



SARA DANTAS ROSA

**INTERAÇÃO ÁCIDOS
HÚMICOS-FERTILIZANTES FOSFATADOS:
DISPONIBILIDADE DE P E CRESCIMENTO DO
TRIGO**

LAVRAS – MG

2015

SARA DANTAS ROSA

**INTERAÇÃO ÁCIDOS
HÚMICOS-FERTILIZANTES FOSFATADOS: DISPONIBILIDADE DE P
E CRESCIMENTO DO TRIGO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração Fertilidade e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Carlos Alberto Silva

LAVRAS – MG

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Rosa, Sara Dantas.

Interação ácidos húmicos - fertilizantes fosfatados:
disponibilidade de P e crescimento do trigo / Sara Dantas Rosa. –
Lavras : UFLA, 2015.

61 p.

Dissertação (mestrado acadêmico)—Universidade Federal de
Lavras, 2015.

Orientador(a): Carlos Alberto Silva.

Bibliografia.

1. Substâncias húmicas. 2. Extratores de P. 3. Matéria orgânica.
4. Fixação de P. 5. Fosfato de Bayóvar. I. Universidade Federal de
Lavras. II. Título.

SARA DANTAS ROSA

**INTERAÇÃO ÁCIDOS
HÚMICOS-FERTILIZANTES FOSFATADOS: DISPONIBILIDADE DE P
E CRESCIMENTO DO TRIGO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração Fertilidade e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 26 de março de 2015.

Dr. José Maria Lima UFLA

Dr. Luciano Pasqualoto Canellas UENF

Dr. Carlos Alberto Silva
Orientador

LAVRAS – MG

2015

A Francisca Dantas, minha mãe, pelo grande exemplo de vida, por todo seu esforço e dedicação para que eu seguisse meus sonhos mesmo diante das dificuldades, e por estar sempre ao meu lado mesmo distante.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas oportunidades e conquistas alcançadas durante a vida e por minha família.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao programa de pós-graduação do Departamento de Ciência do Solo, pela oportunidade concedida para realização do mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processo 461935/2014-7) e à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), pelo financiamento das ações de pesquisa.

Ao professor orientador Carlos Alberto Silva pela paciência, confiança, orientação, dedicação, ensinamentos e compreensão mediante contratempos.

Aos meus pais. Minha mãe Francisca, pela paciência, amor, exemplo de vida, por estar sempre ao meu lado e sempre escutar as reclamações, tristeza e alegrias da vida acadêmica. Ao meu pai Pedro por todo carinho.

A minha família. Minha irmã Sabrina, por estar sempre ao meu lado, por toda preocupação, apoio, e que a distância despertou o amor mais lindo e sincero de irmãs. A família Alencar Dantas por me dar razão de seguir lutando pelos meus sonhos e por me ensinar que o maior tesouro da vida é a família.

Aos amigos da UFLA Gabriel, Eduardo, Guilherme, Sérgio, Anita, Aryane, Raphael, Zélio e Damy, os quais, por motivos especiais e particulares, me deram motivos de não desistir dessa etapa da vida, que sempre secaram minhas lágrimas, emprestaram seus ouvidos para minhas reclamações, me proporcionaram momentos felizes e que me deram uma nova família em Lavras. Em especial Rimena, Samara e Sabrina, as três meninas do meu coração que as palavras não conseguem demonstrar a gratidão por todo apoio e carinho.

Rimena, por todos os conselhos, momentos de diversão, apoio, à amizade que nos fez enxergar que são as coisas simples da vida que nos traz felicidade. Sabrina e Samara, pelo trio “SSS”, pelos dias de estudos com muito aprendizado e boas gargalhadas, pela amizade, carinho e preocupação. E a mais um “S” que me acolheu de forma especial nos últimos meses, Soraya.

A equipe do Laboratório de Estudo da Matéria Orgânica do Solo: Laura, ao Bruno Moschini pelo companheirismo na casa de vegetação, Davi por me transmitir os conhecimentos adquiridos e me auxiliar na montagem dos experimentos, e em especial ao Henrique pela parceria nos trabalhos, paciência e dedicação para me ensinar.

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo, em especial, Dirce, Regina, Eloísa, Cristina, Gean, Pezão e Roberto.

E aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho e na minha vida acadêmica.

Muito obrigada!

“O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de
seus sonhos.”

Eleanor Roosevelt

RESUMO

A adição de ácidos húmicos (AH) no solo pode reduzir a adsorção e a precipitação de fósforo (P), bem como solubiliza-lo de rochas fosfatadas; como consequência, pode assegurar maior produção de massa seca, maior produtividade e maior desenvolvimento radicular. Objetivou-se: avaliar os efeitos da interação de concentrações crescente de AH com diferentes fontes de P sobre a quantidade de P disponível em solos de diferentes texturas. No primeiro experimento, adotou-se o esquema fatorial 3 (fontes de P) x 5 (concentrações de C-AH), com três repetições. Foram utilizadas amostras de solo argiloso e arenoso, incubadas por 60 dias, com concentrações de 0, 5, 10, 50 e 100 mg kg⁻¹ de C-ácidos húmicos e 400 mg kg⁻¹ de P, que foi suprido pelo superfosfato simples (SS), fosfato de Araxá (FA) e fosfato de Bayóvar (BY). O P extraível foi determinado com os extratores Bray-1, Mehlich-1, Mehlich-3 e a resina. No segundo experimento, adotou-se esquema fatorial 2 (fontes de P) x 2 (doses de P) x 5 (concentrações de C-AH) com três repetições. O experimento foi conduzido em casa de vegetação com amostras de solo de textura média e os tratamentos consistiram nas concentrações de 0, 5, 10, 50 e 100 mg kg⁻¹ de C-AH, 100 e 400 mg kg⁻¹ de P, suprido por SS e FA. Foram semeadas sementes de trigo, que foi cultivado por 43 dias. Determinaram-se a massa seca da parte aérea (MSPA), raiz (MSR) e total (MSPA+MSR), conteúdo de P na parte aérea do trigo e P disponível em solo com o extrator resina. No solo argiloso, a adição de AH não aumentou os teores de P extraído, entretanto, no solo arenoso, houve aumento dos teores de P extraído quando a fonte é SS, com o uso de C-AH. A resina foi o extrator que melhor refletiu os teores de P extraídos dos solos em função dos tratamentos. Houve uma interação positiva entre as concentrações de C-AH e FA e efeito positivo dessas combinações na MSPA, MSR, MST e conteúdo de P parte aérea. Independentemente da fonte de P utilizada, o AH estimula o crescimento radicular. O efeito das concentrações de C-AH sobre as variáveis de solo e de trigo estudadas depende do adubo fosfatado, da dose de P aplicada, do extrator utilizado e da textura do solo.

Palavras-chave: Substâncias húmicas. Extratores de P. Matéria Orgânica. Fixação de P. Fosfato de Bayóvar. Fosfato de Araxá. Complexos-organo-metálicos.

ABSTRACT

The addition of humic acid (HA) in the soil may reduce the adsorption and precipitation of phosphorus (P) and solubilize it from phosphate rocks; as a result, may ensure greater dry mass production, higher productivity and greater root development. This study aimed to: assess the effects of the interaction of increasing concentrations of HA with different P sources on the amount of available P in soils of different textures. In the first experiment, we adopted a factorial scheme of 3 (P sources) x 5 (C-AH concentrations), with three replications. Clayey and sandy soil samples were used and incubated for 60 days with variables concentrations of C-AH: 0, 5, 10, 50 and 100 mg kg⁻¹ C-humic acids and 400 mg kg⁻¹ P, which was supplied by single superphosphate (SS), Araxá phosphate (FA) and Bayóvar phosphate (BY). Extractable P was determined by Bray-1, Mehlich-1, Mehlich-3 and resin soil tests. In the second experiment, it was adopted a factorial scheme of 2 (P sources) x 2 (P rates) x 5 (C-AH concentrations) with three replications. The experiment was conducted in greenhouse conditions with soil samples of medium texture. The treatments were combinations of the following concentrations of C-AH: 0, 5, 10, 50 and 100 mg kg⁻¹ with 100 and 400 mg kg⁻¹ P supplied by the SS and FA. Wheat plants were grown during 43 days. We determined the dry weight of shoot (MSPA), root (MSR) and total (MSPA + MSR) wheat biomass, P content in shoots of wheat plants and available P in soil extracted by the resin soil test. In the clayey soil, the addition of AH did not increase the extracted P concentrations, however, in the sandy soil, there was an increase of extracted phosphorus content when the source of P was the SS, as C-AH rate increased. The resin was the soil test that best reflected the P available in soil for plants. There was a positive interaction between the concentrations of C-HA and FA, since it was observed an increase in of MSPA, MSR, MST and wheat shoot P content as the C-AH increased. Regardless of the source of P tested, HA stimulates the root growth. The effect of C-HA concentrations on plant and soil attributes depends on the phosphate source, the P rate, soil test and the texture of soil cultivated.

Keywords: humic substances. Soil P tests. Organic Matter. P fixation. Bayóvar phosphate. Brazilian Araxá phosphate. Organic-metalic complexes.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	12
1 INTRODUÇÃO	13
1.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS	17
REFERÊNCIAS	18
SEGUNDA PARTE – ARTIGOS	22
2. ARTIGO 1 INTERAÇÃO ÁCIDOS HÚMICOS-FERTILIZANTES FOSFATADOS E A EXTRAÇÃO DE P EM SOLOS COM TEXTURAS CONTRASTANTES	23
2.1 RESUMO	23
2.2 SUMMARY	24
2.3 INTRODUÇÃO	25
2.4 MATERIAL E MÉTODOS	27
2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
2.5.1 Efeito dos ácidos húmicos	29
2.5.2 Fontes de P	35
2.5.3 Extratores de fósforo	36
2.6 CONCLUSÕES	38
2.7 AGRADECIMENTOS	39
2.8 LITERATURA CITADA	39
3 ARTIGO 2 NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO DE TRIGO: EFEITO DA INTERAÇÃO ÁCIDOS HÚMICOS-FERTILIZANTES FOSFATADOS	43
3.1 RESUMO	43
3.3 INTRODUÇÃO	44
3.4 MATERIAL E MÉTODOS	46
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
3.5.1 Produção de massa seca	49
3.5.2 Conteúdo de P	54

3.5.3 P disponível.....	55
3.5.4 Estudo de correlação.....	56
3.6 CONCLUSÕES.....	57
3.7 LITERATURA CITADA.....	57

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é exigido pelas plantas em pequenas quantidades, porém, em virtude da elevada acidez, baixa CTC e alta capacidade de reter ânions nos colóides ligados à argila de grande parte dos solos brasileiros, grandes quantidades de adubos fosfatados são aplicadas para atender a demanda das culturas. A adsorção de P aos óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos de Fe e Al, em princípio, não restringe a disponibilidade às plantas, já que representa o P-lábil. Com o passar do tempo e presença do P no solo, o P passa a uma forma não lábil, com estabelecimento de ligações coordenadas simples com a superfície adsorvente e troca de ligantes (NOVAIS et al., 2007). Com isso, os fosfatos lábeis vão adquirindo constituição mineralógica mais estável e de solubilização mais difícil, tornando-se um problema, uma vez que há redução drástica na disponibilidade de P para as plantas (NOVAIS et al., 2007; RAIJ 2011). Assim, uma vez liberado na solução, além de ser adsorvido aos óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos de Fe e Al, o P tende a precipitar com Al, Fe ou Ca (NOVAIS & SMYTH, 1999; NOVAIS et al., 2007; RAIJ, 2011), o que, em muito, contribui para seu baixo aproveitamento nas lavouras em solos brasileiros.

Diante do alto grau de interação do P com os colóides inorgânicos dos solos, principalmente nos mais argilosos, que adsorvem mais P, a eficiência da adubação fosfatada tem sido um ponto crítico na adubação das lavouras brasileiras. Para atender a produção agrícola, é necessário suprir primeiramente a fixação de P do solo para, posteriormente, garantir P disponível para os cultivos. Para isso, são necessárias aplicações de grandes quantidades de adubo fosfatado, gerando alto custo na adubação das lavouras (NOVAIS & SMYTH, 1999; SOUSA & LOBATO, 2004). Além disso, o Brasil é dependente da importação de fertilizante fosfatados, tendo em vista que, em 2012, cerca de 54% do P consumido foi importado (IFA, 2014), de modo que uma demanda recorrente da

agricultura nacional é o aumento da eficiência de uso do fertilizante fosfatado aplicado nas áreas agrícolas.

Há evidências científicas de que a matéria orgânica aumenta a disponibilidade de P e que a adsorção de fósforo aumenta em função do aumento da profundidade do solo, demonstrando forte correlação com a redução em profundidade dos teores de matéria orgânica do solo, evidenciando que práticas de manejo que visem manter ou incrementar os níveis de matéria orgânica poderão resultar em maior aproveitamento de fósforo pelas plantas (ALMEIDA et al., 2003).

Assim, em virtude das características da maioria dos solos brasileiros, buscaram-se alternativas para diminuir o efeito da adsorção e posterior fixação do fósforo, a fim de se aumentar a eficiência da adubação fosfatada e, conseqüentemente, de reduzir os custos na produção agrícola. Uma alternativa para redução da adsorção de P, com aumento de sua eficiência de uso nos solos, é a adoção de sistemas de manejo que incorporem matéria orgânica (MO) ao solo (PEREIRA et al., 2010). As frações da MO formam complexos com Fe e Al em diversas faixas de pH, impedindo a precipitação do fósforo, ou até mesmo atuando na formação de complexos P-organo-metálicos entre P + ácidos húmicos + Fe ou Al, que aumenta a mobilidade de P no solo e que, posteriormente, podem ser dissociados (WEIR & SOPER 1963; SINHA et al., 1971).

Outra alternativa para aumentar a disponibilidade de P às plantas é a diversificação de fontes de adubos fosfatados. No mercado de fertilizantes fosfatados, os mais utilizados são os de alta eficiência agrônômica. O uso de fontes de P de alta solubilidade, como o superfosfato simples pode implicar em fixação elevada de P, devido à alta solubilidade no solo e liberação imediata do nutriente (KORNDÖRFER et al., 1999; SOUSA & LOBATO 2004; SILVA et al., 2009). Já a dissolução lenta dos fosfatos naturais (FNs) pode reduzir a adsorção do fósforo no solo, uma vez que este é liberado aos poucos para as

plantas, contudo as quantidades liberadas de P podem não ser suficientes para atender em tempo hábil a demanda das culturas, principalmente as de ciclo curto (KPOMBLEKOU-A & TABATABAI, 2003).

Os FNs, em solos mais ricos em MO, ou com a presença de ligantes orgânicos, como os ácidos húmicos (AH), podem ter a sua solubilização otimizada, por meio da complexação de AH com os CaCO_3 livres presentes nas rochas fosfáticas e posterior liberação do P (MISHARA et al., 1983). A aplicação de ácidos húmicos com rochas fosfatadas potencializa a solubilização das rochas fosfatadas, em alguns casos, podendo ser alternativa para aumentar a eficiência agrônômica dos FNs (MISHARA et al., 1983; SINGH & AMBERGER, 1997).

Alternativas vêm sendo usadas para aumentar a eficiência da adubação fosfatada e maior aproveitamento de P pelas as plantas, sendo uma delas o uso de ácidos húmicos, visando reduzir a adsorção de P (ERRO et al., 2010; URRUTIA et al., 2013). Os AH podem aumentar a disponibilidade de P no solo por diversas vias: competição com os íons fosfatos por sítios de adsorção no solo, bloqueando-os; complexação de Fe e Al, evitando a precipitação do fosfato; e no desenvolvimento de campo eletrostático negativo repulsivo em torno dos sítios de adsorção de P (ANDRADE et al., 2003; HUA et al., 2008; FU et al., 2013; GIOVANNINI et al., 2013; PERASSI & BORGNINO, 2014).

Além de atuar na disponibilização de P e na dissolução de rochas fosfáticas, os ácidos húmicos são capazes de promover o crescimento de plantas na parte aérea e radicular, induzindo o aumento do número de sítios de mitose e a atividade da H^+ -ATPase de membrana plasmática em células (MALIK & AZAM, 1984; WANG et al., 1995; CANELLAS et al., 2002; CANELLAS et al., 2009; BUSATO et al., 2010; RIMA et al., 2011; SILVA et al., 2011). O maior crescimento radicular proporciona maior contato planta-solo, favorecendo a absorção de nutrientes (ROSE et al., 2014).

Existe, ainda, a demanda de se estudar o comportamento dos ácidos húmicos e a interação desses com as fontes de adubos fosfatados, e de protocolos analíticos que melhor poderão antever o P disponível em solo, quando há interação de concentrações de ácidos húmicos com as fontes de P.

A hipótese que justifica a investigação nos moldes de tratamentos e seus níveis que aqui são testados é a de que os AH aumentam a disponibilidade de P no solo pelos seguintes processos: a) competição dos sítios de adsorção e precipitação de P, b) interação com a rocha fosfatada, c) presença de complexos solúveis e d) interação com os microrganismos, além de que os AH são capazes de promover nas plantas maior crescimento na parte aérea e na raiz.

Assim, o presente trabalho está dividido em dois capítulos: “Interação ácidos húmicos-fertilizantes fosfatados e a extração de P em solos com textura contrastantes” e “Nutrição e crescimento de trigo: efeito da interação ácidos húmicos-fertilizantes fosfatados.

Diante do exposto e da necessidade de aumentar a eficiência de fertilizantes fosfatados, objetivou-se: 1) avaliar os efeitos da interação de concentrações crescentes de ácidos húmicos com diferentes fontes de P sobre os teores extraíveis do nutriente em solo com características contrastantes. Nesse estudo, foram empregados quatro extratores de P, Bray-1, Mehlich-1 e 3 e resina mista; 2) Avaliar o efeito da interação de concentrações crescentes de C-ácidos húmicos- fontes de P sobre a nutrição e crescimento do trigo, cultivado em amostras de solo de textura média.

1.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os resultados do primeiro artigo demonstram que as quantidades de P extraídas do solo dependem do teor de matéria orgânica e da textura, bem como da fonte de P e do extrator utilizado. Demonstrando em geral que, para solo mais argiloso e com maior teor de MO, o P extraível diminui em função do aumento das concentrações de ácidos húmicos e que para solo arenoso, há aumento do P extraível quando se utiliza o superfosfato simples.

Os resultados do segundo artigo demonstram que a utilização de ácidos húmicos com fontes de fósforo de baixa solubilidade, os fosfatos naturais, tem potencial de tornar mais eficiente o uso dessas fontes na agricultura. Deve-se investigar o porquê dos ácidos húmicos interagirem mais com fosfatos naturais do que com as fontes de alta solubilidade, como o superfosfato simples.

Diversas hipóteses foram lançadas para explicação dos resultados obtidos, sendo uma delas a imobilização microbiana. Diante de tal fato, sugere-se que os ácidos húmicos tenham efeito mais expressivo a longo prazo, sendo necessário a condução de experimentos mais duradouros para verificar o real efeito dos ácidos húmicos na disponibilização de P, especialmente em experimentos que contenham plantas. A montagem de experimentos que analisem mais fatores ligados às hipóteses sugeridas, como a formação de complexos, P microbiano e análise da solução do solo, são também demandas recorrentes para pesquisa.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, F. V. et al. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1003–1011, nov./dez. 2003.

ALMEIDA, J. A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 985–1002, dez. 2003.

BUSATO, J. C. et al. Humic substances isolated from residues of sugar cane industry as root growth promoter. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 2, p. 206-212, mar./apr. 2010.

CANELLAS, L. P. et al. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots. **Plant Physiology**, Washington, v. 130, p. 1951-1957, dec. 2002.

CANELLAS, L. P. et al. Relationships between chemical characteristics and root growth promotion of humic acids isolated from Brazilian oxisols. **Soil Science**, Baltimore, v. 174, n. 11, p. 611-619, nov. 2009.

ERRO, J.; ZAMARREÑO, A. M. ; GARCÍA-MINA, J. M. Ability of various water-insoluble fertilizers to supply available phosphorus in hydroponics to plant species with diverse phosphorus-acquisition efficiency: Involvement of organic acid accumulation in plant tissues and root exudates. **Journal Plant Nutrition Soil Science**, Tharadant, v. 173, n. 5, p. 772–777, oct. 2010.

FU, Z. et al. Competitive interaction between soil-derived humic acid and phosphate on goethite. **Applied Geochemistry**, Oxford, v. 36, p. 125-131, sep. 2013.

GIOVANNINI, C. et al. Effect of organic-complexed superphosphates on microbial biomass and microbial activity of soil. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 49, n. 4, p. 395–401, may. 2013.

KPOMBLEKOU-A, K.; TABATABAI, M. A. Effect of low-molecular weight organic acids on phosphorus release and phytoavailability of phosphorus in phosphate rocks added to soils. **Agriculture Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 100, n. 2-3, p. 275–284, dec. 2003.

KORNDÖRFER, G. H.; LARA-CABEZAS, W. A.; HOROWITZ, N. Eficiência agrônômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 56, n. 2, p. 391–396, 1999.

HUA, Q. X. et al. Enhancement of phosphorus solubility by humic substances in Ferrosols. **Pedosphere**, Nanjing, v. 18, n. 4, p. 533-538, dez. 2008.

INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION. **IFADATA**. Disponível em: <<http://ifadata.fertilizer.org/ucSearch.aspx>>. Acesso em: 08 mar. 2015.

MALIK, K. A.; AZAM, F. Effect of humic acid on wheat (*Triticum aestivum* L.) seedling growth. **Environmental and Experimental Botany**, Elmsford, v. 25, n. 3, p. 245-252, agu. 1985.

MISHRA, M. M. et al. Effect of phosphocompost on the yield and P uptake of red gram (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.). **Tropical Agriculture**, Trinidad, v. 61, n. 3, p. 174-176, jul. 1984.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. 1. ed. Viçosa: UFV, 1999. 399 p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. B. et al. (Ed). **Fertilidade dos solos**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 471-549.

PERASSI, I.; BORGNINO, L. Adsorption and surface precipitation of phosphate onto CaCO₃-montmorillonite: effect of pH, ionic strength and competition with humic acid. **Geoderma**, Amsterdam, v. 232-234, p. 600-608, nov. 2014.

PEREIRA, M. G. et al. Carbono, matéria orgânica leve e fósforo remanescente em diferentes sistemas de manejo do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 5, p. 508-514, maio 2010.

RAIJ, B.V. Fósforo. In: RAIJ, B.V. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. p. 135-156.

RIMA, J. A. H. et al. Adição de ácido cítrico potencializa a ação de ácidos húmicos e altera o perfil proteico da membrana plasmática em raízes de milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 4, p. 614-620, abr. 2011.

ROSE, M. T. et al. A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances: practical implications for agriculture. **Advance in Agronomy**, Oxford, v. 124, p. 37-89, 2014.

SILVA, F. N. et al. Crescimento e produção de grãos da soja sob diferentes doses e fontes de fósforo em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 5, p. 1220–1227, set./out. 2009.

SILVA, A. C. et al. Promoção do crescimento radicular de plântulas de tomateiro por substâncias húmicas isoladas de turfeiras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1609-1617, set./out. 2011.

SINGH, C. P.; AMBERGER, A. Solubilization of rock phosphate by humic and fulvic acids extracted from atraw compost. **Agrochimica**, Pisa, v. 41, n. 5, p. 221-228, sep./oct.1997.

SINHA, M. K. Organo-metalic phosphates I. Interaction of phosphorus compounds with humic substances. **Plant Soil**, The Hague, v. 35, n. 1, p. 471-484, dec. 1971.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina: Embrapa, 2004. 416 p.

URRUTIA, O. et al. Theoretical chemical characterization of phosphate-metal-humic complexes and relationships with their effects on both phosphorus soil fixation and phosphorus availability for plants. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 93, n. 2, p. 293–303, jan. 2013.

WANG, X. J.; WANG, Z. Q.; LI, S.G. The effect of humic acids on the availability of phosphorus fertilizers in alkaline soils. **Soil Use and Management**, Oxford, v. 11, n. 2, p. 99-102, jun. 1995.

WEIR, C. C.; SOPER, R. J. Interaction of phosphates with ferric organic complexes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 43, n. 2, p. 393-399, jul. 1963.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

*Artigos nas normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo

2. ARTIGO 1 INTERAÇÃO ÁCIDOS HÚMICOS-FERTILIZANTES FOSFATADOS E A EXTRAÇÃO DE P EM SOLOS COM TEXTURAS CONTRASTANTES⁽¹⁾

Sara Dantas Rosa⁽²⁾, Carlos Alberto Silva⁽³⁾ & Henrique José Guimarães Moreira Maluf⁽⁴⁾

2.1 RESUMO

O fósforo (P) extraído do solo depende do extrator empregado, da interação do P adicionado com os constituintes do solo, da fonte do nutriente e da presença e interação de ácidos húmicos com constituintes do solo e com a fonte de P. Objetivou-se avaliar o P em solos de texturas contrastantes com concentrações crescentes de ácidos húmicos (AH) e com diferentes fontes de P. Amostras de Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e de Neossolo Quartzarênico (RQ) foram incubadas com 0, 5, 10, 50 e 100 mg kg⁻¹ de C-AH e 400 mg kg⁻¹ de P, que foi suprido na forma de superfosfato simples, fosfato de Araxá e fosfato de Bayóvar. As misturas solo-AH-fonte de P foram incubadas por 60 dias e, na extração de P do solo, utilizaram-se as soluções de Bray-1, Mehlich-1, Mehlich-3 e resina mista. Adotou-se o esquema fatorial 3 (fontes de P) x 5 (concentrações de C-AH), com o uso de delineamento em blocos casualizados, com três repetições. No LVd, a adição de ácidos húmicos não aumentou os teores de P extraído pelos quatro extratores testados, entretanto, no RQ, a adição de AH aumenta os teores de P extraído, quando a fonte é superfosfato simples. Houve correlação entre os teores de P extraídos por Bray-1 e Mehlich-3 em LVd e Bray-1, Mehlich-3 e resina mista em RQ, mas a associação de um extrator com outro não traduz-se em maior eficiência agrônômica, uma vez que há sub ou superestimação do P adicionado. A resina mista é o extrator que melhor reflete os teores de P supridos pelas fontes do nutriente testadas. As concentrações de C-AH, em geral, elevam os teores de P em solo, quando a fonte é o superfosfato simples, contudo, reduzem o P quando o solo é adubado com os fosfatos de Araxá e Bayóvar.

¹ Parte da Dissertação de Mestrado da primeira autora.

² Mestranda em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). Bolsista Capes. E – mail: saradantas@agronoma.eng.br

³ Professor Associado do Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). E – mail: csilva@des.ufla.br

⁴ Doutorando em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). Bolsista Capes. E – mail: maluf.henrique@yahoo.com.br

Termos de indexação: substâncias húmicas, extratores de P, fixação de P, complexos organo-P, matéria orgânica, Fosfato Bayóvar.

2.2 SUMMARY: HUMIC ACIDS-PHOSPHATE FERTILIZERS INTERACTION AND THE P EXTRACTION IN SOILS WITH CONTRASTING TEXTURES

The phosphorus (P) extracted from soils depends on the soil P test, interaction of P added with the soil constituents, nutrient sources and the interaction of humic acids with soil constituents and with the phosphate rock. The aim of this paper was to assess the contents of P extracted from soils with contrasting textures and fertilized with increasing concentrations of humic acids (AH) and different P sources. Samples of Red dystrophic Latosol (LVd) and Quartzarenic Neosol (RQ) were incubated with increasing concentrations of C-AH: 0, 5, 10, 50 and 100 mg kg⁻¹ and 400 mg kg⁻¹ of P supplied by single superphosphate, Araxá and Bayóvar rock phosphates. The soil-C-AH rate-P sources combinations were incubated during 60 days, and the soil samples were tested for P using the Bray-1, Mehlich-1, Mehlich-3 solutions and a cationic and anionic mixed resin. It was adopted the factorial 3 (P sources) x 5 (C-AH concentrations) with randomized block design, with the use of three replications. In the LVd, the addition of humic acids does not increase the levels of P extracted by the four soil P tests investigated, however, in the RQ, the addition of C-AH in increasing concentrations elevated the P concentrations extracted when the source is single superphosphate. There is a correlation between the P extracted by Bray-1 and Mehlich-3, in the LVd, and Bray-1, Mehlich-3 and resin, in the RQ, however these results mean that the agronomic efficiency of each soil test is not equal, since the amounts of P extracted from soils could be over or underestimated. The mixed resin is the soil test that best reflects the P levels available in the soils investigated. Thus, the effect of increasing concentrations of C-AH on extractable levels of P depends on the investigated soil, source of P and soil P test. As a whole, humic acids application increases the amounts of P in soil when single superphosphate is the P source, however, P levels are decreased when natural rocks phosphate are added in soils.

Index terms: humic substances, P soil tests, P fixation, organic-P complexes, organic matter, Bayóvar phosphate.

2.3 INTRODUÇÃO

A maioria dos solos brasileiros sob condições naturais são ácidos e pobres em P, devido ao elevado grau de intemperismo e predominância na fração argila de minerais de baixa atividade química e elevada área de superfície, como caulinita, gibbsita, hematita e goethita; essas condições conferem a esses solos baixa capacidade de troca de cátions, baixa disponibilidade de nutrientes e maior presença de cargas positivas, principalmente na condição de pH baixo, o que resulta em maior densidade de sítios de adsorção de fosfato no solo (Novais & Smyth, 1999; Novais et al., 2007). Tanto nos solos argilosos quanto nos que fixam menos P, é necessário aumentar a eficiência de uso do P-fertilizante, uma vez que, nas lavouras brasileiras, o nutriente é aplicado em doses elevadas, o que implica em custo elevado da adubação das lavouras no país (Sousa & Lobato, 2004).

Alternativas vêm sendo usadas para aumentar a eficiência da adubação fosfatada, sendo uma delas o uso de ácidos húmicos (AH), visando reduzir a adsorção de P no solo (Erro et al., 2010; Urrutia et al., 2013). Os AH podem aumentar a disponibilidade de P no solo por diversas vias: competição com os íons fosfatos por sítios de adsorção no solo, bloqueando-os; complexação de Fe e Al, evitando a precipitação do fosfato; e no desenvolvimento de campo eletrostático negativo repulsivo em torno dos sítios de adsorção de P (Andrade et al., 2003; Hua et al., 2008; Fu et al., 2013; Giovannini et al., 2013; Perassi & Borgnino, 2014). Urrutia et al. (2013), estudando complexos entre fosfato-AH e Fe, Al e, ou Ca em solos ácidos e alcalinos da Espanha, observaram que esses complexos reduzem a adsorção de P, tanto pelo mecanismo de proteção do P complexado, quanto pelo bloqueio do AH nos sítios de adsorção de fosfato no solo. Há relatos que a adição de AH assegura maior disponibilidade de P para as plantas (Erro et al., 2010; Erro et al., 2012; Fu et al., 2013; Perassi & Borgnino, 2014). Em contrapartida há também ausência de resposta da disponibilidade de P em função do uso de AH. Hartz et al. (2010), utilizando AH comerciais no cultivo de alface e tomate, verificaram que, em geral, o material húmico não interferiu no crescimento dessas culturas, tampouco exerceu influência sobre a eficiência de uso e absorção de P.

O suprimento adequado de P às plantas pode ser obtido com a diversificação das fontes de P e com o uso de tecnologias para aumento da eficiência da adubação fosfatada. É possível utilizar fontes de alta eficiência agronômica, como superfosfato simples (SS) (Sousa & Lobato 2004; Silva et al., 2009), e rochas fosfáticas de baixa eficiência agronômica, como os fosfatos naturais (FNs). O fosfato natural reativo Bayóvar, de origem sedimentar, possui matéria orgânica (MO) recalcitrante em sua estrutura

(Bech et al., 2010), o que pode minimizar as reações de forte interação do fosfato com os coloides do solo; pouco se sabe sobre a natureza química e bioatividade de sua matriz orgânica. O uso de fontes de P de alta solubilidade, como o SS, pode implicar em fixação elevada de P, devido à alta solubilidade no solo (Korndörfer et al., 1999). A dissolução lenta dos FNs pode reduzir a adsorção do fósforo no solo, já que este é liberado aos poucos para as plantas, contudo as baixas quantidades de P podem não ser suficientes para atender em tempo hábil a demanda das culturas, principalmente as de ciclo curto (Kpombrekou-a & Tabatabai, 2003). Por outro lado, os FNs, em solos mais ricos em MO, com a presença de ligantes orgânicos, como os AH, podem ter a sua solubilização otimizada, por meio da complexação de íons metálicos presentes nas rochas fosfáticas, com subsequente liberação de P (Kpombrekou-a & Tabatabai 2003); Mishra et al. (1984) e Singh & Amberger (1997) relatam maior solubilização de P de rochas fosfáticas utilizando AH. Esse comportamento diferenciado dos fosfatos depende, assim, da interação da rocha ou do P-fertilizante com o solo, com a MOS e com ligantes orgânicos presentes ou adicionados no solo.

As soluções utilizadas para extração do P tendem a não sofrer influência dos AH. Quando associadas a concentrações de AH e fontes de P no solo, o que influencia o P extraível de cada extrator são as fontes de P utilizadas. Assim, extratores como Mehlich-1 superestimam os teores de P em solos com alto teor de Ca e, ou com histórico de adubação fosfatada utilizando FNs, em função de o caráter ácido propiciar maior extração de P ligado à Ca (Novais et al., 2007; Corrêa et al., 2008), o que, geralmente, pode não ocorrer para outros extratores, como Bray-1 e Mehlich-3, devido ao caráter menos ácido e ausência do sulfato nesses extratores (Novais et al., 2007). A resina mista de troca iônica é constituída pela mistura das resinas de troca catiônica e aniônica saturadas com bicarbonato de sódio (Raij, 2011), desse modo esse extrator tem a capacidade de extrair P e cátions do solo, como K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , podendo melhor simular e antever os nutrientes que, de fato, serão absorvidos pelas raízes das plantas (Freitas et al., 2013).

Em solos, os AH podem, ainda, interagir com os microrganismos, influenciando a dinâmica de imobilização/mineralização de P da solução do solo. Sob condições de solo onde há maior concentração de ligantes orgânicos – solos ricos em MO ou com adição de AH, o efeito dos AH sobre a dinâmica e formas de P pode ser minimizado, contudo os efeitos mencionados podem ter maior magnitude nos solos mais arenosos. A hipótese primária deste estudo é a de que o uso de AH no solo diminui a fixação de P, mantendo-o mais na solução do solo, o que eleva o P extraível; além disso, os

AH podem interagir com as fontes do nutriente, o que pode aumentar a solubilização dos fosfatos naturais, com mais P extraído do solo. Como hipótese secundária, é possível antever que a magnitude desses efeitos depende das concentrações crescentes de AH e do tipo de solo estudado. Diante do exposto e da necessidade de se aumentar a eficiência de utilização de P-fertilizantes, objetivou-se avaliar os teores P extraível, empregando os extratores Bray-1, Mehlich-1, Mehlich-3 e resina mista, em solo argiloso e de textura arenosa com concentrações crescentes de C-AH, aplicados simultaneamente à fonte de P, fosfato natural de Araxá, fosfato natural reativo Bayóvar e superfosfato simples.

2.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Estudo da Matéria Orgânica do Solo (LEMOS), Departamento de Ciência do Solo/Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG. Foram utilizadas amostras de Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ), cujas principais características físicas e químicas são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1. Textura e características químicas da camada superficial (0-20 cm) de Latossolo Vermelho distrófico (LVd) e Neossolo Quartzarênico (RQ), sob condições naturais

Atributo	LVd	RQ
pH (H ₂ O)	4,3	5,2
MO (dag kg ⁻¹)	6,2	1,6
P (mg dm ⁻³) ⁽¹⁾	1,8	14
P-rem (mg L ⁻¹)	6,4	39
K ⁺ (mg dm ⁻³)	51	39
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,6	0,4
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³)	0,2	0,1
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³)	1,9	0,6
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	15,3	3,8
SB (cmol _c dm ⁻³)	0,9	0,6

t (cmol _c dm ⁻³)	2,8	1,2
T (cmol _c dm ⁻³)	16,2	4,3
V (%)	6	13
m (%)	68	53
Argila (dag kg ⁻¹)	75	4
Silte (dag kg ⁻¹)	11	3
Areia (dag kg ⁻¹)	14	93

⁽¹⁾Extrator Mehlich-1.

As amostras de solo foram coletadas na camada de 0-20 cm, de modo que, em razão das características particulares, cada solo constituiu um experimento. Os solos foram incubados com CaCO₃ e MgCO₃, na proporção 3:1, por aproximadamente 20 dias, para correção da acidez e elevação da saturação por bases a 60%. Durante a incubação, a disponibilidade de água foi mantida próxima de 70% da capacidade de campo. Em sequência, os solos foram secos e passados em peneira com malha de 2 mm.

Os tratamentos foram constituídos por fatorial 5 x 3, sendo cinco concentrações de carbono de ácidos húmicos (C-AH): 0, 5, 10, 50 e 100 mg kg⁻¹, com o uso simultâneo de três fontes de P, (aplicado na dose de 400 mg kg⁻¹): superfosfato simples (SS), fosfato natural de Araxá (FA) e fosfato natural reativo de Bayóvar (BY). Cada experimento foi composto por 15 tratamentos, dispostos em delineamento de blocos casualizados, com o uso de três repetições.

A fonte de ácidos húmicos (AH) utilizada foi a p.a. da marca Sigma-Aldrich®, com as seguintes características: pH em água, 9,8; C, 37,6 %; N, 7,65 g kg⁻¹; P, 0,28 g kg⁻¹; K, 6,3 g kg⁻¹; Ca, 5,9 g kg⁻¹; Mg, 0,31 g kg⁻¹; S, 4,44 g kg⁻¹; Fe, 1,09 g kg⁻¹; Cu, 39,9 mg kg⁻¹; Mn, 14,8 mg kg⁻¹ e Zn, 21,8 mg kg⁻¹. As concentrações de AH foram calculadas em relação ao teor de C presente no produto da Sigma-Aldrich®. A quantidade de adubo fosfatado foi calculada em função da solubilidade de P em ácido cítrico a 2% (AC 2%), para o fosfato natural de Araxá (4% de P solúvel em AC 2%), e fosfato natural reativo de Bayóvar (13% de P em AC 2%), e em citrato neutro de amônio (CNA) + água, para o superfosfato simples (18% de P em CNA+ água).

As misturas solo-concentrações de C-AH-fontes de P foram incubadas durante 60 dias em copos plásticos contendo 180 g de solo seco; os copos plásticos foram cobertos com filme plástico, para manutenção de teor de água próximo a 80% da capacidade de campo. Posteriormente à incubação, as amostras foram secas ao ar e passadas em peneira com malha de 2 mm, para as análises de P extraível em: resina mista trocadora de íons (Raij et al., 2001), com determinação de teor pelo método espectrofotométrico proposto por Murphy & Riley (1962); solução de Mehlich-1 (0,05 mol L⁻¹ de HCl + 0,0125 mol L⁻¹ de H₂SO₄) (Mehlich, 1953); Mehlich-3 (0,2 mol L⁻¹ CH₃COOH + 0,25 mol L⁻¹ NH₄NO₃ + 0,015 mol L⁻¹ NH₄F + 0,013 mol L⁻¹ HNO₃ + 0,001 mol L⁻¹ EDTA) (Mehlich, 1984); e Bray-1 (0,025 mol L⁻¹ HCl + 0,03 mol L⁻¹ NH₄F) (Bray & Kurtz, 1945). As extrações foram realizadas na proporção de solo:extrator de 1:10 (v/v) e os teores de P foram determinados por espectrofotometria UV-visível, segundo método descrito em Braga & Defelipo (1974), para o Mehlich-1, e segundo o manual da Embrapa 2009, para as soluções de Mehlich-3 e Bray-1.

Os dados foram submetidos à análise de variância e de regressão, entre os teores de P extraível e concentrações de C-AH, para cada extrator, utilizando o programa computacional SISVAR 5.3 (Ferreira, 2011). Os modelos de regressão foram selecionados com base no menor valor da soma de quadrados do erro, significância dos parâmetros da equação ($p < 0,05$) e no maior valor do coeficiente de determinação (R^2) ajustado. Também foi realizada análises de correlação de Pearson, a fim de verificar as relações existentes entre os extratores de P utilizados.

2.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.5.1 Efeito dos ácidos húmicos

No Latossolo Vermelho distrófico (LVd), ocorreu interação ($p < 0,05$) entre as fontes de P e concentrações de C-ácidos húmicos (C-AH), para os quatro extratores utilizados (Figura 1). Quando se comparou os extratores, foi observado, para o extrator Bray-1, que não houve diferenças entre as concentrações de C-AH, para as fontes de P. O P extraído do solo com a solução de Mehlich-1 diminuiu de forma linear para a fonte fosfato natural reativo de Bayóvar (BY) e de forma quadrática para a fonte fosfato natural de Araxá (FA), tendo como ponto mínimo da curva, ou seja, ponto em que a concentração de C-AH propicia menor teor de P extraível, de 75,3 mg kg⁻¹ C-AH, que disponibilizou 1224 mg dm⁻³ P. Tendência inversa ao Mehlich-1 foi verificada para a resina, dado que o P extraível do

FA diminuiu de forma linear e o de BY, de forma quadrática, onde o menor teor de P, $81,7 \text{ mg dm}^{-3}$, foi obtido com a concentração de $73,9 \text{ mg kg}^{-1}$ C-AH. Com o uso do superfosfato simples (SS), não houve diferença nos teores de P extraível ($p < 0,05$) em função das concentrações de C-AH, quando se empregaram a solução de Mehlich-1 e resina mista. Entretanto, nota-se, quando se empregou o extrator Mehlich-3, para o BY, que o teor de P diminuiu de forma quadrática, com o aumento das concentrações de C-AH, e que o menor teor de P, $124,6 \text{ mg dm}^{-3}$, foi obtido com a concentração $62,3 \text{ mg kg}^{-1}$ C-AH; para as fontes FA e SS, não houve diferença ($p < 0,05$) nos teores de P para as diferentes concentrações de C-AH. De modo geral, no LVd, independentemente do extrator usado, o P extraível não é alterado ou diminuiu à medida que se eleva a concentração de C-AH.

No Neossolo Quartzarênico (RQ), ocorreu interação ($p < 0,05$) entre as fontes de P e concentrações de C-AH, para os quatro extratores utilizados (Figura 2). Para o extrator Bray-1 observa-se que os teores de P extraídos no solo, utilizando-se o SS, aumentaram de forma quadrática, sendo a concentração de $62,5 \text{ mg kg}^{-1}$ C-AH correspondente ao maior teor de P extraível, 489 mg dm^{-3} ; já para as fontes FA e BY, não houve diferença significativa ($p < 0,05$) entre as concentrações de C-AH. Com o emprego da solução de Mehlich-1, observou-se que, para o FA e BY, os teores de P diminuíram de forma linear, conforme foram aumentadas as concentrações de C-AH e, para a fonte SS, não houve efeito da concentração de C-AH ($p < 0,05$). Com o uso do Mehlich-3, os teores de P aumentaram de forma quadrática com o emprego do SS, no qual o teor máximo de P, 1052 mg dm^{-3} , foi obtido com a adição de $39,6 \text{ mg kg}^{-1}$ C-AH, mas o teores de P extraível diminuem de forma linear, quando a fonte é o BY. Com a adição ao solo do FA, não houve diferença nos teores de P-solo em função das concentrações de C-AH. O uso da resina mista permitiu verificar que o modelo quadrático se ajustou aos teores de P extraível do solo adubado com o SS, no qual a máxima disponibilização de P, 367 mg dm^{-3} , foi obtida com a concentração de $46,3 \text{ mg kg}^{-1}$ C-AH; para as fontes FA e BY, não houve efeito ($p < 0,05$) das concentrações de C-AH.

Há vários trabalhos que comprovam que a disponibilidade de P, em geral, é aumentada com adição de AH (Andrade et al., 2003; Hua et al., 2008; Fu et al., 2013; Giovannini et al., 2013; Perassi & Borgnino 2014). No entanto, neste estudo, para a maioria dos tratamentos, ou não há efeito ou o uso de concentrações crescentes de C-AH resulta em redução dos teores de P extraídos dos solos, principalmente no solo argiloso. Assim, há reduções dos teores de P extraído dos solos adubados com FNs, conforme se aumenta a concentração de C-AH aplicada no LVd e RQ, quando se utilizam os

extratores Mehlich-1 e Mehlich-3. No RQ, ocorreu um aumento da disponibilidade de P em função das concentrações de C-AH, apenas, quando a fonte de P é o SS.

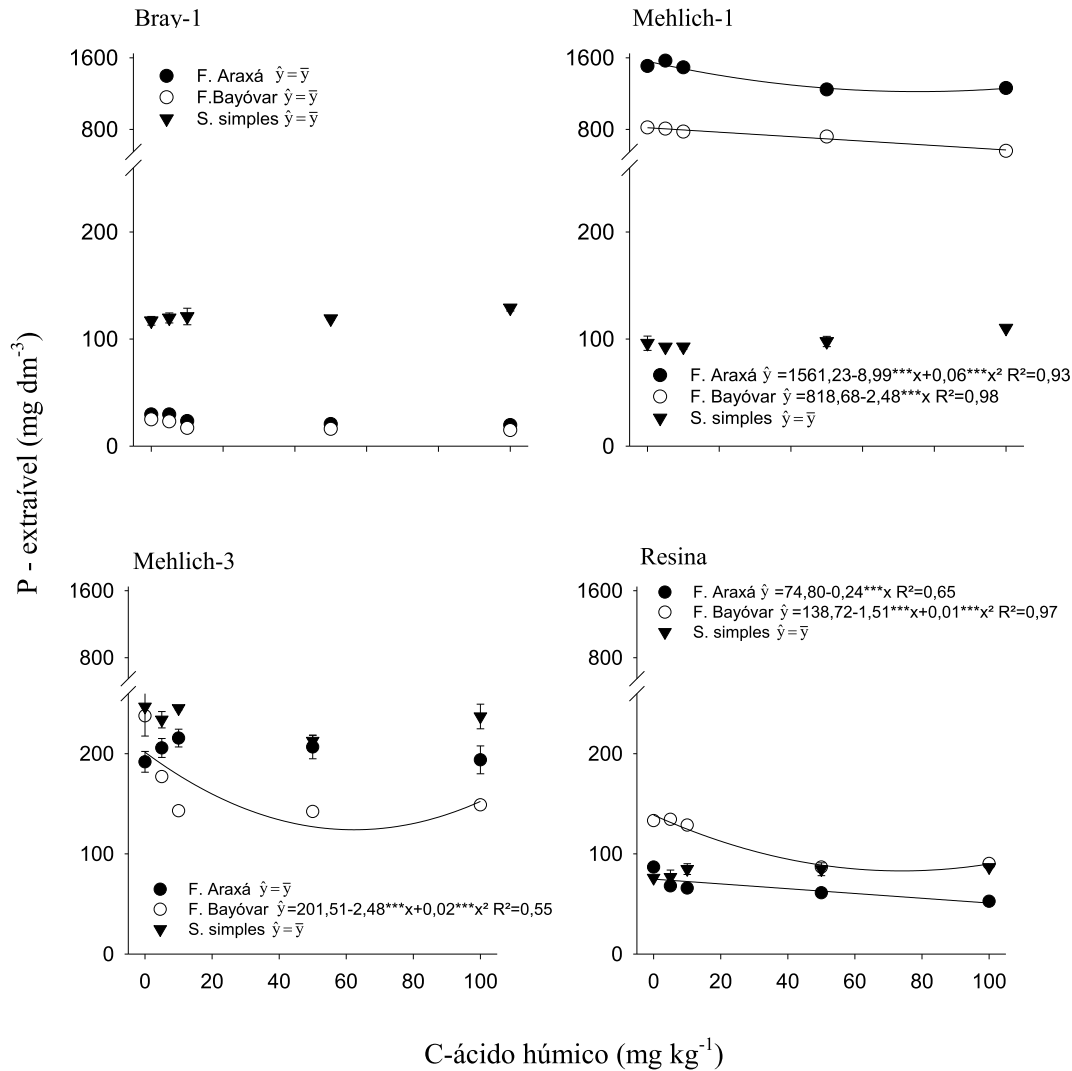


Figura 1– Fósforo extraível de amostras de Latossolo Vermelho Distrófico em função de concentrações de C-ácidos húmicos e de fontes de P (fosfato de Araxá, fosfato de Bayóvar e superfosfato simples). *, ** e *** parâmetros da equação significativos a 5%, 1% e < 1%. Barras representam o erro padrão da média.

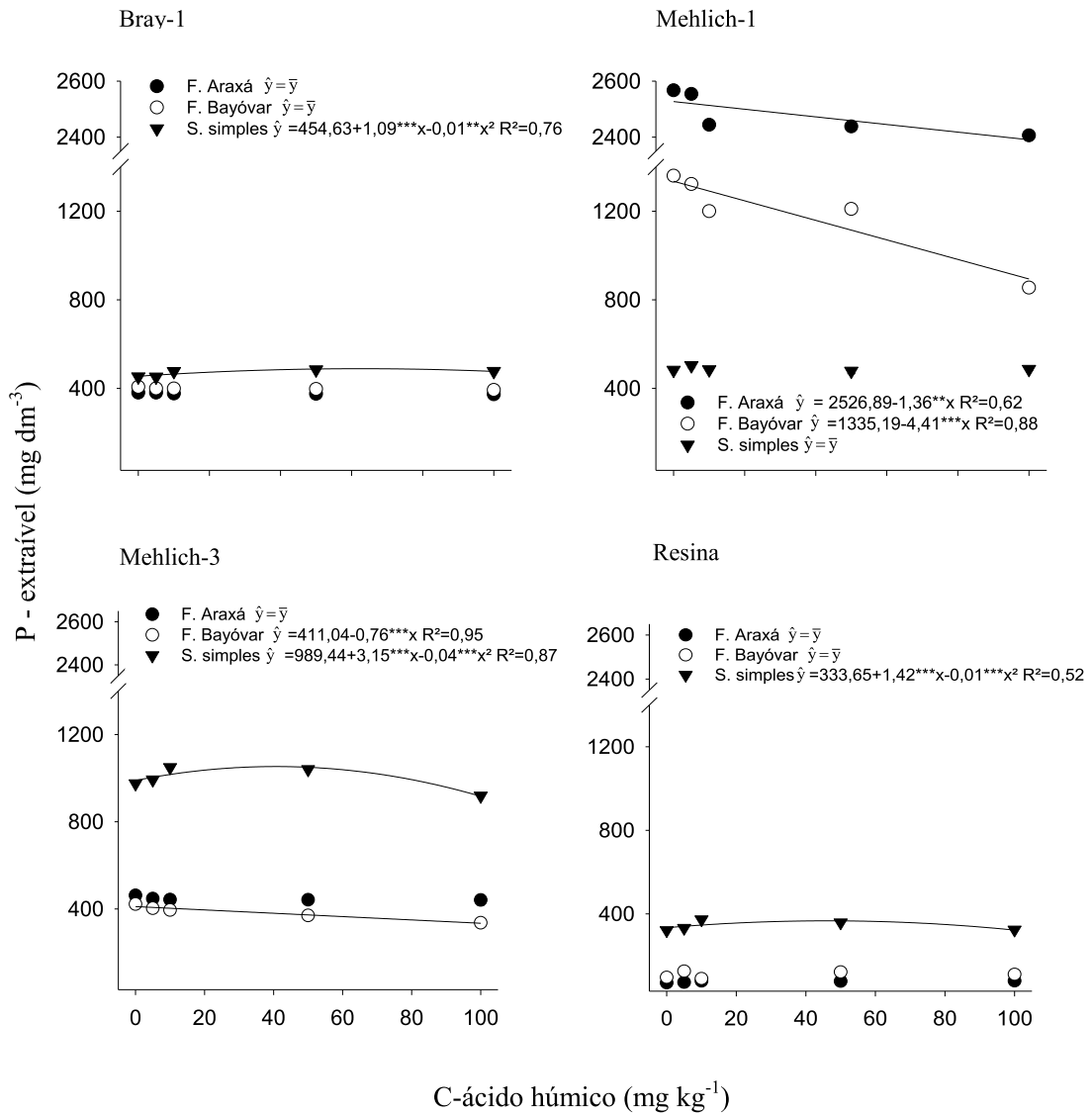


Figura 2- Fósforo extraível de amostras de Neossolo Quartzarênico em função de concentrações de C-ácidos húmicos e de fontes de P (fosfato de Araxá, fosfato de Bayóvar e superfosfato simples). *, ** e *** parâmetros da equação significativos ao nível de 5%, 1% e < 1% de probabilidade. Barras representam o erro padrão da média.

Observa-se que a resposta de P em solo à aplicação de concentrações crescentes de AH depende da fonte utilizada e do solo investigado, de modo que os resultados indicam que os AH interagem de modo

diferenciado com as fontes fosfatadas, solubilizando ou formando complexos estáveis ou não como Fe, Al e, ou Ca com íons fosfatos. Aliado a isso, uma possível explicação para esses resultados é a de que os solos possuem teores de MO diferentes e isso faz com que os teores de P extraível não sejam influenciados pelos AH, ou o são de modo diferenciado. Em função do efeito de diluição dos AH em um solo mais rico em MO, como é o caso do LVd, pode-se atenuar ou mascarar o efeito dos AH sobre as formas de P no solo e sobre a ação do material húmico adicionado na solubilização de fontes de P de baixo valor agrônômico. Sinha (1971) e Weir & Soper (1963) relatam que o P no solo pode reagir com os AH, em conjunto com Fe, Al e, ou Ca, formando complexos P-organo-metálicos, o que representa mais uma forma de redução da disponibilidade de P em solos; a formação desses complexos é regulada pela presença de cátions, AH e P, e tem como característica a baixa estabilidade e alta mobilidade no solo.

Outra hipótese para explicar o efeito dos AH sobre o P seria a ligada à forma de aplicação dos AH e a fonte de P. Neste estudo, tanto os AH quanto as fontes de P foram adicionadas de modo conjunto nos solos, ou seja, simultaneamente. Dessa forma, a capacidade dos AH em bloquear os sítios de adsorção de P é reduzida, visto que há mais P (400 mg kg^{-1}) e, proporcionalmente, menos AH para bloquear os sítios de fixação do nutriente, o que poderia anular ou diminuir o efeito benéfico dos AH em aumentar a disponibilidade de P nos solos. A maior concentração aplicada de C-AH representa a proporção de 1:4 (AH:P), ou seja, adiciona-se muito mais íons fosfatos do que ligantes orgânicos na forma de AH, com predomínio do processo de adsorção de P, em relação ao bloqueio de sítios de fixação do ânion pelo ligante orgânico. O efeito dos AH em concorrer com os íons fosfatos nos sítios de adsorção é alterado em função da forma como o competidor é introduzindo no sistema (Perassi & Borgnino, 2014). Antelo et al. (2007); Fu et al. (2013) e Perassi & Borgnino, (2014), trabalhando com minerais sintéticos, estudaram a adição de AH antes da fonte fosfatada, a aplicação simultânea e a adição de fonte fosfatada antes dos AH. Segundo Fu et al. (2013) e Perassi & Borgnino (2014), os ácidos húmicos aplicado antes do P diminui a adsorção de P, em relação as demais formas de aplicação; em contrapartida, Antelo et al. (2007) afirmam que os AH aplicado antes ou junto com o fertilizante diminui a adsorção de P, em goethita sintética, com resultados próximos, sem diferenças significativas entre os modos de aplicação do P.

Aliado à forma de aplicação dos AH e das fontes de P, é relevante a informação que a presença de AH no solo estimula a atividade microbiana. Mesmo os AH sendo uma fração da MO com alto grau de

humificação e elevada recalcitrância e estabilidade química, com sua adição no solo, é possível que haja maior imobilização de nutrientes, entre esses, de P. Assim, há aumento da atividade microbiana proporcionalmente às concentrações de AH (Giovannini et al., 2013). Supõe-se que a diferença de respostas de adição de AH entre FNs e SS estaria relacionada com algum mecanismo que favorece a imobilização do P em FNs, em relação ao do SS, podendo, inclusive, o efeito estar associado à solubilidade das fontes. Em relação aos FNs, devido à sua baixa solubilidade em água, o P é liberado para a solução do solo em pequenas quantidades, de modo gradual, o que favorece a redução dos teores de P imobilizados. Em contrapartida, para o SS, por se tratar de uma fonte de alta solubilidade, ao entrar em contato com a solução do solo, esse adubo é mais rapidamente solubilizado. Assim, mesmo ocorrendo os processos de adsorção de P no solo e imobilização pelos microrganismos, os teores de P extraível continuam mais altos, tendo maior capacidade de manutenção desses teores no solo, em relação aos FNs. Como resultado do aumento da atividade microbiana, tem-se maior liberação de C-CO₂, assim, Giovannini et al. (2013) verificaram que há correlação positiva entre C-CO₂ e a quantidade de P e C adicionadas ao solo. Esses resultados estão de acordo aos resultados obtidos, indicando que a aplicação de AH pode estimular a microbiota do solo, aumentando a imobilização de P presente no solo, principalmente quando são utilizados os fosfatos BY e FA.

Em relação ao SS, no RQ (Figura 2), os teores de P extraível aumentam com o acréscimo das concentrações de C-AH e há uma concentração ótima de ácidos húmicos para máximo teor de P extraído do solo arenoso. Nesse caso, existem poucos sítios de fixação de P no RQ, assim, os AH, possivelmente, consegue bloquear parte desses sítios, liberando mais P para a solução do solo. Após a concentração de AH que propicia máximo P extraível, ocorre um decréscimo, possivelmente, devido ao processo de imobilização de P que sobrepõe o efeito do bloqueio de sítios de adsorção de fosfato pelos AH.

Diversos trabalhos utilizando AH indicam aumento na disponibilização de P (Andrade et al., 2003; Hua et al., 2008; Fu et al., 2013; Giovannini et al., 2013; Perassi & Borgnino, 2014), diferentes dos dados do presente estudo. Porém, deve-se ressaltar que existem poucos estudos que verificam a dinâmica de P mediante a aplicação dos AH em solo sob diferentes condições, inclusive a interação com diferentes fontes de P. Grande parte dos estudos existentes são desenvolvidos em condições laboratoriais e com minerais sintéticos, o que pode não representar a verdadeira dinâmica das formas e teores disponíveis de P em função da adição nos solos de ácidos húmicos.

2.5.2 Fontes de P

No LVd (Figura 1), ao se utilizar o extrator Bray-1, o P extraível não é afetado pelas concentrações C-AH e o SS propicia no solo mais P extraível que os FNs, dado que os teores de P, além de serem mais baixos que os propiciados pelo SS, não diferem entre as fontes de FNs, no caso do FA e BY. Com o uso do extrator Mehlich-1, verifica-se que o teor de P extraível reflete de fato a disponibilidade de P resultante do uso de SS, mas esse extrator superestima os teores de P extraível quando as fontes de P são o FA e o BY; para os fosfatos naturais, o uso de concentrações crescentes de C-AH resulta em decréscimo nos teores de P extraído do solo; os teores de P seguem a seguinte ordem decrescente: FA > BY > SS. Com o uso da solução de Mehlich-3, observam-se maiores teores de P extraível para o SS, em geral, seguido por FA e BY. A extração de P resina mostra que a incubação causa aumento em solo do P suprido pelo BY, em níveis superiores até mesmo aos verificados para o SS. Os níveis de P extraídos do solo pela resina parecem refletir a suposta disponibilidade de P propiciada pelas fontes de P no solo mais argiloso, ou seja, é baixa a extração de P para fosfatos pouco solúveis, como o FA, mas os teores de P são maiores para as fontes de fosfato natural mais reativa, o fosfato de Bayóvar, ou para a de P prontamente disponível oriundo do superfosfato simples.

No RQ (Figura 2), utilizando-se o extrator Bray-1, os maiores teores de P extraível foram verificados para a fonte SS, seguido por BY e FA. Quando se utilizou a solução de Mehlich-1, o comportamento das fontes e os efeitos das concentrações de C-AH sobre o P extraível foram similares aos observados no LVd, com a ressalva que os teores de P extraídos no RQ foram superiores aos determinados no LVd. O uso da solução de Mehlich-3 evidenciou que os teores de P são afetados pela concentração de C-AH e são superestimados quando a fonte de P é o SS. Há diminuição nos teores de P extraível com o aumento da concentração de C-AH, quando a fonte de P é o BY. Com o uso da resina, o SS propicia em solos teores de P que são afetados pelas concentrações de C-AH e são maiores do que os verificados para os fosfatos BY e FA.

Em relação aos demais extratores, o Bray-1, para o LVd, apresenta teores de P extraível muito baixo para os FNs. Esses resultados podem estar associados à característica do extrator em não solubilizar P-Ca de maneira geral ou à textura do solo. Para o RQ, o P extraível pelo Bray-1 não segue a ordem esperada de magnitude de teores de P em solo em razão da solubilidade diferenciada dos fertilizantes investigados, demonstrando a baixa eficiência agrônômica do extrator para essa situação. O extrator Mehlich-1 superestima os valores de P extraível para os FN. Sabe-se que os fosfatos naturais são

caracterizados por sua baixa solubilidade e baixa eficiência agronômica (Novais et al., 2007; Santos et al., 2012; Sousa & Lobato 2004). Portanto, os maiores teores de P extraível são devidos as características do extrator, uma vez que o extrator ácido de Mehlich-1 extrai P-Ca, superestimando os teores de P extraível (Corrêa et al., 2008; Novais et al., 2007). Essa superestimação fica evidente quando se avaliam os teores de P extraído por Mehlich-1 entre 600 a 1500 mg dm⁻³, para o LVd, onde se aplicou 400 mg kg⁻¹. Nota-se, ainda, que os teores de P para FA são superiores ao BY, o que está em acordo com os resultados de Freitas et al. (2013), que observaram o mesmo, trabalhando com fosfato de Araxá e Gafsa, onde no FA foram extraídos maiores teores de P que o de Gafsa, considerando-se que Gafsa é um fosfato natural assim como o BY. Na solução de Mehlich-3, a presença do ácido acético diminui a solubilização do P-Ca em FNs de baixa reatividade (Novais et al., 2007). Ainda que o ácido acético reduza a extração de P-Ca, infere-se que o P ainda é extraído, sem aparentemente estar disponível, uma vez que os teores de P do FA superam os do BY, resultado não esperado em função da reatividade dos FNs. A resina apresenta comportamento semelhante ao da planta, à medida que extraído do solo formas prontamente de P, portanto não ligadas ao Ca (Freitas et al., 2013), representando de forma mais coerente a disponibilidade de P no solo para as plantas (Silva & Raij, 1999).

2.5.3 Extratores de fósforo

No presente estudo, quando se utilizou a solução de Mehlich-1, os teores de P extraível do RQ, para os FNs, são ainda maiores do que os verificados para o LVd. No entanto, esse extrator subestima os teores de P em solos argilosos, sendo uma das explicações o fato de o SO₄²⁻, presente no extrator, ser adsorvido ao solo (Novais et al., 2007). O Mehlich-3, em razão do que foi dito anteriormente, pode superestimar os teores de P supridos pelos FNs, e foram observados maiores teores de P extraível para essas fontes de menor eficiência agronômica. Já o extrator Bray-1 distingue as fontes de P quanto à solubilidade, no solo argiloso, mas não a variação nos teores de P extraível, em função da combinação dos fatores testados, quando o solo é arenoso. Assim, os teores de P-Bray-1 são menores para os FNs e maiores para o SS, no solo argiloso, o que seria de fato esperado. No caso do extrator Mehlich-1, os teores de P são superestimados para os FNs e o Mehlich-3 superestima os teores de P extraível, quando a fonte é o SS. Segundo Novais et al. (2007), nenhum extrator é capaz de fornecer o verdadeiro teor de P disponível, ou aqui denominado extraível, pois essa disponibilidade em solo de P é regulada por outros fatores, como planta, microrganismos, transporte, tipo e teor de argila, dentre outros.

Quando se investigou o grau de associação dos teores de P extraídos pelos extratores testados, para o LVd, houve correlação positiva somente entre os teores de P obtidos pelos extratores Bray-1 e Mehlich-3 (Quadro 2). Quando se avalia o grau de associação entre os teores de P pelos extratores, no RQ, observa-se correlação positiva para os extratores Bray-1 e Mehlich-3, Bray-1 e resina e, resina e Mehlich-3, com os respectivos coeficientes de correlação de 90, 93 e 96%. Esses resultados demonstram diferentes padrões de resposta entre os extratores em função da textura do solo e que, para o LVd, Bray-1 e Mehlich-3, e, para RQ, Bray-1, Mehlich-3 e resina, apresentam mesma tendência, ou seja, para a escolha do método adequado deve-se optar por aquele que não superestima nem subestima os valores de P extraível.

Quadro 2- Coeficientes de correlação entre os teores de P extraível pelas soluções de Bray-1, Mehlich-1, Mehlich-3 e pela resina, em amostras de Latossolo Vermelho distrófico e Neossolo Quartzarênico, após 60 dias de incubação

Extrator	Bray-1	Mehlich-1	Mehlich-3	Resina
Latossolo				
Bray-1	-			
Mehlich-1	-0,79	-		
Mehlich-3	0,61	-0,28	-	
Resina	-0,17	-0,17	-0,16	-
Neossolo				
Bray-1	-			
Mehlich-1	-0,83	-		
Mehlich-3	0,89	-0,68	-	
Resina	0,93	-0,82	0,96	-

Diante do comportamento errático dos extratores em avaliar a quantidade de P em solo, a resina mista parece ser o extrator que melhor reflete os supostos teores disponíveis de P. Assim, fica patente que o extrator de maior performance agronômica é a resina mista. Além disso, o simples fato de haver correlação entre os teores de P, entre um extrator e outro, não implica que os dois tenham elevada eficiência agronômica, dado que o teor de P em solo pode não refletir o que de fato foi disponibilizado pelas fontes do nutriente e, ou pelas concentrações de C-AH testadas. Essa conclusão advém do fato de

que a estimativa dos teores de P prontamente disponíveis supridos pelo SS é correta nos dois solos, quando se emprega o extrator de maior performance agronômica, a resina; contudo, é possível verificar que o tempo de incubação não foi suficiente para disponibilizar mais P no RQ, quando a fonte é fosfato pouco reativo (FA), e que a textura e teor de matéria orgânica são fatores preponderantes para determinar mais ou menos P no solo, quando a fonte é um fosfato natural de maior reatividade, como o é o caso do fosfato de Bayóvar.

2.6 CONCLUSÕES

1. O efeito das concentrações de C-ácidos húmicos na disponibilidade de P depende do teor de matéria orgânica e da textura do solo, fonte de P e extrator utilizado. Quando a fonte de P é o superfosfato simples, à medida que mais C-ácidos húmicos são adicionados no Neossolo Quartzarênico maior é o teor de P extraído, o que não ocorre no Latossolo, o solo mais rico em argila e matéria orgânica.

2. O uso de ácidos húmicos diminui os teores de P extraído pela maioria dos extratores, quando são aplicados nos solos os fosfatos de Araxá e Bayóvar, de modo que os mecanismos envolvidos nesses processos precisam ser investigados.

3. A resina mista de troca iônica é o extrator que melhor antecipa para as plantas os teores de P em função das fontes de P, solos investigados e concentrações de C-ácidos húmicos testadas; o extrator Bray-1 apresenta adequada capacidade de extrair P no Latossolo, em função das fontes de P, no entanto, superestima os teores do nutriente em Neossolo Quartzarênico adubado com os fosfatos de Araxá e Bayóvar.

4. Quando se avalia o desempenho dos extratores, o fato de os teores de P extraídos do solo correlacionarem entre si não significa que os extratores podem ser utilizados sem maiores critérios e são de elevada eficiência agronômica, pois os teores de P extraídos pelas soluções de Mehlich-1, Mehlich-3 e Bray-1 são super ou subestimados, de modo que o uso de extrator pressupõe avaliar a fonte de P, o solo investigado e a interação de níveis desses fatores com as concentrações de C-ácidos húmicos.

2.7 AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processos 308592/2011-5 e 461935/2014-7) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento das ações de pesquisa e concessão de bolsas de estudo aos autores.

2.8 LITERATURA CITADA

- ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ V, V. H. & NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:1003–1011, 2003.
- ANTELO, J.; ARCE, F.; AVENA, M.; FIOL, S.; LÓPEZ, R. & MACÍAS, F. Adsorption of a soil humic acid at the surface of goethite and its competitive interaction with phosphate. *Geoderma*, 138:12-19, 2007.
- BECH, J.; SUAREZ, M.; REVERTER, F.; TUME, P.; SÁNCHEZ, P.; BECH, J. & LANSAC, A. Selenium and other trace elements in phosphate rock of Bayovar–Sechura (Peru). *J. Geochem. Explor.*, 107:136-145, 2010.
- BRAY, R. H & KURTZ, L. T. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci.*, 59:39-45, 1945.
- BRAGA, J. M. & DEFELIPO, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. *R. Ceres*, 21:73-85, 1974.
- CORRÊA, R. M.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, F. J.; SOUZA, S. K. S. & SILVA, G. B. Disponibilidade e níveis críticos de fósforo em milho e solos fertilizados com fontes fosfatadas. *Rev. Bras. Ciênc. Agrár.*, 3:218-224, 2008.
- ERRO, J.; ZAMARREÑO, A. M & GARCÍA-MINA, J. M. Ability of various water-insoluble fertilizers to supply available phosphorus in hydroponics to plant species with diverse phosphorus-acquisition efficiency: Involvement of organic acid accumulation in plant tissues and root exudates. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 173:772–777, 2010.
- ERRO, J.; URRUTIA, O.; BAIGORRI, R.; APARICIO-TEJO, P.; IRIGOYEN, I.; STORINO, F.; MANDADO, M.; YVIN, J. C. & GARCIA-MINA, J. M. Organic complexed superphosphates (CSP): physicochemical characterization and agronomical properties. *J. Agric. Food Chem.*, 60:2008–2017, 2012.

- FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciênc. Agrotec.*, 35:1039-1042, 2011.
- FREITAS, I. F.; NOVAIS, R. F.; VILLANI, E. M. A & NOVAIS, S. A. Phosphorus extracted by ion exchange resins and Mehlich-1 from oxisols (latosols) treated with different phosphorus rates and sources for varied soil-source contact periods. *R. Bras. Ci. Solo*, 37: 667-677, 2013.
- FU, Z.; WU, F.; SONG, K.; LIN, Y.; BAI, Y.; ZHU, Y. & GIESY, J. P. Competitive interaction between soil-derived humic acid and phosphate on goethite. *Appl. Geochem.*, 36:125-131, 2013.
- GIOVANNINI, C.; GARCIA-MINA, J. M.; CIAVATTA, C. & MARZADORI, C. Effect of organic-complexed superphosphates on microbial biomass and microbial activity of soil. *Biol. Fertil. Soils*, 49:395–401, 2013.
- HARTZ, T. K. & BOTTOMS, T. G. Humic substances generally ineffective in improving vegetable crop nutrient uptake or productivity. *HortScience*, 45:906-910, 2010.
- HUA, Q. X.; LI, J. Y.; ZHOU, J. M.; WANG, H. Y.; DU, C. W & CHEN, X. Q. Enhancement of phosphorus solubility by humic substances in Ferrosols. *Pedosphere*, 18:533-538, 2008.
- KORNDÖRFER, G. H.; LARA-CABEZAS, W. A. & HOROWITZ, N. Eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. *Sci. Agri.*, 56:391–396, 1999.
- KPOMBLEKOU-A, K. & TABATABAI, M. A. Effect of low-molecular weight organic acids on phosphorus release and phytoavailability of phosphorus in phosphate rocks added to soils. *Agr. Ecosyst. Environ*, 100:275–284, 2003.
- MISHRA, M. M.; KHURANA, A. L.; DUDEJA, S. S. & KAPOOR, K. K. Effect of phosphocompost on the yield and P uptake of red gram (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.). *Trop. Agric.*, 61:174-176, 1984.
- MEHLICH, A. Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄ by North Carolina Soil Testing Laboratoris. Raleigh: University of North Carolina, 1953.
- MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Sci. Plant Anal.*, 15:1409-1416, 1984.
- MURPHY, J. & RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Chim. Acta, Oxford*, 27:31-36, 1962.
- NOVAIS, R. F. DE & SMYTH, T. J. Introdução. In: NOVAIS, R. F. & SMYTH, T. J. eds. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. 1. ed. Viçosa: UFV, 1999. p. 399.

- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. & NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. B.; ALVAREZ V, V. H.; BARRO, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B & NEVES, J. C. eds. Fertilidade dos solos. 1. ed. Viçosa: SBCS, 2007. p. 471-549.
- PERASSI, I & BORGNINO, L. Adsorption and surface precipitation of phosphate onto CaCO₃-montmorillonite: effect of pH, ionic strength and competition with humic acid. *Geoderma*, 232-234:600-608, 2014.
- RAIJ, B. Van & QUAGGIO, J. A. Determinação de fósforo, cálcio, magnésio e potássio extraídos com resina trocadora de íons. In: RAIJ, B. Van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. eds. Análise química para avaliação da fertilidade em solos tropicais. Campinas, Secretaria de Agricultura e Abastecimento, APTA/IAC, 2001. 189-199 p.
- RAIJ, B. V. Fósforo. In: RAIJ, B. V. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. p. 420.
- SANTOS, G. A.; SOUSA, R. T. X. DE & KORNDÖRFER, G. H. Lucratividade em função do uso e índice de eficiência agronômica de fertilizantes fosfatados aplicados em pré – plantio de cana-de-açúcar. *Biosci. J.*, 28:846–851, 2012.
- SINGH, C. P. & AMBERGER, A. Solubilization of rock phosphate by humic and fulvic acids extracted from atraw compost. *Agrochimica*, 41:221-228, 1997.
- SINHA, M. K. Organo-metalic phosphates I. Interaction of phosphorus compounds with humic substances. *Plant Soil*, 35:471-484, 1971.
- SILVA, F. C. & RAIJ, B Van. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:267-288, 1999.
- SILVA, F. N.; FURTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; MAGALHÃES, C. A. S. M & CARNEIRO, D. N. M. Crescimento e produção de grãos da soja sob diferentes doses e fontes de fósforo em solos distintos. *Ciênc. Agrotec.*, 33:1220–1227, 2009.
- SILVA, F. C. ed. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília: Embrapa informação tecnológica, 2009. p. 627.
- SOUSA, D. M. G. & LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2. ed. Planaltina: Embrapa, 2004. p. 416.
- URRUTIA, O.; GUARDADO, I.; ERRO, J.; MANDADO, M. & GARCIA-MINA, J. A. Theoretical chemical characterization of phosphate-metal-humic complexes and relationships with their effects

on both phosphorus soil fixation and phosphorus availability for plants. *J. Sci. Food Agric.*, 93:293–303, 2013.

WEIR, C. C. & SOPER, R. J. Interaction of phosphates with ferric organic complexes. *Can. J. Soil Sci.*, 43:393-399, 1963.

Obs: Versão preliminar do artigo submetido á Revista Brasileira de Ciência do solo, considerando que o conselho editorial da revista poderá sugerir alterações para adequá-lo ao seu próprio estilo.

3 ARTIGO 2 NUTRIÇÃO E CRESCIMENTO DE TRIGO: EFEITO DA INTERAÇÃO ÁCIDOS HÚMICOS-FERTILIZANTES FOSFATADOS⁽¹⁾

Sara Dantas Rosa⁽²⁾, Carlos Alberto Silva⁽³⁾ & Henrique José Guimarães Moreira Maluf⁽⁴⁾

3.1 RESUMO

A adição de ácidos húmicos ao solo pode reduzir a adsorção e precipitação de fósforo (P) por meio do bloqueio dos sítios de adsorção e a complexação com Ca, Al e Fe, como consequência, pode promover o crescimento vegetal. Objetivou-se avaliar o P disponível no solo, o conteúdo de P e o crescimento da planta de trigo (*Triticum aestivum*) cultivadas em solo de textura média adubado com concentrações crescentes de C-ácidos húmicos (AH) de 0, 5, 10, 50 e 100 mg kg⁻¹, combinadas com duas doses de P (100 e 400 mg kg⁻¹ de P), supridas na forma de fosfato de Araxá e superfosfato simples. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em vaso com amostras da camada superficial (0-20 cm) de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd). O trigo foi cultivado por 43 dias, sendo determinada a massa seca parte aérea (MSPA), massa seca raiz (MSR), massa seca total (MST), além de P disponível determinado por resina mista e conteúdo de P na parte aérea. Adotou-se esquema fatorial 5 (concentrações de C-AH) x 2 (fontes de P) x 2 (doses de P). O efeito das concentrações de C-AH sobre o P disponível depende da fonte e dose de P aplicada. Foi observado efeito das concentrações de C-AH, quando se utilizaram 400 mg kg⁻¹ P de fosfato de Araxá, sobre a biomassa e acúmulo de P. O efeito das concentrações de ácidos húmicos para as variáveis de planta estudadas depende da fonte e dose de P aplicada.

Termos de indexação: crescimento radicular. Extratores de P. Fixação de P. Matéria orgânica. Solubilização de rochas fosfatadas.

¹ Parte da Dissertação de Mestrado da primeira autora.

² Mestranda em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). Bolsista Capes. E – mail: saradantas@agronoma.eng.br

³ Professor Associado do Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). E – mail: csilva@des.ufla.br

⁴ Doutorando em Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras – UFLA. Caixa Postal 37, CEP 37200-000 Lavras (MG). Bolsista Capes. E – mail: maluf.henrique@yahoo.com.br

3.2 SUMMARY: WHEAT NUTRITION AND GROWTH AS AFFECTED BY THE HUMIC ACIDS-PHOSPHATE FERTILIZERS INTERACTION

*The addition of humic acids in soil can reduce the adsorption of P to soil minerals as well as precipitation of phosphate with Ca, Al and Fe, as a consequence, can promote plant growth. The objective was to evaluate the available P in soil, the contents of P and the growth of the wheat plant (*Triticum aestivum*) grown in medium texture soil fertilized with increasing concentrations of C-humic acids (HA) of 0, 5, 10, 50 and 100 mg kg⁻¹, combined with two rates of P (100 and 400 mg kg⁻¹ P) supplied by Araxá phosphate and single superphosphate. The experiment was conducted in greenhouse with samples of Red-Yellow Latosol (LVAd) collected in depth 0-20 cm. The wheat was cultivated during for 43 days, it was determined the shoot (MSPA), root (MSR) and total (MST) dry mass, and available P by resin, as well as the accumulated P in wheat shoot. Was adopted factorial scheme 5 (C-AH concentrations) x 2 (P sources) x 2 (P levels). The effect of C-AH concentrations on soil available P depends on the P source and rate. It was observed effect of C-HA concentrations were used 400 mg kg⁻¹ P by Araxá phosphate on biomass accumulation and P. The effect of humic acids concentrations for plant variables it depends on the source and rate P applied.*

Index terms: root growth. Soil P tests. P fixation. Organic matter. P rock solubilization.

3.3 INTRODUÇÃO

O fósforo (P), apesar de ser pouco requerido pelas culturas, é depois do nitrogênio, o nutriente que mais limita a produção em solos altamente intemperizados com predominância de argilominerais com grande capacidade de reter o P, tais como os óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) (Novais & Smyth, 1999; Novais et al., 2007). Nesses solos, é necessária a aplicação de grandes quantidades de adubo fosfatado, visando diminuir ou eliminar a adsorção de P no solo, de modo a atender as exigências das culturas. Com isso, a aplicação de grandes quantidades de adubo fosfatado aumenta o custo de produção das lavouras no país (Sousa & Lobato, 2004), uma vez que matérias-primas são majoritariamente importadas (IFA, 2014).

Aumentar a eficiência da adubação fosfatada é, portanto, um desafio e o uso de ácidos húmicos (AH) tem sido proposto como alternativa viável. O uso de AH pode aumentar a disponibilidade de P ao

competir com os íons fosfatos por sítios de adsorção de P no solo, por meio da complexação de Fe e Al, que precipitam o fosfato, além da geração de campo eletrostático negativo repulsivo em torno dos sítios de adsorção do P (Andrade et al., 2003; Hua et al., 2008; Fu et al., 2013; Giovannini et al., 2013; Perassi & Borgnino, 2014). Erro et al. (2012) observaram que os complexos contendo P e AH são mais eficientes em disponibilizar P às plantas de trigo que o superfosfato simples. Segundo os autores, esse efeito foi associado ao fato de o P complexado a ligantes orgânicos não ser fixado no solo, porém ressaltaram que a eficiência desse complexo depende das características do solo.

Além de promover a disponibilização de P e de outros nutrientes, os AH exercem efeitos diretos na promoção do crescimento da planta, sendo estimado um acréscimo médio de cerca de 20%, tanto sobre o crescimento da parte aérea quanto da raiz (Rose et al., 2014). O efeito mais estudado, entretanto, é ligado ao estímulo do crescimento de raízes (Canellas et al., 2002; Canellas et al., 2009; Busato et al., 2010; Silva et al., 2011). Wang et al. (1995) observaram aumento da produção de trigo com adição de AH. Segundo os autores, quando os AH foram combinados com o P, o incremento foi ainda maior. Malik & Azam (1985) utilizaram diferentes concentrações de AH no cultivo de trigo e verificaram incremento na raiz e parte aérea, sendo que a concentração de 54 mg L⁻¹ de AH proporcionou um aumento de 22% na massa seca da parte aérea.

O suprimento adequado de P às plantas engloba fontes de liberação rápida ou lenta. O superfosfato simples (SS) tem alta eficiência agrônômica (Sousa & Lobato, 2004; Silva et al., 2009) e seu uso pode implicar em fixação elevada de P no solo, devido à alta solubilidade (Korndörfer et al., 1999). Já os fosfatos naturais (FNs) possuem baixa eficiência agrônômica, como o fosfato de Araxá (FA), no qual a dissolução lenta pode reduzir a adsorção do fósforo no solo, já que este é liberado aos poucos para as plantas. Por outro lado, essa lenta liberação de P pode não ser suficiente para atender, em tempo hábil, a demanda das culturas, principalmente as de ciclo curto (Kpombrekou-a & Tabatabai, 2003).

Os FNs, em solos mais ricos em MO, ou com a presença de ligantes orgânicos, como o AH, podem ter a sua solubilização otimizada, por meio da complexação do AH com CaCO₃ livres das rochas fosfáticas e posterior liberação de P (Mishra et al., 1984) e também com a possível complexação de íons metálicos presentes nas rochas fosfáticas, com subsequente liberação de P, assim como ocorre com ácidos orgânicos de baixa massa molecular (Kpombrekou-a & Tabatabai, 2003). Autores como Mishra et al. (1984) e Singh & Amberger (1997) relataram maior solubilização de P de rochas fosfáticas utilizando-se AH. Esse comportamento diferenciado dos fosfatos depende, assim, da interação da rocha

com o solo, com a MOS e com ligantes orgânicos presentes ou adicionados no solo via utilização de ácidos húmicos.

Assim, é possível que o uso de AH aumente o P disponível no solo, pela diminuição da fixação de P e pela interação com a rocha fonte do nutriente, aumentando a solubilização do P. Em solos, os AH podem ainda interagir com os microrganismos, aumentando a atividade microbiana e imobilizando o P na biomassa do solo. Além disso, a magnitude dos efeitos dos AH é dependente da concentração aplicada. É esperado também que os AH atuem sobre as plantas, promovendo maior crescimento de parte aérea e raiz, o que pode assegurar maior eficiência da utilização de P. Diante do exposto e da necessidade de aumentar a eficiência de fertilizantes fosfatados nas lavouras brasileiras, objetivou-se: avaliar a massa seca da parte aérea, massa seca raiz e massa seca total de plantas de trigo, além do conteúdo de P e teor de P disponível em solo de textura média adubado com concentrações crescentes de C-AH, combinadas com duas doses de P (100 e 400 mg kg⁻¹ de P), suprido na forma de fosfato de Araxá e superfosfato simples.

3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação e as análises foram realizadas no Laboratório de Estudo da Matéria Orgânica do Solo (LEMOS), ambos localizados no DCS/Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG. Foram utilizadas amostras da camada superficial (0-0,2 m) de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico de textura média (LVAd), com as seguintes características: pH em água, 4,9; K, 48 mg dm⁻³; P, 0,8 mg dm⁻³; Ca, 0,1 cmol_c dm⁻³; Mg, 0,1 cmol_c dm⁻³; Al, 0,6 cmol_c dm⁻³; H+Al, 3,2 cmol_c dm⁻³; SB, 0,3 cmol_c dm⁻³; t, 0,9 cmol_c dm⁻³; T, 3,6 cmol_c dm⁻³; V, 9,7%; m 63,4 %; MO, 1,4 dag kg⁻¹ e P remanescente, 27,3 mg L⁻¹. O solo, classificado como de textura média, contém 250 g kg⁻¹ de argila, 20 g kg⁻¹ de silte e 730 g kg⁻¹ de areia.

As amostras de solo foram passadas em peneira de malha de 8 mm, para retirada de galhos e raízes. O solo foi distribuído em sacos com aproximadamente 4,2 kg e incubados com CaCO₃ e MgCO₃, na proporção 3:1, por aproximadamente 20 dias, para correção da acidez e elevação da saturação por bases a 60%, sendo a umidade de água mantida próxima de 70% da capacidade de campo. Em sequência, os solos foram secos e passados em peneira com malha de 4 mm e distribuídos em vasos, que receberam 1,4 kg de solo.

Os tratamentos foram constituídos por fatorial 5 x 2 x 2, sendo testadas cinco concentrações de carbono na forma de ácidos húmicos (C-AH): 0, 5, 10, 50 e 100 mg kg⁻¹, duas doses de P: 100 e 400 mg kg⁻¹, na forma de superfosfato simples (SS) e fosfato de Araxá (FA). O experimento foi composto de 20 tratamentos, totalizando 60 parcelas, dispostas em delineamento de blocos casualizados, com o uso de três repetições.

Foi utilizado AH p.a. da marca Sigma-Aldrich®, com as seguintes características: pH em água, 9,8; C, 376 g kg⁻¹; N, 7,65 g kg⁻¹; P, 0,28 g kg⁻¹; K, 6,3 g kg⁻¹; Ca, 5,9 g kg⁻¹; Mg, 0,31 g kg⁻¹; S, 4,44 g kg⁻¹; Fe, 1,09 g kg⁻¹; Cu, 39,9 mg kg⁻¹; Mn, 14,8 mg kg⁻¹ e Zn, 21,8 mg kg⁻¹. As concentrações de AH foram calculadas em relação ao teor de C presente no produto. A quantidade de adubo fosfatado foi calculada em função da solubilidade de P em ácido cítrico a 2% (AC 2%), para o fosfato de Araxá (3% de P solúvel em AC 2%), e em citrato neutro de amônio (CNA) + água, para o superfosfato simples (17% de P em CNA+água). A análise química dos fertilizantes fosfatados foi realizada em laboratório, seguindo o método colorimétrico do ácido molibdovanadofosfórico presente no Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes da Embrapa (2009), e é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Teores de P₂O₅ total, solúvel em citrato neutro de amônio (CNA) + água, água e ácido cítrico em fosfato de Araxá e superfosfato simples

Fertilizante	Total	CNA + água	Água	Ác. Cítrico
		-----%-----		
Fosfato de Araxá	27	2	0,17	3
Superfosfato Simples	19	17	12	14

As misturas solo-fonte de P- doses de P- concentrações C-AH foram incubadas por aproximadamente 15 dias, para equilíbrio das reações, mantendo os vasos com a umidade próxima a 70% da capacidade de campo.

As sementes de trigo (*Triticum aestivum*) utilizadas foram da cultivar BRS 264, precoce, com ciclo de 50 dias, da emergência ao espigamento, e de 110 dias, da emergência à maturação, com alto rendimento de grãos. Segundo a classificação de qualidade industrial, a cultivar é a do tipo “Trigo Pão” classe industrial, empregada na fabricação de massas alimentícias, bolachas e pão industrial (Albrecht et al., 2006). Foram semeadas 5 sementes de trigo e, no mesmo dia, foi realizada uma adubação de micronutrientes, com a adição de 1 mg kg⁻¹ de B, 2 mg kg⁻¹ de Zn, 6 mg kg⁻¹ de Mn e 1,5 mg kg⁻¹ de Cu

e de macronutrientes, com a adição de 100 mg kg^{-1} de N e K. Foram, ainda, realizadas duas adubações de cobertura, com a adição de 100 mg kg^{-1} , de N e K, no 18º e 34º dia após o plantio. No 9º dia após a semeadura, foi realizado o desbaste, permanecendo três plantas por vaso, que foram cultivadas durante 43 dias. A irrigação foi realizada de forma manual, com reposição da água diária, tanto na parte da manhã quanto no final da tarde; em dias mais quentes, foi realizada uma irrigação adicional ao meio-dia.

A parte aérea foi cortada e a raiz foi separada manualmente do solo e lavada, até a retirada total do solo. Posteriormente, a parte aérea e raiz foram armazenadas em sacos de papel, deixadas em casa de vegetação por um dia, para a pré-secagem e, depois, levadas à estufa por 72 h, a 70°C . Depois de retiradas da estufa, foram pesadas, para a determinação da massa seca parte aérea (MSPA) e massa seca raiz (MSR). Com a soma da massa seca parte aérea e raiz, obteve-se a massa seca total (MST). A MSPA foi moída em moinho tipo Willey, para posterior determinação de P, utilizando-se a solução nitroperclórica e os teores de P determinados por colorimetria. O conteúdo de P foi obtido multiplicando-se a concentração do nutriente pela MSPA.

Após o cultivo do trigo, amostras de solo das parcelas foram secas e passadas em peneira de malha de 2 mm, para análises de P disponível pela resina mista (Raj et al., 2001), com determinação de teor por colorimetria, de acordo com Murphy & Riley (1962). A extração foi realizada na proporção de solo-extrator de 1:10 (v/v). A resina mista consistia em uma mistura de resinas de troca catiônica e aniônica saturadas com bicarbonato de sódio, utilizada na extração do P.

Os dados foram submetidos à análise de variância e de regressão, utilizando-se o programa computacional SISVAR 5.3 (Ferreira, 2011). Os modelos de regressão foram selecionados com base no menor valor da soma de quadrados do erro, significância dos parâmetros da equação ($p < 0,05$) e no maior valor do coeficiente de determinação (R^2) ajustado. Os dados qualitativos (fontes e doses de P, na ausência de interação com concentrações de C-AH), quando significativos na análise de variância, tiveram suas médias comparadas pelo teste de Scott-Knott, ao nível de 5 % de probabilidade. Foi realizada correlação de Pearson para avaliar o grau de associação dos atributos avaliados.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Produção de massa seca

Para a variável massa seca raiz (MSR), foi significativa ($p < 0,05$) a interação entre fonte de P, dose de P e concentração de C-AH (Figura 1). A produção MSR se ajustou ao modelo quadrático para a dose de 400 mg kg⁻¹ P, para as fontes FA e SS, com crescimento máximo de raiz nas concentrações de 71 e 41 mg kg⁻¹ de C-AH, respectivamente. Para as doses de 100 mg kg⁻¹ de SS e FA, não foi observado efeito das diferentes concentrações de C-AH. O maior desenvolvimento de raiz no tratamento com FA, em relação ao SS, poderia ser relacionado a um possível crescimento de raiz em busca de nutrientes no solo, uma vez que FA é uma fonte de baixa solubilidade e sua disponibilidade de P no solo é menor que a do SS. No entanto, não foi observado diferença no P-resina entre as fontes de P, para a dose de 100 mg kg⁻¹ (Figura 6).

Os AH podem aumentar a disponibilização de P e de outros nutrientes e promoverem maior crescimento da planta, tanto da parte aérea quanto da raiz (Canellas et al, 2002; Canellas et al., 2009; Busato et al., 2010; Silva et al., 2011). Autores relatam maior desenvolvimento do trigo tanto parte aérea quanto raiz com a utilização de concentrações de AH, e que quando adicionados junto com P, o crescimento é ainda maior (Malik & Azam, 1985; Wang et al., 1995).

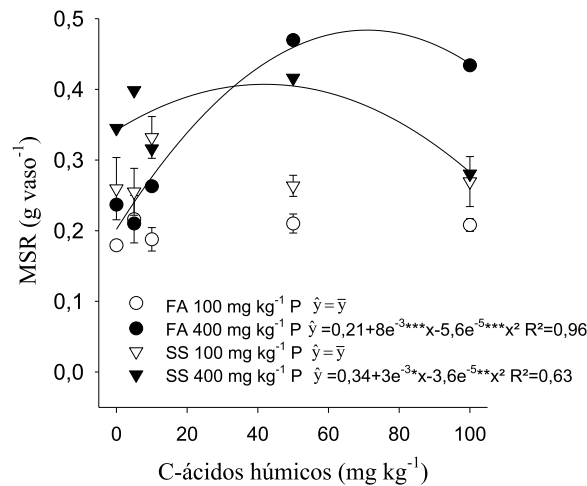


Figura 1– Massa seca raiz (MSR) em função de concentrações de C-ácidos húmicos em combinação com doses e fontes de P. *, ** e *** parâmetros da equação significativos a 5%, 1% e < 1%. Barras representam o erro padrão da média.

Os AH apresentam comportamento semelhante ao das auxinas (Rima et al., 2011; Silva et al.; 2011). Rima et al. (2011), trabalhando com plântulas de milho tratadas com AH extraídos de vermicomposto, observaram aumento do número de sítios de mitose na raiz, encurtamento do eixo principal da raiz e emissão de raízes laterais, alterações morfoanatômicas típicas de concentrações elevadas de auxinas exógenas. Canellas et al. (2011) utilizaram um gene repórter para atividade auxínica (DR5:GUS) e verificaram que os AH isolados de vermicompostos atuam simulando o comportamento das auxinas. Busato et al. (2010) avaliaram o uso de diferentes concentrações de substâncias húmicas sobre o crescimento radicular do milho e observaram aumento na área de superfície radicular e que esses incrementos foram relacionados com a promoção da atividade da H^+ -ATPase de membrana plasmática.

O maior crescimento radicular na presença de AH tem sido associado em diversos trabalhos à ativação da atividade da H^+ -ATPase na membrana plasmática de células radiculares (Canellas et al., 2002; Zandonadi et al., 2007; Canellas et al., 2009; Busato et al., 2010; Rima et al., 2011). Os transportadores de íons secundários são energizados pelo gradiente eletroquímico gerado pelas bombas de prótons, favorecendo a absorção de nutrientes pela planta (Rima et al., 2011). Além disso, o abaixamento do pH no apoplasto gerado pela hidrólise do ATP e transporte de 3 a 5 moles de H^+ por unidade de ATP hidrolisada favorece a ação de enzimas genericamente conhecidas como expansinas, que realizam a hidrólise de polissacarídeos da parede celular (Rayle & Cleland, 1992). Com o rompimento das ligações entre celulose, hemicelulose e ligninas, a parede celular fica mais frouxa, permitindo a expansão celular provocada pelo aumento da pressão de turgor; essa é a base da teoria do crescimento ácido que é acionada pela presença de auxinas (Rayle & Cleland, 1992).

Para a variável massa seca parte aérea (MSPA), foram significativas ($p < 0,05$) as interações entre dose de P e concentração de C-AH, e entre fonte de P e concentração de C-AH (Figura 2), além da interação entre fonte de P e dose P (Figura 3). Para a interação entre dose de P e concentração de C-AH, a produção da MSPA se ajustou ao modelo quadrático, para a dose de 400 mg kg^{-1} de P, com ponto de máxima produção na concentração de 50 mg kg^{-1} de C-AH. Já na dose de 100 mg kg^{-1} de P, não houve diferenças entre valores de MSPA, para as diferentes concentrações de AH.

Era esperado que a maior dose de 400 mg kg^{-1} proporcionasse uma maior produção de MSPA, em relação a menor dose de 100 mg kg^{-1} , em função da maior disponibilidade de P para a planta de trigo. Já na interação entre fonte P e concentração de C-AH, a produção de MSPA se ajustou ao modelo quadrático para o FA, com máxima produção na concentração de 52 mg kg^{-1} C-AH. Foi observado

decréscimo linear na produção de MSPA em função do aumento da concentração de C-AH, com o uso de SS.

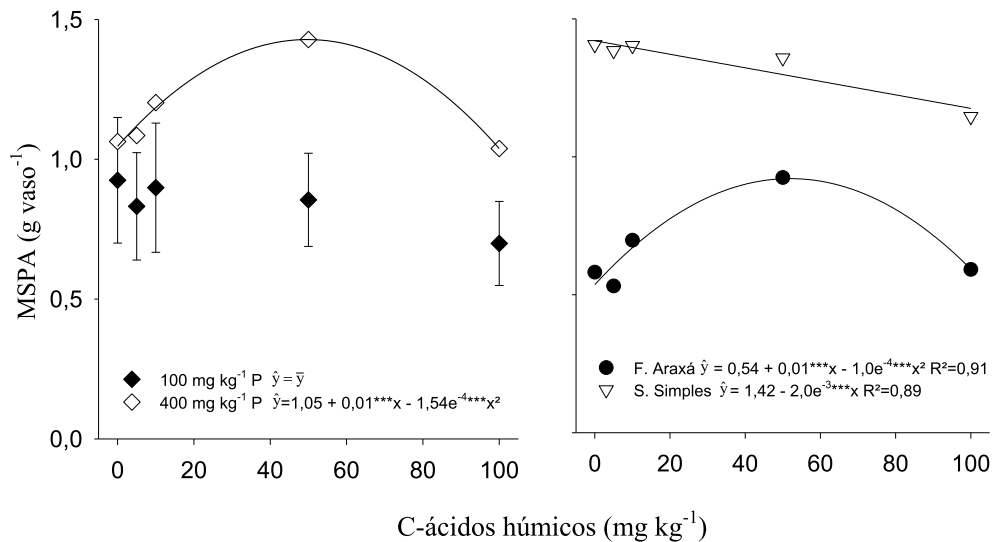


Figura 2 – Massa seca parte aérea (MSPA) em função de concentrações de C-ácidos húmicos e da dose de P e em função de efeitos de concentrações de C-ácidos húmicos e fonte de P. *, ** e *** parâmetros da equação significativos a 5%, 1% e < 1%. Barras representam o erro padrão da média.

Na interação fonte com dose de P (Figura 3), para as doses 100 e 400 mg kg⁻¹ de P, o SS resultou em maior produção de MSPA que o FA, o que é esperado em função da maior solubilidade e eficiência agrônômica do SS (Sousa & Lobato 2004; Novais et al., 2007; Silva et al., 2009; Santos et al., 2012).

Em relação à MSPA, foi observado efeito negativo, ou seja, diminuição de MSPA com acréscimo da concentração de C-AH (Figura 2). O contrário foi observado com o uso do FA, isso é, houve um efeito positivo das concentrações de C-AH. É observado um decréscimo após o ponto máximo, para as interações entre dose P e concentração C-AH, e entre a fonte P e a concentração de C-AH. O AH no solo estimula a atividade microbiana; mesmo os AH sendo uma fração da MO com alto grau de humificação e elevada recalcitrância e estabilidade química, com sua adição no solo, é possível que haja maior imobilização de nutrientes, entre esses, de P. Foi observado anteriormente, no trabalho de Giovannini et al. (2013), aumento da atividade microbiana proporcional às concentrações de AH.

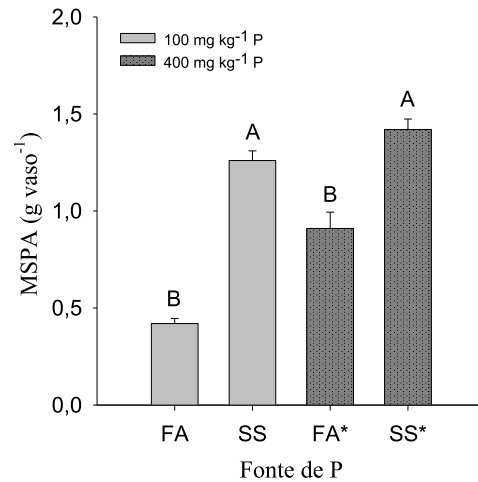


Figura 3- Massa seca parte aérea (MSPA) em função das doses de 100 e 400 mg kg⁻¹ de P, para fosfato de Araxá (FA) e superfosfato simples (SS). Letras iguais em colunas da mesma cor denotam que as médias para fontes de P não diferem entre si estatisticamente ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

Teoricamente, as concentrações mais altas de AH disponibilizam mais P em função do bloqueio dos sítios de adsorção, pois o solo de textura média apresenta poucos sítios de adsorção, sendo os AH capaz de bloqueá-los, ao mesmo tempo mais P é imobilizado em decorrência da maior disponibilidade. Outra hipótese para o decréscimo de MSPA, após a máxima produção, é que concentrações elevadas de AH pode inibir o desenvolvimento das plantas.

A maior produção de MSPA com FA, em função do acréscimo na concentração de C-AH, indica uma interação dos AH com a rocha fosfatada. Possivelmente, o FA tem sua solubilização otimizada pelos AH, por meio da complexação de íons metálicos e Ca presentes nas rochas fosfáticas, com subsequente liberação de P, disponibilizando mais P para planta e, como consequência, propiciando maior crescimento do trigo. Autores como Mishra et al. (1984) e Singh & Amberger (1997) relataram, previamente, maior solubilização de P de rochas fosfáticas utilizando AH.

A produção de MSPA é afetada pelas concentrações de C-AH em função da dose e da fonte de P, ou seja, é alterada com a dose de 400 mg kg⁻¹ de P, quando se utilizou o FA. Tahir et al. (2011), trabalhando com trigo e diferentes concentrações de AH, verificaram que a aplicação de 60 mg kg⁻¹ de AH afetou positivamente o crescimento da planta, massa fresca e seca da parte aérea, sendo observado

efeito negativo com a concentração de 90 mg kg⁻¹. Os autores não observaram diferenças nos teores de P nas plantas de trigo. Erro et al. (2012), comparando a eficiência do superfosfato simples e superfosfato complexado em plantas de trigo, constataram maior produção de MSPA e MSR quando o fosfato foi complexado aos ácidos húmicos.

Para a variável massa seca total (MST), foi significativa ($p < 0,05$) a interação entre fonte de P, dose de P e concentração de C-AH (Figura 4). A produção de MST se ajustou ao modelo quadrático, para a dose de 400 mg kg⁻¹ P, com o uso do SS e FA, com crescimento máximo nas concentrações de 56 e 0,0001 mg kg⁻¹ de C-AH, para FA e SS, respectivamente. Os valores de MST para o SS 400 mg kg⁻¹ foram significativos em função da influência do material húmico na raiz, única variável que respondeu positivamente ao acréscimo nas concentrações de C-AH. Para a fonte SS 100 mg kg⁻¹, ocorreu uma diminuição de MST de forma linear, e para FA 100 mg kg⁻¹ não foram observadas diferenças entre os valores de MST, para as diferentes concentrações de C-AH. A produção de MST foi superior com o uso de FA, após a concentração de 50 mg kg⁻¹ de C-AH. Essa maior produção de MST com FA foi relacionada com o maior crescimento de raiz, uma vez que, ao se observar MSPA, os valores para SS são superiores aos do FA. Isso pode indicar um maior desenvolvimento de raiz em função da fonte de P.

É possível sugerir que com a fonte menos solúvel de P no solo, as plantas e microrganismos exsudam mais ácidos orgânicos no meio para solubilização de fontes insolúveis de P. Foi observado que plântulas de milho tratadas com ácidos húmicos têm seu perfil de exsudação de ácidos orgânicos alterado para maior produção de ácidos cítrico, oxálico e succínico (Canellas et al., 2008). Ácidos orgânicos de cadeia curta tem a habilidade de quebrar a interação entre as diversas moléculas que compõem o arranjo supramolecular húmico, liberando substâncias bioativas para o meio (Piccolo, 2002), o que induz e promove o crescimento radicular, como observado neste estudo.

Para a relação MSR/MSPA, foi significativa ($p < 0,05$) a interação entre fonte de P e concentração C-AH (Figura 4), na qual o modelo linear se ajustou aos dados de FA, ocorrendo maiores valores da relação com o aumento das concentrações de C-AH. Esses resultados indicam que há um crescimento maior de raiz em relação a parte aérea com o aumento das concentrações de C-AH, quando se utiliza o FA.

Ainda que os AH demonstrem aumentar o P disponível quando utilizado FA, com base no maior acúmulo de P pela planta (Figura 5.a), o valores de P acumulado para FA são inferiores aos verificados

para o SS, podendo isso se justificar pelo maior desenvolvimento de raiz, quando a fonte de P é o FA. Para SS, não houve efeito das concentrações de C-AH sobre a relação MSR/MSPA.

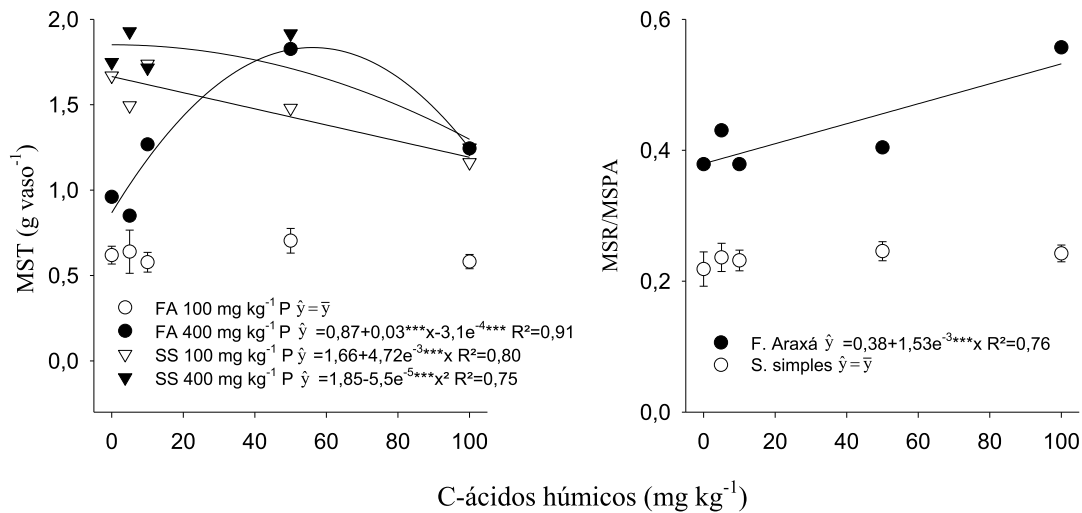


Figura 4 – Massa seca total (MST) em função de concentrações de C-ácidos húmicos, em combinação com doses e fontes de P. Relação massa seca raiz e massa seca parte aérea (MSR/MSPA) em função de concentrações de C-ácidos húmicos em combinação com fontes de P. *, ** e *** parâmetros da equação significativos a 5%, 1% e < 1%. Barras representam o erro padrão da média.

3.5.2 Conteúdo de P

Para o conteúdo de P, foram significativas ($p < 0,05$) as interações entre fonte de P e dose de P, e entre fonte de P e concentração de C-AH (Figura 5). Quando ocorreu a interação entre fonte de P e concentração de C-AH (Figura 5.a), o conteúdo de P aumentou de forma quadrática para a fonte FA, com o aumento das concentrações de AH, sendo o conteúdo máximo de P obtido com concentração de 53 mg kg⁻¹ C-AH. Com o uso de fonte solúvel de P (SS), não houve diferenças no conteúdo de P com o aumento das concentrações de C-AH. Para a interação entre fonte de P e dose de P (Figura 5.b), maiores conteúdos de P ocorreram para a fonte SS, em relação ao FA, independentemente da dose de P, 100 ou 400 mg kg⁻¹. Os resultados indicaram que o conteúdo de P na MSPA de plantas adubadas com SS foi superior ao das adubadas com FA, e que as concentrações de AH favorecem o acúmulo de P, quando se utiliza o FA.

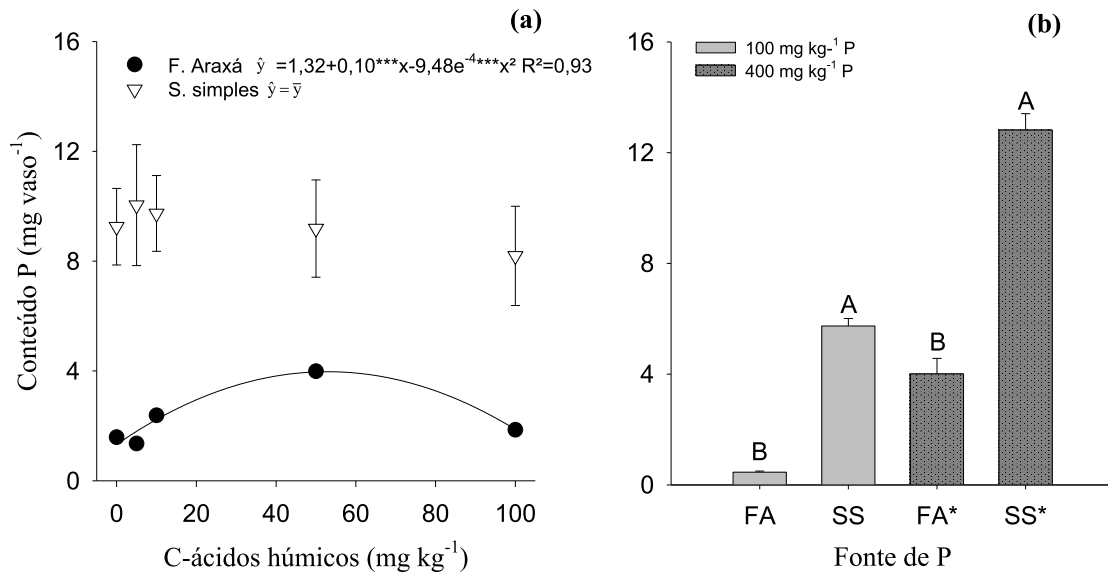


Figura 5 - (a) Conteúdo de P em função das concentrações de C-ácidos húmicos e fontes de P (fosfato de Araxá e superfosfato simples). *, ** e *** parâmetros da equação significativos a 5%, 1% e < 1%. Barras representam o erro padrão da média. (b) Conteúdo de P em relação às doses de 100 e 400 mg kg⁻¹ de P para fosfato de Araxá (FA) e superfosfato simples (SS), letras iguais, em colunas de mesma cor, denotam que as médias para fontes de P não diferem entre si estatisticamente ($p < 0,05$) pelo teste de Scott-Knott.

3.5.3 P disponível

Os dados relativos aos teores de P disponíveis obtidos pelo extrator resina mista, ao termino do experimento, são apresentados na Figura 6. Houve interação ($p < 0,05$) entre fonte de P, dose de P e concentração de C-AH. O tratamento com FA, 400 mg kg⁻¹, os teores de P disponível decrescem de forma quadrática com o aumento das concentrações de C-AH, sendo o maior teor de P-resina na concentração de 0,02 mg kg⁻¹ de C-AH, que proporcionou 142 mg dm⁻³ de P disponível. Para os demais tratamentos, SS 100 e 400 mg kg⁻¹ de P e FA 100 mg kg⁻¹, não houve diferenças nos teores de P disponível em função das concentrações de C-AH.

O efeito da concentração de C-AH para P disponível depende da fonte de P e da dose do nutriente aplicada. Como uso de FA os teores de P disponível diminuem com o aumento da concentração de C-

AH. Os decréscimos nos valores de P disponível no tratamento FA 400 mg kg⁻¹ estão relacionados a um maior acúmulo de P pelas plantas submetidas a esse tratamento (Figura 5). Esses resultados demonstram que as concentrações de C-AH para FA 400 mg kg⁻¹ tiveram efeito positivo, refletindo em maior acúmulo de P, disponibilizando mais P para as plantas. Não houve efeito das concentrações de C-AH sobre o P disponível, para a dose de 100 mg kg⁻¹ de P; isso pode ocorrer por se tratar de uma dose muito baixa de P, onde as interações com planta, solo e microrganismos mascaram os efeitos dos AH.

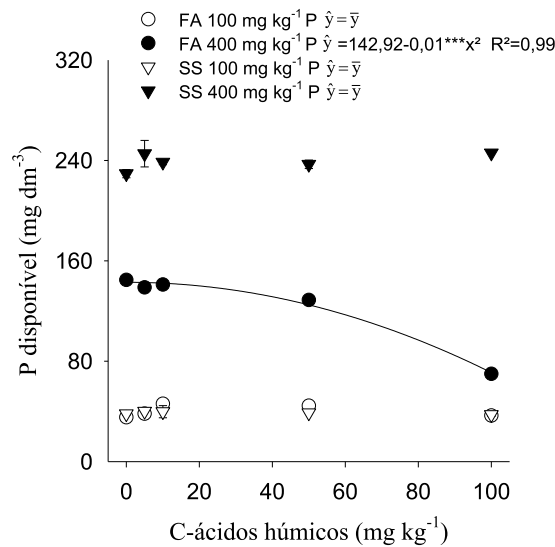


Figura 6- Teores disponíveis de P em solo extraídos pelo extrator resina mista, em função da interação entre concentração de C-ácidos húmicos, dose de P e fonte de P. *, ** e *** parâmetros da equação significativos aos níveis de 5%, 1% e < 1% de probabilidade. Barras representam o erro padrão da média.

3.5.4 Estudo de correlação

Os resultados referentes às correlações entre dados de planta com o P-solo são apresentados na figura 7. Quando correlacionados o teor de P disponível com os atributos conteúdo de P, MSPA, MST e MSR, independentemente da fonte e dose de P utilizada, e quando separadas as fontes de P, FA e SS, os atributos que apresentaram boa correlação foram o P-resina com o conteúdo de P. Esses resultados demonstram que, independentemente, da fonte e dose de P utilizada, o P disponível extraído por resina representa o conteúdo de P acumulado na planta.

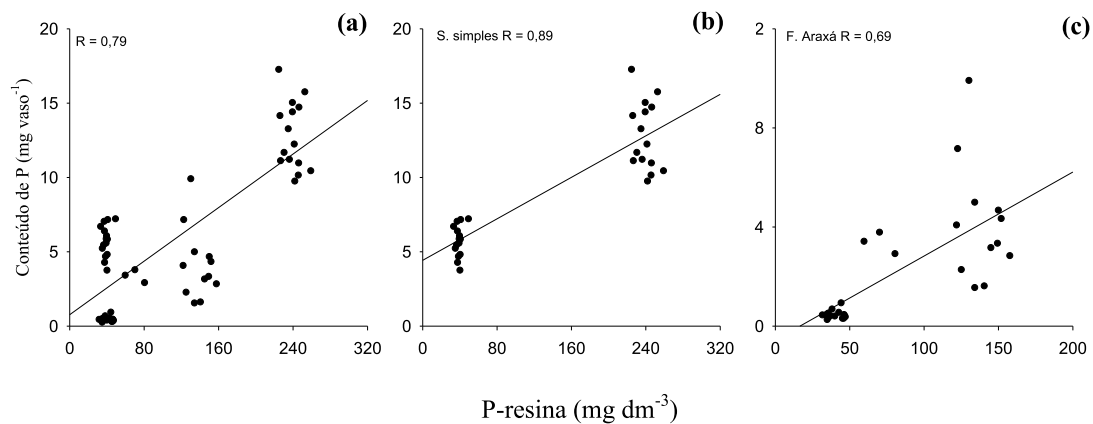


Figura 7- Relação entre o P disponível obtido pela resina mista com conteúdo de P, para diferentes fontes e doses de P (a), e para as superfosfato simples (b) e fosfato de Araxá (c).

3.6 CONCLUSÕES

- 1- Os efeitos das concentrações de ácidos húmicos na massa seca parte aérea, massa seca raiz, massa seca total, conteúdo de P e P disponível dependem da fonte e dose de P aplicada.
- 2- Houve incremento de massa seca parte aérea, massa seca raiz, massa seca total e conteúdo de P em função das concentrações de ácidos húmicos, quando se utilizou o fosfato de Araxá.
- 3- Os ácidos húmicos induzem o crescimento radicular, independentemente da fonte de fósforo utilizada, sendo mais pronunciado o crescimento de raiz quando se aplica o fosfato de Araxá.
- 4- O conteúdo de P em plantas de trigo é regulado pela disponibilidade de P-resina.

3.7 LITERATURA CITADA

ALBRECHT, J. C.; SILVA, M. S.; ANDRADE, J. M. V.; SCHEEREN, P. L.; TRINDADE, M. G.; SOARES SOBRINH, J.; SOUSA, C. N. A.; BRAZ, A. J. B. P.; RIBEIRO JÚNIOR, W. Q. R.; SOUSA, M. A.; FRONZA, V. & YAMANAKA, C. H. Trigo BRS 264: cultivar precoce com alto

- rendimento de grãos indicada para o Cerrado do Brasil Central. 1. ed. Planaltina: Embrapa, 2006. 20 p.
- ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ V, V. H. & NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:1003–1011, 2003.
- BUSATO, J. C.; ZANDONADI, D. B.; DOBBSS, L. B.; FAÇANHA, A. R. & CANELLAS, L. P. Humic substances isolated from residues of sugar cane industry as root growth promoter. *Sci. Agri.*, 67:206-212, 2010.
- CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L.; OKOROKOVA-FAÇANHA, A. L. & FAÇANHA, A. R. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence, and plasma membrane H⁺-ATPase activity in maize roots. *Plant Physiol.*, 130:1951-1057, 2002.
- CANELLAS, L. P.; SPACCINI, R.; PICCOLO, A.; DOBBSS, L. B.; OKOROKOVA-FAÇANHA, A. L.; SANTOS, G. A.; OLIVARES, F. L. & FAÇANHA, A. R. Relationships between chemical characteristics and root growth promotion of humic acids isolated from Brazilian oxisols. *Soil Sci.*, 174:611-619, 2009.
- CANELLAS, L. P.; TEIXEIRA JUNIOR, L. R. L.; DOBBSS, L. B.; SILVA, C. A.; MEDICI, L. O.; ZANDONADI, D. B. & FAÇANHA, A. R. Humic acids crossinteractions with root and organic acids. *Ann. Appl. Biol.*, 153: 157-166, 2008.
- CANELLAS, L. P.; DANTAS, D. J.; AGUIAR, N. O.; PERES, L. E. P.; ZSÖGÖN, F. L.; DOBBSS, L. B.; FAÇANHA, A. R.; NEBBIOSO, A. & PICCOLO. A. Probing the hormonal activity of fractionated molecular humic components in tomato auxin mutants. *Ann. Appl. Biol.*, 159: 202-211, 2011.
- ERRO, J.; URRUTIA, O.; BAIGORRI, R.; APARICIO-TEJO, P.; IRIGOYEN, I.; STORINO, F.; MANDADO, M.; YVIN, J. C. & GARCIA-MINA, J. M. Organic complexed superphosphates (CSP): physicochemical characterization and agronomical properties. *J. Agric. Food Chem.*, 60:2008–2017, 2012.
- FERREIRA, D.F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciênc. Agrotec.*, 35:1039-1042, 2011.
- FU, Z.; WU, F.; SONG, K.; LIN, Y.; BAI, Y.; ZHU, Y. & GIESY, J. P. Competitive interaction between soil-derived humic acid and phosphate on goethite. *Appl. Geochem.*, 36:125-131, 2013.

- GIOVANNINI, C.; GARCIA-MINA, J. M.; CIAVATTA, C. & MARZADORI, C. Effect of organic-complexed superphosphates on microbial biomass and microbial activity of soil. *Biol. Fertil. Soils*, 49:395–401, 2013.
- HUA, Q. X.; LI, J. Y.; ZHOU, J. M.; WANG, H. Y.; DU, C. W & CHEN, X. Q. Enhancement of phosphorus solubility by humic substances in Ferrosols. *Pedosphere*, 18:533-538, 2008.
- INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION. IFADATA. Disponível em: <http://ifadata.fertilizer.org/ucSearch.aspx>. Acesso em: 08 mar. 2015.
- KORNDÖRFER, G. H.; LARA-CABEZAS, W. A. & HOROWITZ, N. Eficiência agronômica de fosfatos naturais reativos na cultura do milho. *Sci. Agri.*, 56:391–396, 1999.
- KPOMBLEKOU-A, K. & TABATABAI, M. A. Effect of low-molecular weight organic acids on phosphorus release and phytoavailability of phosphorus in phosphate rocks added to soils. *Agr. Ecosyst. Environ.*, 100:275–284, 2003.
- MALIK, K. A. & AZAM, F. Effect of humic acid on wheat (*Triticum aestivum* L.) seedling growth. *Environ. Exp. Bot.*, 25:245-252, 1985.
- MISHRA, M. M.; KHURANA, A. L.; DUDEJA, S. S. & KAPOOR, K. K. Effect of phosphocompost on the yield and P uptake of red gram (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.). *Trop. Agric.*, 61:174-176, 1984.
- MURPHY, J. & RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Chim. Acta, Oxford*, 27:31-36, 1962.
- NOVAIS, R. F. DE & SMYTH, T. J. Introdução. In: NOVAIS, R. F. & SMYTH, T. J. eds. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. 1. ed. Viçosa: UFV, 1999. p. 399.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. & NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. B.; ALVAREZ V, V. H.; BARRO, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B & NEVES, J. C. eds. *Fertilidade dos solos*. 1. ed. Viçosa: SBCS, 2007. p. 471-549.
- PICCOLO, A. The supramolecular structure of humic substances: a novel understanding of humus chemistry and implications in soil science. *Adv. Agron.* 75:57–134, 2002.
- PERASSI, I & BORGNINO, L. Adsorption and surface precipitation of phosphate onto CaCO₃-montmorillonite: effect of pH, ionic strength and competition with humic acid. *Geoderma*, 232-234:600-608, 2014.
- RAIJ, B. Van & QUAGGIO, J. A. Determinação de fósforo, cálcio, magnésio e potássio extraídos com resina trocadora de íons. In: RAIJ, B. Van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.

- A. eds. Análise química para avaliação da fertilidade em solos tropicais. Campinas, Secretaria de Agricultura e Abastecimento, APTA/IAC, 2001. 189-199 p
- RIMA, J. A. H.; MARTIM, S. A.; DOBBSS, L. B.; EVARISTO, J. A. M.; RETAMAL, C. A.; FAÇANHA, A. R. & CANELLAS, L. P. Adição de ácido cítrico potencializa a ação de ácidos húmicos e altera o perfil proteico da membrana plasmática em raízes de milho. *Cienc. Rural*, 41:614-620, 2011.
- RAYLE, D. L. & CLELAND, R. E. The acid growth theory of auxin-induced cell elongation is alive and well. *Plant. Physiol*, 1271-1274, 1992.
- ROSE, M. T.; PATTI, A. F.; LITTLE, K. R.; BROWN, A. L.; JACKSON, W. R. & CAVAGNARO, T. R. A meta-analysis and review of plant-growth response to humic substances: practical implications for agriculture. *Adv. Agron.*, 124:37-89, 2014.
- SANTOS, G. A.; SOUSA, R. T. X. DE & KORNDÖRFER, G. H. Lucratividade em função do uso e índice de eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados aplicados em pré – plantio de cana-de-açúcar. *Biosci. J.*, 28:846–851, 2012.
- SINGH, C. P. & AMBERGER, A. Solubilization of rock phosphate by humic and fulvic acids extracted from atraw compost. *Agrochimica*, 41:221-228, 1997.
- SILVA, F. N.; FURTINI NETO, A. E.; CARNEIRO, L. F.; MAGALHÃES, C. A. S. M & CARNEIRO, D. N. M. Crescimento e produção de grãos da soja sob diferentes doses e fontes de fósforo em solos distintos. *Ciênc. Agrotec.*, 33:1220–1227, 2009.
- SILVA, F. C. ed. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2.ed. Brasília: Embrapa informação tecnológica, 2009. p. 627.
- SILVA, A. C.; CANELLAS, L. P.; OLIVARES, F. L.; DOBBSS, L. B.; AGUIAR, N. O.; FRADE, D. A. R.; REZENDE, C. E. & PERES, L. E. P. Promoção do crescimento radicular de plântulas de tomateiro por substâncias húmicas isoladas de turfeiras. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:1609-1617, 2011.
- SOUSA, D. M. G. & LOBATO, E. Cerrado: correção do solo e adubação. 2. ed. Planaltina: Embrapa, 2004. p. 416.
- THAIR, M. M.; KHURSHID, M.; KHAN, M. Z.; ABBASI, M. K. & KAZMI, M. H. Lignite-derived humic acid effect on growth of wheat plants in different soils. *Pedosphere*, 21:124-131, 2011.
- WANG, X. J.; WANG, Z. Q. & LI, S.G. The effect of humic acids on the availability of phosphorus fertilizers in alkaline soils. *Soil Use Manage.*, 11:99-102, 1995.

ZANDONADI, D. B.; CANELLAS, L. & P. FAÇANHA, A. R. Itolacetic and humic acids induce lateral root development through a concerted plasmalemma and tonoplast H⁺ pumps activation. *Planta*, 225: 1583-1595, 2007.

Obs: Versão preliminar do artigo submetido à Revista Brasileira de Ciência do solo, considerando que o conselho editorial da revista poderá sugerir alterações para adequá-lo ao seu próprio estilo.