria. A área foliar (Figura 1a) e a MSPA (Figura 1b) foram marcadamente reduzidas pelo baixo suprimento de P na solução de cultivo. Para a MSR, que também apresentou menor valor com baixo suprimento de P, esse efeito foi menos pronunciado (Figura 1c). A relação raiz:parte aérea (Figura 1d) mostrou comportamento oposto ao observado para AF e MSPA.

O feijoeiro cultivado sob baixo suprimento de P ($1,5 \text{ mg L}^{-1}$) apresentou, aos 15 dias após o transplante, sintomas típicos de deficiência de P, que se manifestaram com pequeno crescimento da parte aérea, redução da área foliar e folhas com coloração verde-escura. As causas dos sintomas da deficiência de P nas plantas já são bem documentados. Uma vez que esse nutriente faz parte da estrutura de importantes biomoléculas como o DNA, RNA, fosfolípidios de membranas e tem participação nos diversos processos metabólicos vitais para as plantas, como a transferência de energia e a ativação e a desativação enzimática, invariavelmente, plantas com baixo suprimento de P têm seu crescimento comprometido (Epstein & Bloom, 2006). A diminuição da área foliar sob baixo

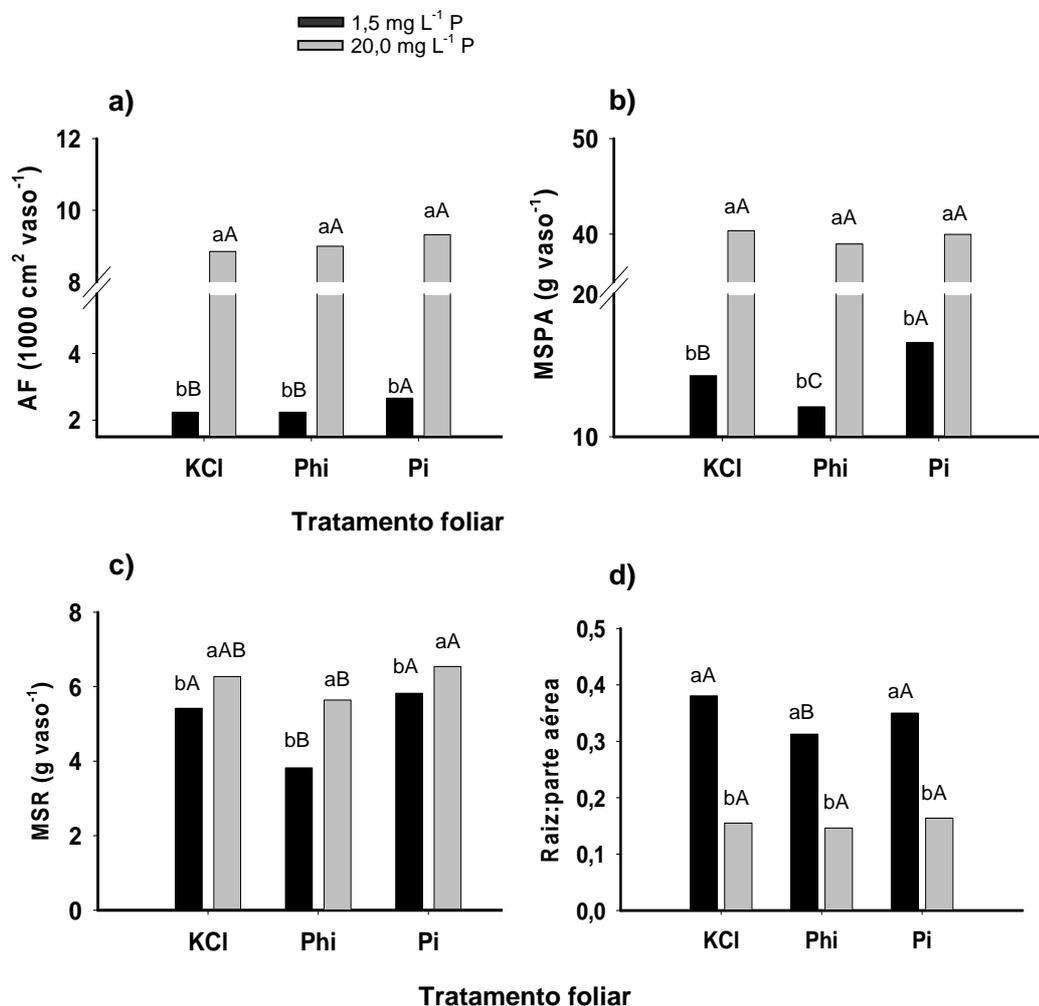


FIGURA 1 Área foliar (AF)(a), matéria seca da parte aérea (MSPA)(b), matéria seca de raízes (MSR)(c) e relação raiz:parte aérea (d) do feijoeiro em função de tratamentos de aplicação foliar com cloreto de potássio (KCl), fosfito de potássio (Phi) e fosfato de potássio (Pi) e concentrações de fósforo na solução nutritiva, baixa (1,5 mg L⁻¹) e adequada (20 mg L⁻¹). Médias seguidas de mesma letra, minúscula, comparando as concentrações de P na solução para cada produto e, maiúscula, comparando os produtos em cada nível de P, não diferem entre si (Tukey, 5%).

suprimento de P é consequência da redução do número de folhas e também da menor expansão foliar (Lynch et al., 1991). O aumento da relação raiz:parte aérea sob baixa disponibilidade de P constitui um mecanismo de superação de deficiência de P. Sob tal situação, as plantas destinam boa parte de fotoassimilados para uma maior produção de raízes, objetivando maior exploração do seu meio de cultivo e maior absorção de P (Clarkson, 1985).

Comparando-se os tratamentos de aplicação de produtos via foliar, verifica-se que, sob suprimento adequado de P (20 mg L^{-1}), as variáveis citadas não apresentaram variação significativa entre os tratamentos (Figura 1a-d), concordando com os resultados obtidos por Vavrina (1998) em trabalho de campo com plantas de pimenta. Por outro lado, sob baixa disponibilidade desse nutriente, a aplicação foliar de fosfito (Phi) proporcionou redução significativa na produção de MSPA (Figura 1b), MSR (Figura 1c) e na relação raiz:parte aérea (Figura 1d) em relação ao controle (aplicação de KCl foliar). A área foliar (Figura 1a) não foi afetada pelo Phi foliar, mas foi favorecida pela aplicação foliar de fosfato (Pi). Assim, a aplicação foliar de fosfito em plantas deficientes em fósforo pode agravar ainda mais o problema. É importante ressaltar que as plantas de feijoeiro, após três dias da aplicação foliar com Phi, sob baixo suprimento de P, apresentaram fitotoxidez por fosfito. Os sintomas se manifestaram, inicialmente, pela presença de necroses distribuídas por todo o limbo das folhas mais velhas. Com o crescimento da planta, as folhas novas apresentaram-se cloróticas, com reticulado fino e com encarquilhamento da face adaxial com aspecto de “canao” (Figura 2a), semelhante ao que ocorre com a fitotoxidez por glifosato. A fitotoxidez também foi observada nas raízes, as quais apresentaram menor crescimento com a aplicação foliar de Phi (Figura 2a). Sob adequado suprimento de P, estes sintomas não foram observados (Figura 2b).

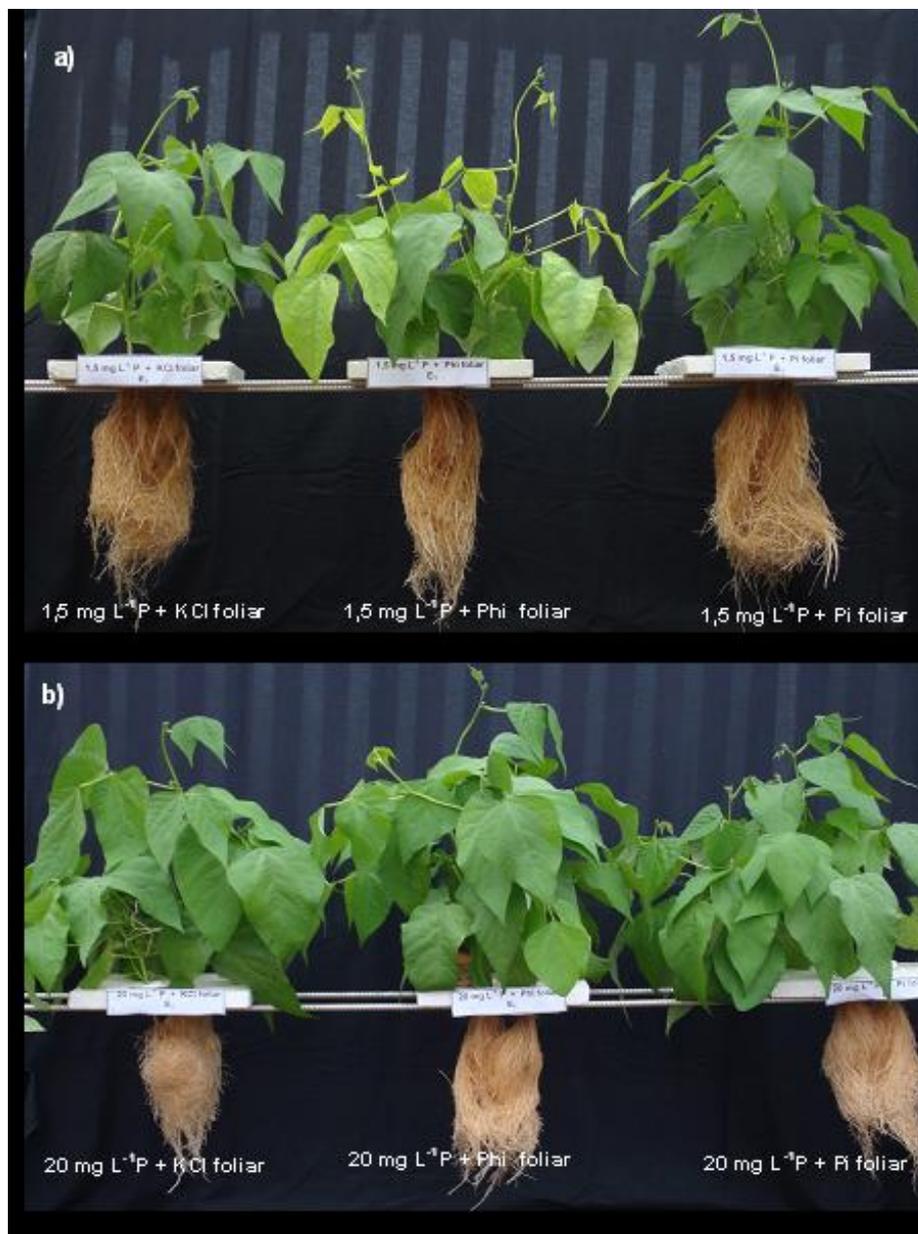


FIGURA 2 Aspecto do feijoeiro aos 20 dias após o transplante, cultivado em solução nutritiva, com as concentrações de 1,5 mg L⁻¹ P (a) e 20 mg L⁻¹ P (b), nos tratamentos de aplicação foliar com cloreto de potássio (KCl), fosfito de potássio (Phi) e fosfato de potássio (Pi).

Resultados semelhantes aos apresentados acima têm sido observados em outros trabalhos (Carswell et al., 1996; Förster et al., 1998; Ticconi et al., 2001; Varadajan et al., 2002; Schroetter et al., 2006; Thao et al., 2008). De acordo com esses autores, os fosfitos têm ação repressora dos mecanismos de superação da deficiência de P, como o aumento da atividade da fosfatase ácida, aumento da síntese de transportadores de Pi de alta afinidade e aumento do comprimento, alongação e densidade de pêlos absorventes das raízes, embora não se conheçam os mecanismos exatos pelos quais isso ocorre. Além disso, o fosfito, após absorvido, se mantém estável nos compartimentos celulares, não sendo metabolizado pelas plantas, podendo trazer sérias implicações ao metabolismo vegetal (Quimette & Coffey, 1989; Stemann & Grant, 2000; McDonald et al., 2001; Singh et al., 2003; Pilbeam, 2003; Lee & Tsai, 2005; Schroetter et al., 2006).

Ressalta-se também que, no tratamento com baixo P na solução (1,5 mg L⁻¹), independentemente do número de aplicações, a aplicação foliar de Pi favoreceu a AF e a produção de MSPA do feijoeiro em relação ao controle, KCl (Figura 1a, b). Um aumento da atividade fotossintética pela aplicação de Pi foliar tem sido sugerido (Santos, 2005; Santos et al., 2006). Embora a aplicação foliar tenha proporcionado algum benefício sobre a MSPA e AF, seus valores ficaram muito aquém daqueles mostrados pelas plantas bem supridas em P, não sendo suficiente para corrigir a deficiência desse nutriente (Figuras 1a, b e 2a, b).

Com relação à nutrição fosfatada do feijoeiro, os teores de P total (obtido na digestão nítrico-perclórica) na MSPA foram influenciados pelas concentrações de P na solução e pela interação tripla entre os três fatores estudados (Tabela 9A). O P acumulado na MSPA foi afetado pelas concentrações de P na solução, pela interação entre as concentrações e o número de aplicações dos produtos de aplicação foliar e pela interação tripla entre os

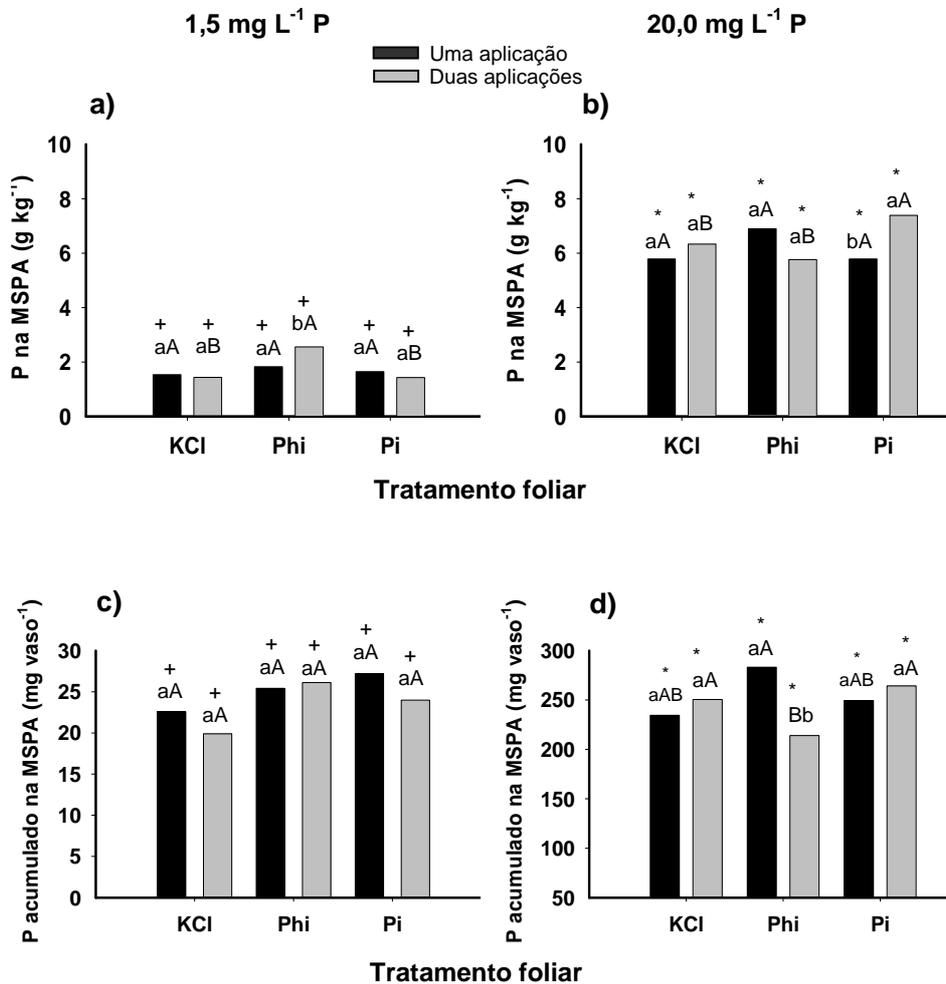


FIGURA 3 Teores (a,b) e acúmulo (c,d) de fósforo em plantas de feijoeiro, em função de tratamentos de aplicações foliares com cloreto de potássio (KCl), fosfito de potássio (Phi) e fosfato de potássio (Pi) e concentrações de fosfato na solução nutritiva, baixa (1,5 mg L⁻¹) e adequada (20 mg L⁻¹). Médias seguidas de mesma letra, minúscula, comparando o número de aplicações para cada produto e maiúscula, comparando os produtos em cada número de aplicações, não diferem entre si (Tukey, 5%). Médias seguidas por símbolos diferentes (+ e *), comparando as concentrações de P na solução dentro de cada número de aplicações, diferem entre si (Tukey, 5%).

fatores estudados. Como era de se esperar, os valores dessas variáveis sob baixo suprimento de P na solução de cultivo ($1,5 \text{ mg L}^{-1}$) foram sempre inferiores àqueles sob suprimento adequado de P (Figura 3a-d). O menor acúmulo de P na MSPA sob baixa disponibilidade de P na solução de cultivo reflete o menor teor de P, combinado com a menor produção de MSPA (Figura 1b). Quanto aos tratamentos de aplicação de produtos via foliar, verifica-se que, sob baixo suprimento de P e com duas aplicações foliares, os teores de P na MSPA foram superiores com o uso de fosfito (Phi) (Figura 3a), o que, provavelmente, reflete o “efeito de concentração”, uma vez que o fosfito proporcionou menor produção de MSPA (Figura 1b). Por outro lado, o P acumulado nesses tecidos não sofreu variação significativa nos tratamentos com uma ou duas aplicações foliares (Figura 3c). Sob adequado suprimento de P, o fornecimento de Pi foliar com duas aplicações proporcionou teores mais elevados de P nos tecidos da parte aérea (Figura 3b). Cabe ressaltar que, sob baixo suprimento de P via solução, a aplicação foliar de Pi não aumentou os teores de P na MSPA, como ocorreu sob suprimento adequado desse nutriente. Isso provavelmente ocorreu porque, sob baixa disponibilidade de P, as plantas de feijoeiro estavam sob “deficiência severa” de P. Assim, a aplicação foliar de Pi contribuiu para aumentar a produção de MSPA (Figura 1b), mas não foi suficiente para elevar seus teores sob tal condição (Malavolta et al., 1997; Faquin, 2002). Sob suprimento adequado de P, o fornecimento foliar de Phi em duas aplicações diminuiu o P acumulado nesses tecidos (Figura 3d), fato esse associado com o efeito detrimental da aplicação foliar de Phi sobre a produção de MSPA.

Nas raízes, os teores e o acúmulo de P foram influenciados apenas pela concentração de P na solução nutritiva. Como era de se esperar, os maiores valores para essas variáveis foram obtidos com adequado suprimento de P (Figura 4a, b).

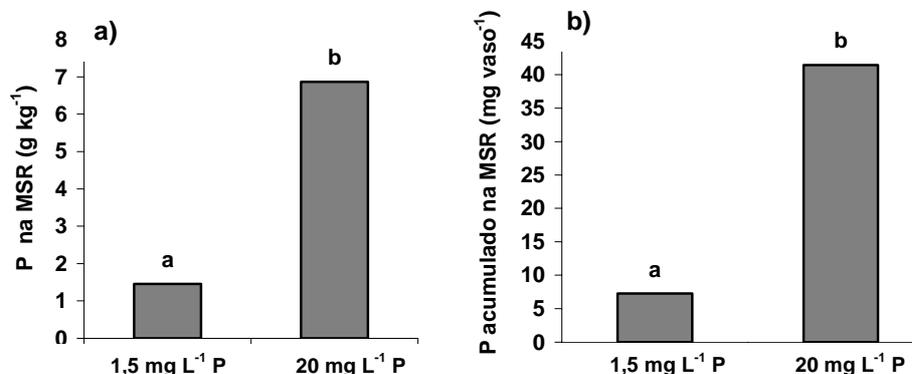


FIGURA 4 Teores (a) e acúmulo (b) de P na matéria seca de raízes (MSR) do feijoeiro, em função das concentrações de fosfato na solução nutritiva, baixa (1,5 mg L⁻¹) e adequada (20 mg L⁻¹). Médias seguidas de letras diferentes diferem entre si (Tukey, 5%).

3.2 Eficiência de utilização e frações de P, atividade da fosfatase ácida e correlações entre variáveis

A eficiência de utilização de P (EUP) foi influenciada significativamente pelas concentrações de P na solução nutritiva, pelos produtos de aplicação foliar, pelo número de aplicações dos produtos e pela interação tripla entre estes fatores (Tabela 10A). Com exceção do tratamento com duas aplicações foliares de Phi sob baixa disponibilidade de P (1,5 mg L⁻¹), os valores de EUP em todos os tratamentos de aplicação foliar, independentemente do número de aplicações, foram estatisticamente sempre superiores sob baixa disponibilidade de P na solução nutritiva (Figura 5a). Esse comportamento tem sido observado em outros trabalhos que avaliaram a EUP em solução nutritiva (Furlani et al., 1990; Machado et al., 2001). Esse resultado indica que, sob alto suprimento de P,

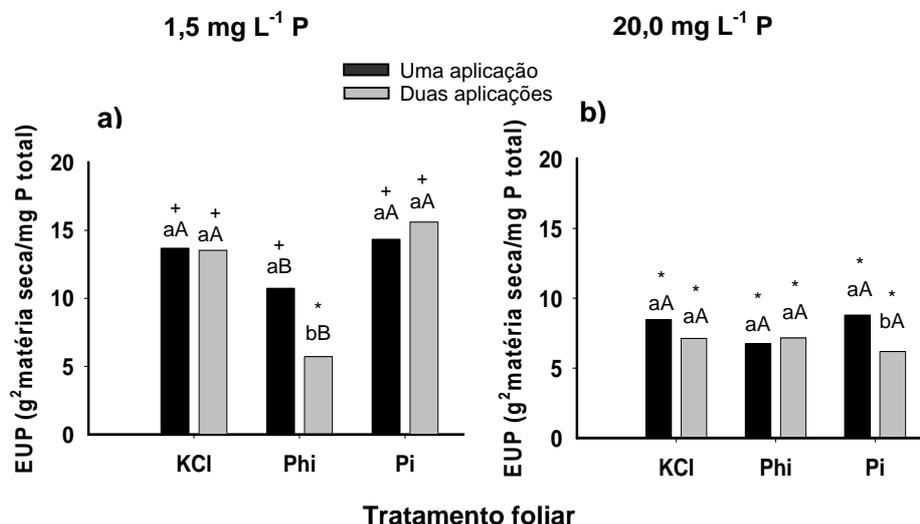


FIGURA 5 Eficiência de utilização de P (EUP) de plantas de feijoeiro, em função de tratamentos de aplicações foliares com cloreto de potássio (KCl), fosfito de potássio (Phi) e fosfato de potássio (Pi) e concentrações de fosfato na solução nutritiva, baixa ($1,5 \text{ mg L}^{-1}$) e adequada (20 mg L^{-1}). Médias seguidas de mesma letra minúscula, comparando o número de aplicações para cada produto e maiúscula, comparando os produtos em cada número de aplicações, não diferem entre si (Tukey, 5%). Médias seguidas por símbolos diferentes (+ e *), comparando as concentrações de P na solução dentro de cada número de aplicações, diferem entre si (Tukey, 5%).

grande parte do P absorvido ficou armazenada nos compartimentos celulares, constituindo o “consumo de luxo” (Faquin, 2002).

Com relação aos tratamentos de aplicação foliar, sob baixa disponibilidade de P, a menor EUP foi obtida com a aplicação de Phi, tanto com uma quanto com duas aplicações; com duas aplicações, o efeito foi mais pronunciado (Figura 5a). Sob disponibilidade adequada de P, esse efeito não foi observado, mas o fornecimento de Pi via foliar em duas aplicações reduziu a

EUP pelo feijoeiro (Figura 5b), possivelmente devido ao consumo de luxo mencionado acima.

As concentrações de P inorgânico (Pi), P orgânico e P total (Pts) solúveis em ácido nas folhas diagnósticas do feijoeiro (trifólio recém-maduro, no florescimento) foram afetadas significativamente apenas pelas concentrações de P na solução nutritiva (Tabela 11A). Como observado para o teor e o acúmulo de P, todas as frações solúveis desse nutriente apresentaram maiores concentrações sob adequada disponibilidade de P (20 mg L^{-1}) (Figura 6). É interessante comentar que, sob baixo suprimento de P, o Pi contribuiu com apenas 23% do Pts. Em contrapartida, sob suprimento adequado de P, este valor subiu para 67%. Em outros trabalhos têm se observado resultados semelhantes (Wieneke, 1990; Caradus et al., 1998; Fernandes et al., 2000). Isso ocorre porque, sob baixo suprimento de P, a maior parte do Pi absorvido é incorporada rapidamente a compostos orgânicos. Nessas condições, apenas uma pequena parcela do P total solúvel em ácido é encontrada na forma de Pi solúvel, a qual constitui uma reserva de P para a planta. Sob suprimento adequado de P, o oposto é observado, ou seja, a maior parte do P solúvel é encontrada na forma inorgânica (Pi), a qual é armazenada nos compartimentos celulares, principalmente no vacúolo (Hogue et al., 1970).

Como mencionado, os tratamentos de aplicação foliar não afetaram as frações solúveis de P, concordando com os resultados obtidos para os teores totais de P (digestão nítrico-perclórica) na MSPA e na MSR, que foram pouco afetados pela aplicação foliar de Phi ou Pi, especialmente sob baixo suprimento de P ($1,5 \text{ mg L}^{-1}$). Esses resultados mostram que as aplicações foliares de fósforo, na forma de Phi ou Pi, não foram suficientes para que as plantas de feijoeiro aumentassem os teores dessas frações nos tecidos foliares e superassem a deficiência de P, sob baixo suprimento de P ($1,5 \text{ mg L}^{-1}$), embora a aplicação

foliar de Pi tenha contribuído para elevar a produção de MSPA sob tal condição (Figura 1b).

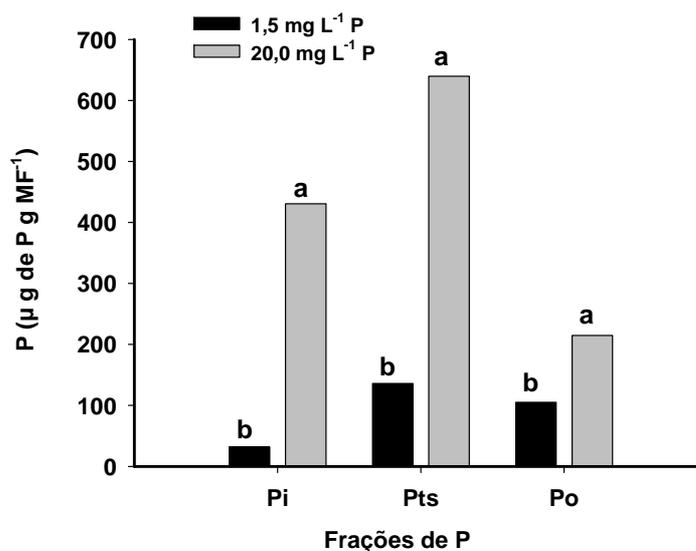


FIGURA 6 Teores de P inorgânico (Pi), P total (Pts) e P orgânico (Po) solúveis em ácido nos tecidos foliares de plantas de feijoeiro cultivadas em solução nutritiva com baixa (1,5 mg L⁻¹) e alta (20 mg L⁻¹) disponibilidade de fósforo (Pi). Médias seguidas de letras diferentes, dentro de cada fração de P, diferem entre si (Tukey, 5%).

A atividade da fosfatase ácida (AFA) foi influenciada significativamente pelas concentrações de P na solução nutritiva, pelos tratamentos de aplicação foliar, pela interação entre estes fatores e pela interação número de aplicações e tratamentos de aplicação foliar (Tabela 11A). Sob baixa disponibilidade de P, a AFA foi mais elevada com a aplicação foliar de KCl (Figura 7a). Por outro lado, em tal condição, a aplicação de Phi foliar reduziu a AFA. Sob suprimento adequado de P na solução nutritiva, não houve variação significativa na AFA com os tratamentos de aplicação foliar. Comparando-se os tratamentos com

baixa e adequada disponibilidade de P dentro de cada produto de aplicação foliar, verifica-se que, para os tratamentos com KCl ou Pi foliar, a maior AFA foi obtida com $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ de P na solução nutritiva, enquanto que, com a

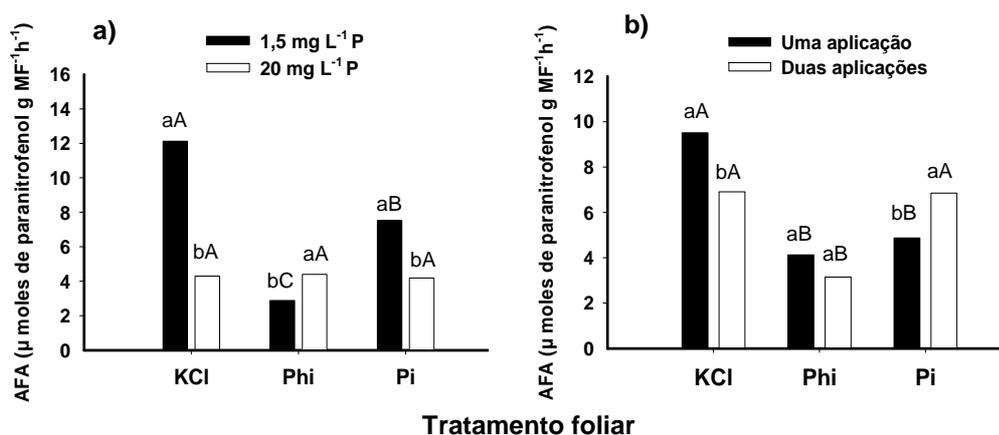


FIGURA 7 Atividade da fosfatase ácida (AFA) em plantas de feijoeiro, em função de tratamentos de aplicações foliares com cloreto de potássio (KCl), fosfito de potássio (Phi) e fosfato de potássio (Pi), concentrações de fosfato na solução nutritiva, baixa ($1,5 \text{ mg L}^{-1}$) e adequada (20 mg L^{-1}) (a) e do número de aplicações foliares (b). Médias seguidas de mesma letra minúscula, comparando as concentrações de P na solução ou número de aplicações para cada produto e maiúscula, comparando os produtos em cada concentração de P ou número de aplicações, não diferem entre si (Tukey, 5%).

aplicação foliar de Phi, observou-se efeito contrário. Para a interação produtos de aplicação foliar e números de aplicações, independentemente da concentração de P na solução, a aplicação de Phi reduziu a atividade desta enzima em relação aos tratamentos controle com uma ou duas aplicações e com aplicação de Pi foliar em aplicação única (Figura 7b). Comparando-se o número de aplicações, o

tratamento com KCl aplicado duas vezes favoreceu a AFA, enquanto nos demais tratamentos não houve variação significativa.

Com relação ao efeito dos diversos tratamentos sobre a AFA, é importante mencionar que, sob baixo suprimento de P, houve aumento na atividade dessa enzima, sendo uma resposta da planta para superar a deficiência de P (Duff et al., 1994; Sarapatika et al., 2004). Isso porque esta enzima atua na quebra de compostos orgânicos que contêm P para, então, convertê-lo em P inorgânico ou transferir P_i do vacúolo para o citoplasma (Ascencio, 1994). Entretanto, em condição de baixo suprimento de P, a adição de fosfito teve efeito inibitório sobre a AFA, fato também observado em outros trabalhos (Ticconi et al.; 2001; Singh et al., 2003). Cabe salientar, contudo, que, sob baixo suprimento de P, o feijoeiro tratado com Phi foliar apresentava sintomas visuais da toxidez de fosfito. Assim, as alterações no metabolismo geral da planta, diminuindo a síntese de proteínas, podem também ter contribuído para o decréscimo na AFA com a aplicação foliar de Phi.

O estudo de correlação linear simples entre as variáveis, realizado individualmente para cada número de aplicações dos tratamentos foliares (Tabela 1), confirma, em grande parte, os resultados discutidos anteriormente. A MSPA e a AF correlacionaram-se positivamente com os teores totais de P (obtido na digestão nítrico-perclórica) e com as frações solúveis de P. Contudo, o P_t e o P_i nas folhas diagnósticas do feijoeiro apresentaram relação positiva mais estreita com estas variáveis do que como P total. Em contraposição, AFA e a EUP correlacionaram-se negativamente com as demais variáveis avaliadas embora, na análise com duas aplicações, algumas correlações não tenham sido significativas. Em ambos os números de aplicações, a AFA correlacionou-se positivamente com a EUP, mostrando que a avaliação desta enzima, juntamente com as frações solúveis de P, pode ser útil no diagnóstico nutricional da nutrição fosfatada do feijoeiro quando a forma de P utilizada é o fosfato.

Como já discutido anteriormente, o fornecimento de 1,5 mg L⁻¹ de P na solução nutritiva do feijoeiro foi limitante ao seu crescimento, como uma consequência da deficiência de P diagnosticado pelos seus baixos teores totais e solúveis e, também, pelo aumento da atividade da fosfatase ácida nos tecidos foliares. Além disso, a alta eficiência de utilização de P sob baixa disponibilidade de P (1,5 mg L⁻¹) indica deficiência severa de P em relação ao seu adequado suprimento (20 mg L⁻¹). Assim, fica evidente que os efeitos negativos da aplicação foliar de fosfito sob baixo suprimento de fosfato foram devido à deficiência de fósforo na planta.

TABELA 1 Coeficientes de correlação linear simples entre produção de matéria seca da parte aérea (MSPA), teor de P na MSPA (P-MSPA), área foliar (AF), fósforo total solúvel em ácido (Pts), fósforo orgânico solúvel em ácido (Po), fósforo inorgânico (Pi), atividade *in vivo* da fosfatase ácida (AFA) e eficiência de utilização de P (EUP) com uma ou duas aplicações dos tratamentos foliares.

	MSPA	P- MSPA	AF	Pts	PI	Po	AFA
Uma aplicação							
MSPA	-	-	-	-	-	-	-
P- MSPA	0,91**	-	-	-	-	-	-
AF	0,97**	0,90**	-	-	-	-	-
Pts	0,97**	0,95**	0,96**	-	-	-	-
PI	0,97**	0,94**	0,95**	0,99**	-	-	-
Pó	0,87**	0,87**	0,87**	0,92**	0,86**	-	-
AFA	-0,47*	-0,47*	-0,44*	-0,44*	-0,43*	-0,42*	-
EUP	-0,70**	-0,87**	-0,73**	-0,80**	-0,77**	-0,82*	0,55**
Duas aplicações							
MSPA	-	-	-	-	-	-	-
P- MSPA	0,83**	-	-	-	-	-	-
AF	0,97**	0,88**	-	-	-	-	-
Pts	0,90**	0,91**	0,92**	-	-	-	-
PI	0,88**	0,88**	0,89**	0,96**	-	-	-
Pó	0,58**	0,64**	0,63**	0,69**	0,47*	-	-
AFA	-0,23ns	-0,43*	-0,30ns	-0,37*	-0,43*	-0,05ns	-
EUP	-0,40*	-0,73**	-0,48**	-0,58	-0,55**	-0,40*	0,76**

** , * e ns: significativo, a 1%, 5% e não significativo, respectivamente.

CONCLUSÕES

O fosfito ou o fosfato, aplicado via foliar, não são capazes de corrigir a deficiência de P nas plantas de feijoeiro cultivadas em solução nutritiva, com baixo suprimento de P.

Apenas sob baixo suprimento de P, independentemente do número de aplicações, a aplicação foliar de fosfito, em comparação com o fosfato, tem efeito depressivo sobre o crescimento das plantas de feijoeiro.

A aplicação foliar de fosfito ou de fosfato pouco afeta os teores totais de P, tanto nas raízes quanto na parte aérea, especialmente sob baixo suprimento de P, assim como não proporciona modificações nos teores das frações solúveis de P nas folhas, em condições de baixo ou adequado suprimento desse nutriente.

Mecanismos de superação de deficiência de P, como o aumento da relação raiz:parte aérea e a atividade da fosfatase ácida, são afetados negativamente pela aplicação foliar de fosfito.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FURLANI, A.M.C.; USBERTI FILHO, J.A. Capim-colonião: eficiência na absorção e na utilização de fósforo em solução nutritiva. **Bragantia**, v. 49, p. 413-423, 1990.

ASCENCIO, J. Acid phosphatase as diagnostic tool. **Communication of Soil Science and Plant Nutrition.**, v. 25, p.1553-1564, 1994.

BEZUIDENHOT, J.J.; DARVAS, J.M.; KOTZE, J.M. The dynamics and distribution of phosphite in avocado trees treated with Phosetyl-Al. **South African Growers Association Yearbook**, v.10, p.101-103, 1987.

CARADUS, J.R.; KENNEDY, L.D. DUNN, A. Genetic variation for the ratio of inorganic to total phosphorus in white clover leaves. **Journal of Plant Nutrition**, v. 21, p.2265-2272, 1998.

CARSWELL, C.; GRANT, B.R.; THEODOROU, M.E.; HARRIS, J.; NIERE, J.O.; PLAXTON, W.C. The fungicide phosphonate disrupts the phosphate-starvation response in *Brassica nigra* seedlings. **Plant Physiol**, v.110, p.105-110, 1996.

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

DUFF, S.M.G.; SARAH, G.; PLAXTON, W.C. The role of phosphatase in plant phosphorus metabolism. **Physiologia Plantarum**, v. 90, p.791-800, 1994.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. **Nutrição mineral de plantas: Princípios e Perspectivas**. Londrina: Editora Planta, 2006. 169p.

FAQUIN, V. **Diagnose do estado nutricional das plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2002. 76 p.

FENN, M.E., COFFEY, M.D. Quantification of Phosphonate and Ethyl Phosphonate in Tobacco and Tomato Tissues and Significance for the Mode of Action of Two Phosphonate Fungicides. **Phytopathology**, v.79, p.76-82, 1989.

FERNADES, L.A.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N. Frações de fósforo e atividade da fosfatase ácida em plantas de feijoeiro cultivadas em solos de várzeas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.561-571, 2000.

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

FÖRSTER, H.; ADASKAVEG, J.E.; KIM, D.H.; STANGHELLIN, M.E. Effect of Phosphite on Tomato and Pepper Plants and on Susceptibility of Pepper to *Phytophthora* Root and Crown Rot in Hydroponic Culture. **Plant Disease**, v.82, p. 1165-1170, 1998.

GRANT, B.R.; GRANT, J.; HARRIS, J. Inhibition of growth of *Phytophthora infestans* by phosphate and phosphonate in defined media. **Experimental Mycology**, v.16, p.240-244, 1992.

GRIFFITH, J.M., COFFEY, M.D., GRANT, B.R. Phosphonate Inhibition as a Function of Phosphate Concentration in Isolates of *Phytophthora palmivora*. **Journal of General Microbiology**, v. 139, p.2109-2116, 1993.

GUEST, D.; GRANT, B.R. The complex action of phosphonates as antifungal agents. **Biology Review**, v. 66,159-187, 1991.

HOGUE, E.; WILCOX, G.E.; CANTLIFE, D.J. Effect of soil phosphorus levels on phosphate fractions in tomato leaves. **Journal American Society for Horticultural Science**, v. 95,174-176, 1970.

JACKSON. T. J.; BURGESS. T.; COLQUHOUN. I.; HARDY. G.E.S.J. Action of the fungicide phosphite on *Eucalyptus marginata* inoculated with *Phytophthora cinnamomi*. **Plant Pathology**, v. 49, p.147-154. 2000.

JOHNSON, D.; INGLIS, D.A.; MILLER, J.S. Control of Potato Tuber Rots Caused by Oomycetes with Foliar Applications of Phosphorous Acid. **Plant Disease**, v.88,1153-1159, 2004.

LEE, T-M.; TSAI, P-F. The effects of phosphate on phosphate starvation responses of *Ulva lactuca* (*Ulvaes. chlorophyta*). **Journal of Phycology**, v. 41, p.975-982, 2005.

LINCH, J. LÄUCHLI, A.; EPSTEIN, E. Vegetative growth of common bean in response to phosphorus nutrition. **Crop Science**, v. 31, p.380-387, 1991.

LOVATT, C.J.; MIKKELSEN. R.L. Phosphite Fertilizers: What Are They? Can You Use Them? What Can They Do? **Better Crops**. v. 90, 1-11, 2006.

LUCAS, R.E.; WARNCKE. D.D.; THORPE. V.A. Phosphite injury to corn. **Agronomy Journal**, v. 71, p.1063-1065, 1979.

MACHADO, C.T.T.; FURLANI, A.M.C.; MACHADO, A.T. Índices de eficiência de variedades locais e melhoradas de milho ao fósforo. **Bragantia**, v. 6,225-238, 2001.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

McDONALD, A.E.; GRANT, B.R.; PLAXTON, W.C. Phosphite (Phosphorous acid): Its relevance in the environment and agriculture and influence on plant phosphate starvation response. **Journal of Plant Nutrition**, v.24,1505-1519, 2001.

MENGEL, K.; KIRBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 5ed. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. 849p.

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

OUIMETTE, D.G. COFFEY M.D. Phosphonate Levels in Avocado (*Persea americana*) Seedlings and Soil Following Treatment with Fosethyl-Al or Potassium Phosphonate. **Plant Disease**, v.73, 212-215, 1989.

PILBEAM, R. **Effects of phosphite on disease development and histological responses in *Eucalyptus marginata* infected with *Phytophthora cinnamomi***. 2003. 175f. Tese (PhD). Murdoch University.

RUIZ, H.A.; HERKEHOFF FILHO, H.E.; BUNICENHA, J.M. Proporções e concentrações de macronutrientes na formulação de soluções nutritivas para culturas de interesse agrônomo. V. Feijão. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 18, Guarapari, 1988. **Resumos...** Vitória, SEAG-ES/EMCAPA/EMATER-ES/SBCS, 1988.

SALA, F.C.; COSTA, C.P.; ECHER, M.M.E.; MARTINS, M.C.; BLAT, S.F. Phosphite effect on hot and sweet pepper reaction to *Phytophthora capsici*. **Scientia Agrícola**, v. 61, p.492-495, 2004.

SANTOS, M.G. **Aplicação foliar de fósforo, metabolismo fotossintético e produtividade do feijoeiro comum sob déficit hídrico**. 2005. 73f. Tese. (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP.

SANTOS, M.G.; RIBEIRO, R.V.; TEIXEIRA, M.G.; OLIVEIRA, R.F.; PIMENTEL, C. Foliar phosphorus supply and CO₂ assimilation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under water deficit. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, p.407-411, 2006.

SARAPATIKA, B.; DUDOVÁ, L.; KRŠKOVÁ, M. Effect of pH and phosphate supply on acid phosphatase activity in cereal roots. **Biologia Bratislava**, v. 59, p.127-131, 2004.

SCHROETTER, S.; ANGELES-WEDLER, D.; KREUZIG, R.; SCHNUG, E. Effects of phosphite on phosphorus supply and growth of corn (*Zea mays*). **Landbauforschung Volkenrodxe, Fal Agricultural Research**, v. 56, p.87-99, 2006.

SHEARER, B.L.; FAIRMAN, R.G. A stem injection of phosphate protects *Banksia* species and *Eucalytus marginata* from *Phytophthora cinnamomi* for at least four years. **Australian Plant Pathology**, v.36, p.78-86, 2007.

SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, v.4, p.289-302, 1981.

SILVA, F.C.; BASSO, L.C. Avaliação da atividade in vivo da fosfatase ácida da folha na diagnose da nutrição fosfórica em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.3, p.371-375, 1993.

SINGH, V.K.; WOOD, S.M.; KNOWLES, V.L.; PLAXTON, W.C. Phosphite accelerates programmed cell death in phosphate-starved oilseed rape (*Brassica napus*) suspension cell cultures. **Planta**, v. 218, 233-239, 2003.

STEMANN, C.; GRANT, B.R. Inhibition of enzymes of glycolytic pathway and hexose monophosphate bypass by phosphonate. **Pesticide Biochemical Physiology**, v. 67, p.23-24, 2000.

THAO, H.T.B.; YAMAKAWA, T.; SHIBATA, K.; SARR, P.S.; MYINT, A.K. Growth response of komatsuma (*Brassica rapa* var. peruviridis) to root and foliar applications of phosphate. **Plant and Soil**, v. 308, p.1-10, 2008.

TICCONI, C.A.; DELATORRE, C.A.; ABEL, S. Attenuation of phosphate starvation responses by phosphite in *Arabidopsis*. **Plant Physiology**, v.127, p. 963-972, 2001.

VARADARAJAN, D.K.; KARTHIKEYAN, A.S.; MATILDA, P.D.; RAGHOTHAMA, K.G. Phosphite, an analog of phosphate, suppresses the coordinated expression of genes under phosphate starvation. **Plant Physiology**, v.129, p.1- 9, 2002.

VAVRINA, C.S. Soil and foliar application of Nutri-Phite (PO₃) on pepper under drip irrigation in SW Florida. **Institute of Food and Agricultural Sciences**. University of Florida, 1998.

WHITE, A.K.; METCALF, W.W. Microbial metabolism of reduced phosphorus compounds. **Annual Review of Microbiology**, v. 61, p.379-400, 2007.

WIENEKE, J. Phosphorus efficiency and phosphorus remobilization in two sorghum [*Sorghum bicolor* L. (Moench) cultivars]. **Plant and Soil**, v.123, p.139-145, 1990.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de produtos à base de fosfitos na agricultura deve se prolongar por muito tempo, haja vista seus efeitos benéficos sobre as plantas no controle de diversos fungos do gênero *Phytophthora*. Sobre este aspecto, as pesquisas têm sido conclusivas. Contudo, a utilização indiscriminada de fosfitos, especialmente quando recomendados para fertilização foliar como fonte de P, pode trazer várias implicações negativas sobre as culturas, sem proporcionar os efeitos desejados. Neste trabalho ficou evidente que, para que os fosfitos possam desempenhar seu efeito controlador de patógenos, sem ocasionar redução no crescimento das plantas, é necessário que elas estejam adequadamente nutridas em P.

Os efeitos dos fosfitos sobre a nutrição fosfatada, em especial ao metabolismo do P, em plantas superiores, ainda é pouco conhecido, principalmente em culturas de importância agrícola. No Brasil em especial, não há relatos de trabalhos dessa natureza. Além disso, seria interessante o desenvolvimento de pesquisas que envolvessem também a resposta de patógenos de plantas, principalmente em relação ao seu efeito eliciador no estímulo à síntese de compostos do metabolismo secundário das plantas.

Finalmente, destaca-se a necessidade da análise de fosfitos solúveis nos tecidos das plantas tratadas com este íon, para saber estas estariam utilizando-os como fonte de fósforo. Além disso, tais análises seriam imprescindíveis nos estudos de cinética de absorção de fosfitos. No Brasil não existem, ainda, metodologias específicas para tais determinações. Embora técnicas, como a cromatografia iônica e a voltametria, possam ser utilizadas com sucesso, há a necessidade de adaptá-las para tal finalidade.

ANEXOS

TABELA 1A Quadrados médios da análise de variância, relacionados à matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca de raízes (MSR), teores de P na matéria seca da parte aérea (P-MSPA) e na matéria seca de raízes (P-MSR), obtidos no experimento 1 do capítulo I.

Fontes de variação	Quadrados médios				
	G.L	MSPA	MSR	P-MSPA	P-MSR
Forma de P (A)	1	10787,15**	414,82**	121,68**	213,63**
Concentrações (C)	4	542,38**	4,08**	762,62**	425,37**
F x C	4	574,59**	8,06**	30,03**	112,94**
Resíduo	30	5,76	0,26	0,54	0,63
CV (%)		13,55	13,86	8,33	11,50

** significativo, a 1% pelo teste de F.

TABELA 2A Quadrados médios da análise de variância, relacionados ao acúmulo de P na matéria seca da parte aérea (Ac P-MSPA), na matéria seca de raízes (AcP-MSR), translocação (Trasl P) e eficiência de utilização de P (EUP), obtidos no experimento 1 do capítulo I.

Fontes de variação	Quadrados médios				
	G.L	Ac P-MSPA	Ac P-MSR	Trasl P	EUP
Forma de P (A)	1	26.887,09**	8.194,99**	266,92**	61,37**
Concentrações (C)	4	242.398,34**	54.498,84**	3705,43**	801,29**
F x C	4	22.449,57**	8.170,35**	164,23**	64,84**
Resíduo	30	628,64	60,96	6,70	1,40
CV (%)		26,74	20,41	3,20	24,81

** significativo, a 1% , pelo teste de F.

TABELA 3A Quadrados médios da análise de variância, relacionados aos teores de fenóis totais e lignina, obtidos no experimento 1 do capítulo I.

Fontes de variação	Quadrados médios		
	G.L	Teores de fenóis	Teores de lignina
Forma de P (A)	1	6,08**	266,32**
Concentrações (C)	4	0,74*	51,22ns
F x C	4	0,55*	59,61ns
Resíduo	30	0,21	25,49
CV (%)		14,74	25,70

** , * e ns: significativo, a 1% , 5%, e não significativo, pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 4A Quadrados médios da análise de variância, relacionados à matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca de raízes (MSR), teores de P na matéria seca da parte aérea (P-MSPA) e na matéria seca de raízes (P-MSR), obtidos no experimento do capítulo I.

Fontes de variação	Quadrados médios				
	G.L	MSPA	MSR	P-MSPA	P-MSR
Porcentagem de Phi	4	1197,69**	26,57**	10,69**	45,07**
Resíduo	15	1,99	0,61	0,37	2,54
CV (%)		5,26	17,79	11,59	14,24

** significativo, a 1% pelo teste de F.

TABELA 5A Quadrados médios da análise de variância, relacionados ao acúmulo de P na matéria seca da parte aérea (AcP-MSPA), na matéria seca de raízes (AcP-MSR), translocação (Trasl P) e eficiência de utilização de P (EUP), obtidos no experimento 2 do capítulo I.

Fontes de variação	Quadrados médios				
	G.L	Ac P-MSPA	Ac P-MSR	Trasl P	EUP
Porcentagem de Phi	4	0,05**	0,005**	483,69**	30,61**
Resíduo	15	0,00	0,000	24,65	0,19
CV (%)		15,15	22,91	6,90	8,83

** significativo, a 1%, pelo teste de F.

TABELA 6A Quadrados médios da análise de variância, relacionados aos teores solúveis de fósforo inorgânico (Pi), fósforo total (Pts) e fósforo orgânico (Po), obtidos no experimento 2 do capítulo I.

Fontes de variação	Quadrados médios				
	G.L	Pi	Pts	Po	AFA
Percentagem de Phi	4	0,196**	0,022ns	0,117**	68,067**
Resíduo	15	0,013	0,024	0,006	3,698
CV (%)		32,97	22,77	24,18	5,14

** e ns: significativo, a 1%, e não significativo, pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 7A Quadrados médios da análise de variância, relacionados aos teores de fenóis totais e lignina obtidos no experimento 2 do capítulo I.

Fontes de variação	Quadrados médios		
	G.L	Teores de fenóis	Teores de lignina
Percentagem de Phi	4	0,29ns	117,80**
Resíduo	15	0,19	5,87
CV (%)		15,40	12,54

** e ns: significativo, a 1%, e não significativo, pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 8A Quadrados médios da análise de variância, relacionados à matéria seca da parte aérea (MSPA), matéria seca de raízes (MSR), área foliar (AF) e relação raiz:parte aérea (R/PA), obtidos no experimento 3 do capítulo II.

Fontes de variação	Quadrados médios				
	G.L	MSPA	MSR	AF	R/PA
Concentração de P (C)	1	7.766,83**	15,25**	534.734.252,08**	0,445**
Tratamento foliar (F)	2	31,42*	9,22**	896899,39*	0,006**
Número de aplicações (N)	1	83,90**	3,59*	116821,33ns	0,000ns
C x F	2	13,38ns	1,40ns	21041,02ns	0,004**
C x N	1	17,44ns	0,14ns	1043710,08ns	0,001ns
F x N	2	9,07ns	0,55ns	1228027,52ns	0,000ns
F x F x N	2	17,67ns	1,54ns	562141,39ns	0,001ns
Resíduo	36	9,28	0,53	1096037,20	0,000
CV (%)		11,27	13,09	18,08	9,88

** , * e ns: significativo, a 1% e 5% e não significativo, pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 9 A Quadrados médios da análise de variância, relacionados aos teores de P na matéria seca da parte aérea (P-MSPA) e nas raízes (P-MSR) e ao acúmulo de P na matéria na MSPA (AcP-MSPA) e nas raízes (AcP-MSR), obtidos no experimento 3 do capítulo II.

Fontes de variação	Quadrados médios				
	G.L	P-MSPA	P-MSR	AcP-MSPA	AcP-MSR
Concentração de P (C)	1	252,47**	349,64**	607.604,63**	13.978,35**
Tratamento foliar (F)	2	0,97ns	2,08ns	353,21ns	12,88ns
Número de aplicações (N)	1	0,68ns	3,31ns	623,84ns	18,56ns
C x F	2	0,83ns	1,15ns	116,03ns	12,67ns
C x N	1	0,12ns	3,27ns	3259,14ns	53,82ns
F x N	2	0,79ns	1,59ns	2.176,27*	60,74ns
F x F x N	2	3,52**	0,98ns	2.589,10*	20,52ns
Resíduo	36	0,53	1,63	633,11ns	59,44
CV (%)		18,00	30,74	18,41	31,66

** , * e ns: significativo, a 1% e 5% e não significativo, pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 10 A Quadrados médios da análise de variância, relacionados à atividade da fosfatase ácida (AFA) e eficiência de utilização de P (EUP), obtidos no experimento 3 do capítulo II.

Fontes de variação	Quadrados médios		
	G.L	AFA	EUP
Concentração de P (C)	1	124,11**	282,39**
Tratamento foliar (F)	2	83,67**	61,76**
Número de aplicações (N)	1	3,53ns	18,42*
C x F	2	87,23**	41,18**
C x N	1	8,52ns	0,04ns
F x N	2	21,59**	3,37ns
F x F x N	2	12,10ns	22,79**
Resíduo	36	3,81	2,57
CV (%)		5,90	16,31

** , * e ns: significativo, a 1% , 5% e não significativo, pelo teste de F, respectivamente.

TABELA 11 A Quadrados médios da análise de variância, relacionados às frações solúveis de fósforo inorgânico (Pi), fósforo total (Pts) e fósforo orgânico (Po), obtidos no experimento 3 do capítulo II.

Fontes de variação	Quadrados médios			
	G.L	Pi	Pts	Po
Concentração de P (C)	1	1.906.490,65**	3.032.228,09**	130.191,87**
Tratamento foliar (F)	2	116,67ns	3.069,86ns	3.845,82ns
Número de aplicações (N)	1	3.582,47ns	1.877,70ns	443,62ns
C x F	2	57,36ns	4.198,42ns	4.596,86ns
C x N	1	6.282,78ns	11.023,14ns	916,11ns
F x N	2	213,46ns	2.796,53ns	1.695,10ns
F x F x N	2	8,40ns	387,62 ns	431,24ns
Resíduo	36	4.194,82	3.969,10ns	2.328,25
CV (%)		28,03	16,22	27,17

** e ns: significativo, a 1% e não significativo, pelo teste de F, respectivamente.