**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Avaliação de superfosfato orgânico-complexado

Eduardo Zavaschi

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

**Piracicaba
2014**

Eduardo Zavaschi
Engenheiro Agrônomo

Avaliação de superfosfato orgânico-complexado

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **GODOFREDO CESAR VITTI**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Piracicaba
2014

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP**

Zavaschi, Eduardo

Avaliação de superfosfato orgânico-complexado / Eduardo Zavaschi. - -
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba,
2014.

74 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.

1. Fósforo 2. Superfosfato simples 3. Fracionamento de fósforo 4. Cana-de-açúcar
5. Adsorção de fósforo I. Título

CDD 631.85
Z39a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte -O autor"

Em especial dedico,

Ao meu amado pai Moacir Zavaschi (*in memorian*), sempre presente em minha mente e meu coração;

A minha amada mãe, Miriam Cleofe Zavaschi, por todo amor, carinho e incentivo;

Aos meus irmãos Cristiano e Moacir Júnior e cunhada Karla, por todo apoio e amizade;

A minha sobrinha Marynna, que faz a nossa família muito feliz;

A minha querida namorada Andréia Alves Erdmann, pelo seu amor.

Ofereço,

a Deus e a sociedade

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, pelo dom vida, pela saúde, pela família maravilhosa, pelas pessoas e oportunidades que tem colocado em meu caminho;

A minha mãe **Miriam Cleofe Zavaschi**, meus irmãos **Cristiano** e **Moacir Júnior**, minha cunhada **Karla** e minha sobrinha **Marynna**, pessoas muito importantes na minha vida, por todo apoio, carinho e amor;

Ao meu amor, **Andréia Alves Erdmann**, que tem sido a cada dia muito importante na minha vida, por estar ao meu lado em todos os momentos, sempre me ajudando a atravessar todas as dificuldades e compartilhando comigo, com enorme alegria, os momentos de felicidade;

Ao grande amigo **professor Dr. Godofredo Cesar Vitti**, que além de me orientar, sempre me apoiou. Obrigado pelos incontáveis conselhos, ajudas, oportunidades, incentivos, momentos de imensa alegria, e por toda confiança depositada em mim;

Ao Pesquisador **Doutor André Cesar Vitti** pela coorientação e enorme contribuição no trabalho, pelos conselhos e exemplo de profissional e pessoa;

Ao grande grupo da pós-graduação do prof. Vitti!! Ao meu irmão **Carlos Antônio** (Baiano), homem de princípios, sonhos e palavras inspiradoras, exemplo de competência e humanidade, que sem a suas palavras amigas com certeza não chegaria até aqui. A amiga **Cíntia**, exemplo de competência, ética e seriedade, pela amizade e enormes contribuições pessoais e profissionais. Ao amigo **Diego**, que sempre me deu muito apoio. Ao amigo **Edson**, pessoa de grande coração, sempre pronto a ajudar sem medir esforços. A **Elaine**, que com seu jeito autêntico sempre se mostrou grande amiga. A amiga **Fernanda**, com seu jeito adorável e amigo, estava sempre pronta a ajudar. A minha irmãzinha **Letícia** (Eva), pessoa de admirável caráter, competência e humanidade, pelos seus incontáveis conselhos e ajudas, que melhoraram muito meus trabalhos e personalidade. A amiga **Priscila** que sempre com suas sinceras palavras mostrou-se uma pessoa de grande caráter e confiança. Ao meu irmão **Thiago** (Ba-t-ria), homem de enorme competência, carisma e empatia, pelas oportunidades, ajudas, conselhos e grande amizade. Obrigado a vocês por serem, além de colegas de trabalho, verdadeiros amigos e por terem feito meus dias em Piracicaba mais felizes.

A **Silvia Helena**, por todo auxílio e ser uma grande amiga;

Ao **Grupo de Apoio a Pesquisa e Extensão (GAPE)**, pela convivência engrandecedora, amizade, oportunidades, viagens, paciência, trocas de experiências e pelas infinitas ajudas na condução do experimento de campo e coleta de dados;

Aos **amigos** de pós-graduação Roberta Santim, Bruna Botim, Sueli, Will, Marcos Rodrigues, Ana Paula, Acácio, Greice, Sara, Talles, German, Rafael, Henrique (Sentido), Antônio Pires, Fabrício, Aline Zampar, Lígia, José Marcos, Hugo, Evandro, Pitomba.

A **Teacher Luana**, por todo aprendizado, amizade e incontáveis ajudas no inglês;

A todos meus amigos de Cristalina, em especial ao **Douglas, Ismael, Rafael Farias e Paulinho**, que são pessoas que o tempo e a distância comprovaram o quão forte é a nossa amizade;

Aos **avós, tios e primos** por tudo que são, fizeram e fazem por mim;

Aos **amigos** que tenho espalhado pelo Brasil, que foram e serão sempre muito importantes na minha vida;

Ao **Centro de Ciências Agroveterinárias**, da Universidade do Estado de Santa Catarina, pela minha formação em engenheiro agrônomo;

Ao professor **Dr. Ildegardis Bertol**, pela oportunidade da iniciação científica, e pela confiança e a todos os **mestres** pelo conhecimento e sabedoria transmitido;

Aos amigos de República **Conan Ayade, Marcos, Roger, Ítalo, Henrique e Danilo** por todo tempo de convívio e amizade;

Ao **programa de pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ/USP**, pela oportunidade de fazer o curso de mestrado em profícua instituição de ensino;

A **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)** e ao **Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)** pela concessão da bolsa;

Ao **Grupo TIMAC AGRO**, pelo fornecimento dos fertilizantes utilizados nos experimentos e pelo apoio financeiro em parte do projeto;

A **sociedade** que por meio de seus impostos proporcionaram a minha formação acadêmica em excelentes instituições de ensino.

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	11
1 INTRODUÇÃO	13
Referências	21
2 FRAÇÕES DE FÓSFORO NO SOLO MEDIANTE A APLICAÇÃO DE SUPERFOSFATO ORGÂNICO-COMPLEXADO	27
Resumo	27
Abstract.....	27
2.1 Introdução	28
2.2 Material e métodos	29
2.3 Resultados e discussão	35
2.4 Conclusões.....	57
Referências	58
3 USO DE SUPERFOSFATO ORGÂNICO-COMPLEXADO NA CULTURA DA CANA- DE- AÇÚCAR.....	61
Resumo	61
Abstract.....	61
3.1 Introdução	62
3.2 Material e Métodos	63
3.3 Resultado e discussão	66
3.4 Conclusões.....	71
Referências	72

RESUMO

Avaliação de superfosfato orgânico-complexado

Nos solos tropicais intemperizados há elevada adsorção de fósforo, tornando o nutriente pouco disponível. A principal estratégia para aumento dos teores de fósforo no solo é a adubação fosfatada, porém cerca de 80% do total do nutriente aplicado no solo torna-se indisponível. A adição de matéria orgânica tem importância na diminuição da adsorção de fósforo devido a formação de substâncias húmicas, que bloqueiam os sítios adsorção além de atuar sobre os sais insolúveis de fósforo. Entretanto, para estes efeitos benéficos há a necessidade da adição de grandes quantidades de tais componentes orgânicos o que resultaria em problemas econômicos e logísticos aos produtores. Tentando solucionar este problema foram criados também os superfosfatos orgânico-complexados (SOC), os quais têm em sua composição a presença de agentes quelantes orgânicos (ácidos húmicos) complexados ao fosfato monocálcio através de pontes metálicas com cálcio, ferro ou alumínio, ou dois destes metais simultaneamente. A justificativa para a eficiência deste produto é que a formação de complexos fósforo-metal-ácidos orgânicos diminui a fixação de fósforo no solo, incrementando assim o aproveitamento do fertilizante fosfatado pelas culturas. Para verificar estes efeitos realizou-se experimento em casa de vegetação e campo, respectivamente intitulados: (i) “Frações de fósforo no solo mediante a aplicação de superfosfato orgânico-complexado” e “(ii) Uso do superfosfato orgânico-complexado na cultura da cana-de-açúcar”. O objetivo geral do trabalho foi avaliar o efeito da aplicação do SOC na adsorção de fósforo em solos com textura contrastantes submetidos ou não, a correção de acidez e na nutrição da cultura da cana-de-açúcar. No experimento em casa de vegetação verificou-se em solo arenoso e argiloso, com e sem correção de acidez, o efeito da aplicação dos fertilizantes orgânico-complexados nas frações de fósforo do solo através do fracionamento proposto por Hedley. No solo arenoso a maior parte do fósforo aplicado via fertilizante permanece nas frações inorgânicas lábeis as quais tem aumento em função da aplicação do superfosfato orgânico-complexado, além do efeito sinérgico deste com a prática da calagem. No solo argiloso a aplicação do SOC aumenta as formas de fósforo orgânico lábil no solo, além, pela interação sinérgica com a correção da acidez, de diminuir a quantidade de fósforo inorgânico quimiossorvido a ferro e alumínio. O experimento em campo avaliou os efeitos da aplicação de superfosfato orgânico-complexado (SOC) e superfosfato simples (SFS), nas doses de 0, 45, 90, 135 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em cana planta, além da reaplicação da dose 45 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na soqueira, apenas nos tratamentos que anteriormente receberam 45 e 90 kg ha⁻¹. Em cana planta a aplicação do SFS aumenta a massa de matéria seca de colmo devido a aplicação de níveis crescentes de P₂O₅, enquanto o uso do SOC não apresentou nenhuma influência, além de promover menor acúmulo de fósforo nesta parte da planta. Na soqueira, a produtividade de colmos industrializáveis e o acúmulo de massa seca no colmo não tem efeito da aplicação dos fertilizantes, porém há menor acúmulo de matéria seca, nitrogênio e fósforo no ponteiro com o uso do fertilizante orgânico-complexado.

Palavras-chave: Fósforo; Superfosfato simples; Fracionamento de fósforo; Cana-de-açúcar; Adsorção de fósforo

ABSTRACT

Evaluation of the organic-complexed superphosphate

In weathered tropical soils there is high phosphorus adsorption, turning the nutrient less available. The main strategy for increasing the levels of phosphorus in the soil is through phosphate fertilization, however 80% of the total nutrient applied to the soil becomes unavailable. The addition of organic matter is important in reducing the phosphorus adsorption due to the formation of humic substances which block the adsorption sites in addition to acting on the insoluble phosphate salts. However, for these beneficial effects there is a need of adding quite large amounts of organic compounds which would result in economical and logistic problems to the producers. Trying to solve this problem the organic-complexed superphosphate (OCS), which have in their composition the presence of organic chelators (humic acids) complexed with monocalcium phosphate through metal bonds with calcium, iron or aluminum, or two of these metals simultaneously. The reason for the efficiency of this product is that the formation of the complex phosphorus-metal-organic acids inhibits the fixation of phosphorus in the soil, thereby increasing the use of phosphate fertilizer by crops. To verify these effects, it was performed an experiment in the greenhouse and field, respectively entitled: (i) "Phosphorus fractions in soil by application of organic-complexed superphosphate" and "(ii) organic-complexed superphosphate in the culture of cane sugarcane ". The overall objective was to evaluate the effect of the application of OCS in phosphorus adsorption in soils with contrasting textures submitted or not to the correction of acidity and also in the nutrition of cane sugar. In the greenhouse experiment, it was verified in sandy and loamy soil, with and without correction of acidity, the effect of application of organic-complexed fertilizers on soil phosphorus fractions by fractionation proposed by Hedley. In the sandy soil most of the phosphorus applied via fertilizer remained in the labile organic fractions which increase due to the application of the organic super-complexed phosphate, in addition to the synergistic effect to the practice of lime. In clay soil the application of OCS increased the forms of labile organic phosphorus in the soil, besides its synergistic interaction with the soil acidity decreasing the amount of inorganic phosphorus chemically fixed on iron and aluminum. The field experiment evaluated the effects of organic-complexed superphosphate (OCS) and simple superphosphate (SS) applications at doses of 0, 45, 90, 135 and 180 kg ha⁻¹ of P₂O₅ in plant cane, but the reapplication of the 45 kg ha⁻¹ of P₂O₅ dose on ratoon was only in treatments that previously received 45 and 90 kg ha⁻¹. In plant cane the application of SFS increased stalk dry matter due to the application of crescent levels of P₂O₅, while the use of OCS had no influence, in addition to promoting lower phosphorus accumulation in this part of the plant. In the ratoon, the productivity of industrialized stalks and dry matter accumulation in the stem had no effect through fertilizer application, but there were lower accumulation of dry matter, nitrogen and phosphorus matter in the growing point with the use of organic-complexed fertilizer.

Keyword: Phosphorus; Single superphosphate; Phosphorus fractionation; Sugarcane; Phosphorus adsorption

1 INTRODUÇÃO

O fósforo (P) é elemento de grande importância na nutrição vegetal. O elemento, em média, constitui cerca de 0,2 % do peso seco das plantas e depois do nitrogênio (N) é o macronutriente que mais limita o crescimento dos vegetais, por promover a formação inicial e o desenvolvimento da raiz, particularmente em formação de proteínas, processo de divisão celular, fotossíntese, armazenamento de energia, desdobramento de açúcares, respiração e fornecimento de energia a partir do ATP (ALEXANDER, 1973). Além disso, o fósforo tem a propriedade de aumentar a eficiência da utilização de água pela planta, bem como a absorção e a utilização de outros nutrientes, sejam eles do solo ou do fertilizante, contribuindo para aumentar a resistência da planta às doenças, a suportar baixas temperaturas e a falta de umidade (KORNDÖRFER, 2004). Na cultura da cana-de-açúcar o fósforo, apesar de ser absorvido em menores quantidades que o nitrogênio e potássio, exerce função-chave no metabolismo dessa planta, particularmente na formação da sacarose, em que o composto glucose-1-fosfato junta-se com a frutose para formar tal dissacarídeo, matéria prima para a produção de açúcar e etanol (ALEXANDER, 1973).

O nutriente é absorvido pelas plantas principalmente na forma química de íon ortofosfato (H_2PO_4^-), presente na solução do solo. No solo, o fósforo é encontrado em proporções variadas, em que os teores totais de P variam de pouco mais de zero em solos muito arenosos até mais de 3000 mg dm^{-3} em solos mais argilosos, sendo o principal fator, para estas concentrações o material de origem do solo (RAIJ, 2011). O nutriente encontra-se no solo na forma orgânica e inorgânica, dependendo do composto em que está ligado. O fósforo inorgânico encontra-se em solução, ou na fase sólida. As formas e proporções com que os íons são encontrados, depende principalmente do pH da solução do solo, sendo que na maioria dos solos brasileiros, com pH de 4,0 a 6,0, há predominância do íon H_2PO_4^- (RAIJ, 2011). A quantidade de P presente na solução do solo é irrisória ($<0,1\%$), já que a grande maioria do nutriente encontra-se na fase sólida (NOVAIS; SMITH; NUNES, 2007). Em solos agrícolas a concentração do nutriente atinge valores entre $0,002$ a 2 mg L^{-1} (FARDEAU, 1996).

O fósforo da fase sólida pode estar presente em minerais primários ou adsorvido em minerais secundários, sendo encontrado, segundo Parffit (1978), em ligações químicas com os metais, cálcio, ferro e alumínio, argila silicatadas do tipo 1:1 e adsorvido aos oxihidróxidos de ferro, alumínio e/ou ainda na matéria orgânica, através de pontes de cátions (compostos

ternários).

A identificação direta dos minerais primários fosfatados, feita por difratometria de raios-X, é difícil por se apresentarem em baixas concentrações, entre 0,02 a 0,5% em relação aos minerais do solo (LINDSAY, 1989). As formas precipitadas de fósforo no solo existem devido à reação deste com as formas iônicas de alumínio e ferro em solos ácidos, ou o cálcio em solos neutros ou calcários, formando substâncias de composição definida e pouco solúveis (NOVAIS; SMYTH, 1999). Raij (2011), cita que a proporção relativa de compostos inorgânicos de fósforo no solo, com ferro, alumínio e cálcio, além de outros metais é condicionada pelo pH e pelo tipo e quantidade de minerais existentes na fração argila.

O fenômeno da adsorção de fósforo aos oxi-hidróxidos de ferro e alumínio ocorre em condições de reação ácida ou moderadamente ácida, em que estes tipos de argilominerais apresentam-se preferencialmente com cargas positivas, sendo assim capazes de reter em sua superfície vários tipos de ânions, preferencialmente íons fosfato. Em solo com pH mais próximo a neutralidade ou alcalinos tem-se maior presença de fósforo ligado a cálcio.

Em solos tropicais, devido à alta intemperização e predomínio de minerais de argila 1:1, como a caulinita e óxidos de Fe (hematita e goethita) e Al (gibbsita), a adsorção do fosfato ocorre nos sítios ácidos de “Lewis”, em que os grupos OH e OH₂ ligados monocoordenalmente ao metal, de ferro ou alumínio, são trocados pelo ânion, formando ligação predominantemente covalente (PARFFIT, 1978). Na fase inicial há atração eletrostática, seguida pela adsorção aos oxihidróxidos, por meio da troca de ligantes (LABOSKI; LAMB 2003). Conforme descrito por Parfitt (1989), o fosfato pode ligar-se em formas monodentadas, em que um oxigênio do fosfato é ligado ao metal; bidentadas, em que dois oxigênios são ligados ao metal; e binucleadas, em que dois oxigênios do fosfato são ligados a dois átomos do metal. A energia de ligação é crescente para os compostos monodentados, bidentados e binucleados, e a possibilidade de dessorção do fosfato aumenta na ordem inversa. A ligação do fósforo ao coloide do solo tende a especificidade com o tempo que ele fica adsorvido, formando compostos binucleados ou havendo penetração do fosfato nas imperfeições do cristal (NOVAIS; SMYTH, 1999). As principais características do solo que interferem na sua capacidade em adsorver fósforo é a quantidade de argilas do tipo 1:1, oxihidróxidos de ferro e alumínio, cálcio, ferro trivalente, alumínio, matéria orgânica e grau de acidez do solo (RODRIGUES, 1980).

A fração orgânica do fósforo no solo pode constituir de 5 a 80% do fósforo total do solo (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2001), sendo originário de tecidos microbianos, resíduos vegetais aportados ao solo e dos produtos derivados das suas decomposições

(CONTE; ANGHINONI; RHEINHEIMER, 2003). Devido a grande variedade de compostos orgânicos no solo, mais da metade das formas de fósforo orgânico ainda não foram identificadas. Das formas já identificadas, as principais são os hexafosfatos de inositol, que atingem de 50 a 80% do fósforo orgânico total, os fosfolipídios de 0,5 a 7%, ácidos nucleicos por volta de 3% e outros ésteres fosfato compondo valores maiores do que 5% (NZIGUHEBA; BUNEMANN, 2005). Estas proporções são devidas principalmente a recalcitrância dos compostos, sendo que os de mais difícil decomposição são os que apresentam os maiores teores no solo.

No tocante à nutrição de plantas, tem-se três compartimentos de fósforo no solo: fósforo em solução, o fósforo lábil e o não-lábil na fase sólida. Como as plantas absorvem o fósforo que está em solução, principalmente na forma de H_2PO_4^- , apenas o fósforo que conseguir passar a esta fase em tempo adequado será absorvido pelas plantas. O fósforo lábil é o que está em equilíbrio com a solução do solo e, portanto, disponível às plantas. Já o fósforo não lábil é aquele que não se encontra em equilíbrio com o fósforo da solução a curto prazo, ou seja, uma fração de acessibilidade limitada às plantas, principalmente as de ciclos mais curto. A disponibilidade ou labilidade do fósforo depende da sua interação com as argilas e oxi-hidróxidos de ferro e alumínio. Segundo Parfitt (1978), o fósforo não-lábil é aquele que possui duas ligações coordenadas com a superfície adsorvente, e essa dupla ligação não permite a dessorção imediata do fósforo. Já as ligações monocoordenadas do fósforo aos colóides permitem a dessorção do nutriente para a solução quando esta tem a concentração de fósforo diminuída, caracterizando, portanto o ânion ligado desta forma como lábil. O fósforo lábil é representado por formas metaestáveis de compostos ainda mal formados, portanto a referência a fosfatos lábeis e não lábeis não conflitua com as formas inorgânicas do fósforo ligado a cálcio, ferro e alumínio, sendo que qualquer uma pode estar em estado mais ou menos lábil, dependendo principalmente do tempo de reação dos fosfatos e das condições existentes no solo que influenciam no “envelhecimento” (RAIJ, 2011).

Em solos com baixos teores de fósforo lábil, tem-se como principal estratégia para aumento desses níveis a adubação fosfatada, seja através de fontes orgânicas ou minerais. Os fosfatos naturais, fosfatos naturais reativos, os termofosfatos e os fosfatos acidulados ou parcialmente acidulados são as principais alternativas minerais para o fornecimento de fósforo. Entre essas fontes, as mais utilizadas no Brasil são os fosfatos acidulados. Segundo Sousa, Lobato, Rein (2004), esses produtos apresentam alta solubilidade em água, sendo sua garantia feita com base no teor de P_2O_5 solúvel em citrato neutro de amônio + água (CNA + H_2O) e água. Os principais fertilizantes acidulados são os superfosfatos simples e triplo,

obtidos da reação da rocha fosfática com ácido sulfúrico e fosfórico respectivamente, e os fosfatos obtidos pela reação do ácido fosfórico com amônia (NH_3), MAP (fosfato monoamônico) e DAP (fosfato diamônico) (NOVAIS; SMITH; NUNES, 2007).

Nas adubações, o fósforo (P) é considerado nutriente de baixo aproveitamento pelas plantas. É comum observar-se aproveitamento por culturas anuais da ordem de 10% do P aplicado como fertilizante. Cerca de 80% do total do P aplicado no solo torna-se indisponível, sendo imobilizado, adsorvido e/ou acaba adquirindo forma orgânica (HOLFORD, 1997).

Como descrito anteriormente, o tempo em que o fósforo fica adsorvido faz com que ele tenha ligações com maior especificidade. Devido a isso, se tem opções de manejos e tecnologias em fertilizantes que diminuem esse tempo de contato, com consequente aumento da possibilidade das plantas acessarem o nutriente antes que este passe para a fração não lábil, o que aumentaria, por exemplo, a eficiência dos fertilizantes fosfatados.

Os manejos mais adotados visando o aumento da eficiência dos fertilizantes são a correção da acidez do solo, aplicação localizada do fertilizante, adição de material orgânico no solo e o uso de fertilizantes com tecnologias agregadas.

O manejo da acidez é importante, pois em solos ácidos, de acordo com McBride (1994), o íon fosfato reage rapidamente com o octaedro de Al, por exemplo, pela substituição dos grupos OH localizados na superfície do mineral, formando complexos de esfera interna, além das reações de precipitação do fósforo com formas iônicas de Al e Fe (NOVAIS; SMYTH, 1999). Segundo Barrow (1985) quando se diminui a acidez, através da calagem, o aumento da concentração e atividade dos íons OH^- faz com que a carga superficial de partículas de solo torne-se cada vez mais negativa, pela desprotonação de hidroxilas expostas nas argilas e matéria orgânica, aumentando a repulsão entre fosfato e superfície adsorvente, o que diminui o potencial eletrostático do plano de adsorção, além de promover a precipitação de Fe e Al e reduzir a precipitação de P-Fe e P-Al de baixa solubilidade. Consequentemente quanto maior o pH, menor a capacidade de adsorção de P do solo. Porém, segundo Novais; Smith; Nunes, (2007) esse fato não é tão simples e direto. Segundo estes autores, com o aumento do pH há diminuição da presença de fósforo na forma iônica H_2PO_4^- em relação à HPO_4^{2-} , esta forma bivalente e portanto preferencialmente adsorvida, o que contrabalancearia o decréscimo do potencial eletrostático no plano de adsorção. Há também o risco de que com a aplicação de elevadas doses de calcário possa ocorrer a precipitação de fósforo, formando fosfatos bi e tricálcicos de baixa solubilidade (NOVAIS; SMITH, 1999).

A adição de matéria orgânica tem importância na diminuição da adsorção de fósforo devido principalmente a formação de substâncias húmicas, compostas de grupos funcionais

carboxílicos e fenólicos, que bloqueiam os sítios de carga positiva dos óxidos de Fe e Al, responsáveis pela adsorção de fósforo (HUE, 1991). As substâncias húmicas (SH) são formadas pela transformação de biomoléculas durante o processo de decomposição de resíduos vegetais e animais presentes no ambiente. Devido à natureza heterogênea e complexa das SH, pouco se sabe sobre sua estrutura química, apresentando-se como moléculas polidifusas com elevada massa molar (SENESI; MIANO, BRUNETTI, 1994). Entretanto sabe-se que essas substâncias possuem alto teor de grupos funcionais contendo oxigênio na forma de carboxilas, hidroxilas fenólicas e carbonilas (JORDÃO et al., 1993).

Operacionalmente as SH são fracionadas, em função de sua solubilidade a diferentes valores de pH, em ácidos húmicos (AH), ácidos fúlvicos (AF) e humina. Segundo Haynes (1984), o solo pode adsorver ácidos orgânicos com grande energia, competindo com sítios de adsorção de fósforo e aumentando a disponibilidade desse nutriente para as plantas. Estes ligantes orgânicos liberados durante o processo de mineralização podem formar complexos com Al ou complexos solúveis com o fósforo da solução do solo, evitando que o mesmo seja adsorvido (IYAMUREMYE; DICK; BAHAM, 1996). As substâncias húmicas atuam também sobre os sais insolúveis de fósforo, seja diminuindo a sua formação ou solubilizando-os (GROSSL; INSKEEP, 1991) e na melhoria de condições físicas e biológicas do solo (SANTOS; CAMARGO, 1999). A eficiência desses ácidos orgânicos em melhorar a disponibilidade de fósforo para as plantas depende do valor de pH do solo, do tipo de ânion orgânico e da persistência destes ânions no solo (KIRK, 1999).

A interação da matéria orgânica com os microrganismos da rizosfera também favorece a proteção do fósforo contra a adsorção e a solubilização de compostos fosfatados insolúveis (PINTON; VARANINI; NANNIPIERI, 2007). Segundo Hernandez; Siegert; Rodriguez, (1986), a redução na adsorção de fósforo também depende da forma como são adicionados fosfato e ânions orgânicos. Segundo esses autores a máxima redução na adsorção ocorreu quando o fosfato e o ânion orgânico foram aplicados juntos, ou quando a adição do ânion orgânico precedeu à do fosfato. Bedrock, Cheshire e Shand (1997) propuseram a formação de complexos fósforo-metal-ácidos orgânico solúveis e insolúveis, como um dos possíveis mecanismos da ação das substâncias húmicas na dinâmica de fósforo no solo.

Segundo Costa (2000), quando se maneja o solo com a prática do plantio direto, tem-se ambiente menos oxidativo, em que as reações de fixação são minimizadas e há menor contato dos resíduos com o solo, promovendo impacto direto na fertilidade, principalmente na camada de 0-10 cm superficiais. Portanto, conforme relatado por Almeida; Torrent; Barrón

(2003), qualquer prática de manejo que vise manter ou incrementar a quantidade de matéria orgânica no solo pode resultar em benefício no aproveitamento do fósforo pelas plantas.

Além dos benefícios em relação à diminuição na adsorção de fósforo no solo, vários trabalhos têm demonstrado que as substâncias húmicas podem influenciar o acúmulo de nutrientes e o crescimento vegetal (VAUGHAN; MALCOLM, 1985). Os efeitos das substâncias húmicas sobre o metabolismo das plantas foram resumidos por Nannipieri et al. (1993) como resultado da influência positiva sobre o transporte de íons facilitando a absorção; aumento da respiração e da velocidade das reações enzimáticas do ciclo de Krebs, resultando em maior produção de ATP; aumento no conteúdo de clorofila; aumento na velocidade e síntese de ácidos nucleicos; efeito seletivo sobre a síntese proteica e aumento ou inibição da atividade de diversas enzimas.

Com relação à adoção de tecnologias em fertilizantes há, por exemplo, o uso de revestimentos com polímeros (TRENKEL, 2010) ou a formação de fertilizantes em que o nutriente fósforo esteja complexado a substâncias orgânicas (ERRO et al., 2011).

O uso de fertilizantes com tecnologia agregada tem sido crescente nos últimos anos. Nesta categoria encontram-se os revestidos por polímeros, que segundo Trenkel (2010), são produtos classificados como de liberação lenta, definidos como aqueles que retardam a disponibilidade imediata ou estendem a disponibilidade do nutriente ao longo do tempo em relação aos fertilizantes convencionais. A liberação do nutriente fica dependente da temperatura e da permeabilidade da membrana à água. A espessura e a natureza química da resina de recobrimento, a quantidade de microfissuras em sua superfície e o tamanho do grânulo do fertilizante também contribuem para determinar a curva de liberação de nutrientes ao longo do tempo (TRENKEL, 2010).

Por todas as características benéficas observadas nas substâncias húmicas (SH), tem-se utilizado produtos que as contenham na fertilização de várias culturas. Como exemplo pode-se citar a aplicação de SH no sulco de plantio junto com fertilizante, via foliar e adicionadas aos fertilizantes. Porém, os efeitos benéficos da adição de substâncias orgânicas com fertilizantes, observado na maioria dos estudos, mostra a necessidade da adição de grandes quantidades de tais componentes orgânicos o que resultaria em problemas econômicos e logísticos aos produtores (ERRO et al., 2012). Tentando solucionar isso foram criados os superfosfatos orgânico-complexados (SOC). Estes fertilizantes têm como característica em sua composição a presença de agentes quelantes orgânicos complexados (ácidos húmicos) ao fosfato monocálcio através de pontes metálicas com cálcio, ferro ou alumínio, ou dois destes metais simultaneamente (URRUTIA et al., 2014). A quantidade de metais na ligação faz com

que a solubilidade do produto diminua. O SOC é obtido com a introdução destes agentes quelantes orgânicos na reação química para obtenção do superfosfato simples (ERRO et al., 2011).

A justificativa para a eficiência do SOC é que a formação de complexos fósforo-metal-ácidos orgânico inibe a fixação de fósforo no solo, incrementando assim o aproveitamento do fertilizante fosfatado (GUARDADO; URRUTIA; MINA, 2007; ERRO et al., 2012). Segundo Urrutia et al. (2014) no SOC, em que o fósforo está ligado a mais de um metal, a absorção do nutriente pelas plantas se dá através da exsudação de ácidos orgânicos radiculares que liberam o fósforo orgânico-complexado para posterior absorção pela planta. Devido a estas características, esta fonte é também chamada de “fertilizante de rizosfera controlada” (“*rhizosphere-controlled fertilizer*”).

Giovannini et al. (2013) constataram que a aplicação de SOC aumentou a biomassa e atividade microbiana no solo em comparação a aplicação de superfosfato simples. Estes autores supõem que os ácidos húmicos utilizados no preparo destes produtos possam conter compostos potencialmente capazes de agir como “moléculas gatilho” como descrito em Nobili et al. (2001), causando um efeito “*priming*” na atividade dos microrganismos do solo, o que pode, contribuir na disponibilidade de nutrientes como o fósforo. Erro et al. (2011) avaliando a eficiência agrônômica dos SOC em relação ao superfosfato simples, obtiveram maior peso e concentração de fósforo nas raízes de plantas de trigo fertilizadas com o fertilizante orgânico-complexado. Porém todos estes trabalhos foram realizados em solos de regiões temperadas, os quais apresentam condições edáficas muito distintas dos solos intemperizados encontrados nos trópicos. Diante disso, mais pesquisas com os promissores fertilizantes orgânico-complexados precisam ser feitas sob as condições edafoclimáticas tropicais.

Uma das maneiras de se verificar o efeito da adubação ou dos manejos agrícolas sobre as formas de fósforo no solo é através da técnica do fracionamento de P (HEDLEY; STEWART; CHAUHAN, 1982). Esta técnica baseia-se em extrações sequenciais do fósforo na mesma amostra de solo, nas quais são usadas substâncias com capacidade crescente de extração do nutriente, estimando desde as formas lábeis até as mais recalcitrantes (GATIBONI, 2003). A primeira tentativa de fracionamento do fósforo do solo, segundo Rheinheimer; Anghinoni; Kaminsk (2000) foi proposta em 1937. Chang e Jackson (1957) aprimoraram o método, introduzindo outros extratores, com vistas em separar as frações identificadas como Pi-Al; Pi-Fe, Pi-Ca e Pi-Fe redutor. No entanto, esse procedimento pode apresentar problemas de interpretação dos resultados, pois ocorre readsorção durante a

extração e hidrólise do fósforo orgânico (RHEINHEIMER; ANGHINONI; KAMINSK, 2000). No entanto Hedley; Stewart; Chauhan, (1982), propuseram a inclusão das formas orgânicas nas etapas que usam soluções alcalinas, o que não era previsto em propostas anteriores. A técnica proposta por estes autores introduz a ideia de labilidade, em que os extratores são adicionados sequencialmente, na ordem de menor para maior força de extração, sendo que tanto o fósforo orgânico como inorgânico são extraídos.

Várias modificações do método original proposto por Hedley; Stewart; Chauhan, (1982) ocorreram a fim de aumentar a eficiência de extração e a facilidade de execução (TIESSSEN, STEWART, COLE, 1984; CONDRON; GOH; NEWMAN, 1985). Os extratores utilizados no fracionamento, após as modificações propostas, são resina trocadora de ânions (RTA); bicarbonato de sódio (NaHCO_3 0,5 mol L^{-1} a pH 8,5); hidróxido de sódio (NaOH 0,1 mol L^{-1}); ácido clorídrico (HCl 1,0 mol L^{-1}); hidróxido de sódio (NaOH 0,5 mol L^{-1}) e ácido sulfúrico mais água oxigenada ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$) para a digestão do solo residual.

As formas de fósforo do fracionamento proposto por Hedley; Stewart; Chauhan, (1982) com suas modificações, não explicavam as formas do elemento no solo. A partir do trabalho de Cross e Schlesinger (1995) as formas de fósforo no solo puderam ser correlacionadas com as do fracionamento de Hedley. A resina de troca aniônica e NaHCO_3 extraem formas lábeis de fósforo inorgânico (Pi), sendo que o segundo extrator extrai também formas orgânicas de fósforo (Po) lábil. O fósforo adsorvido aos óxidos de Fe e de Al além do Po (fosfato monoéster), considerado moderadamente lábil, são extraídos na etapa do NaOH (0,1 mol L^{-1}). Outra forma de fósforo moderadamente lábil, porém ligado a cálcio é extraído com HCl . As frações não lábeis de fósforo são extraídas com NaOH (0,5 mol L^{-1}), que remove Pi e Po que estariam protegidos internamente aos agregados (P ocluso), enquanto que a digestão residual extrai as formas de Pi e Po mais recalcitrantes (RODRIGUES, 2014).

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o efeito da aplicação do superfosfato orgânico-complexado na adsorção de fósforo em solos com textura contrastantes submetidos ou não a correção de acidez, e na nutrição da cultura da cana-de-açúcar. Para isso foram testadas as seguintes hipóteses:

- O uso do superfosfato orgânico-complexado diminui, ou retarda a fixação de fósforo em relação ao superfosfato simples;
- A correção prévia da acidez do solo através da calagem diminui efeitos da fixação de fósforo aplicado via fertilizantes;

- A correção prévia do solo aliado ao uso de superfosfato orgânico-complexado potencializa o efeito em diminuir a adsorção de fósforo;
- Em solos de textura argilosa, com maior capacidade de adsorção de P, a aplicação do superfosfato orgânico-complexado terá maior efeito em reduzir esse fenômeno;
- A adubação da cultura da cana-de-açúcar com o superfosfato orgânico-complexado resultará em aumento de produtividade de colmos

Visando validar essas hipóteses foram realizados experimentos em casa de vegetação e campo, respectivamente intitulados: **“Frações de fósforo no solo mediante a aplicação de superfosfato orgânico-complexado”** e **“Uso de superfosfato orgânico-complexado na cultura da cana-de-açúcar”**.

Referências

ALEXANDER, A.G. **Sugarcane physiology**: a comprehensive study of the *Saccharum* source-to-sink system. Amsterdam: Elsevier, 1973. 752 p.

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

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

BEDROCK, C.N.; CHESHIRE, M.V.; SHAND, C.A. The involvement of iron and aluminium in the bonding of phosphorus to soil humic acid. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 28, n. 11/12, p. 961-971, 1997.

CHANG, S.C.; JACKSON, M.L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v. 84, n. 2, p. 133-144, 1957.

CONDON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 36, n. 2, p.199-207, 1985.

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

COSTA, A. **Doses e modos de aplicação de calcário na implantação de sucessão soja-trigo em sistema de plantio direto**. 2000. 146p. Tese (Doutorado em fitotecnia) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

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

ERRO, J.; BAIGORRI, R.; YVIN, J.C.; GARCÍA-MINA, J.M. ³¹P NMR characterization and efficiency of new types of water-insoluble phosphate fertilizers to supply plant available phosphorus in diverse soil types. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Davis, v. 59, n. 5, p. 1900-1908, 2011.

ERRO, J.; URRUTIA, O.; BAIGORRI, R.; APARICIO-TEJO, P.; IRIGOYEN, I.; TORINO, F.; MANDADO, M.; YVIN, J.C.; GARCIA-MINA, J.M. Organic Complexed Superphosphates (CSP): physicochemical. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Davis, v. 60, n. 8, p. 2008-2017, 2012.

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

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

GIOVANNINI, C. GARCIA-MINA, J. M., CIAVATTA, C., MARZADORI, C. Effect of organic-complexed superphosphates on microbial biomass and microbial activity of soil. **Biology and Fertility of Soils**, Florence, v. 49, p. 395-401, 2013.

GROSSL, P.R.; INSKEEP, W.P. Precipitation of dicalcium phosphate dihydrate in the presence of organic acids. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 3, p. 670-675, 1991.

GUARDADO, I.; URRUTIA, O.; MINA, J.M.G. Size distribution; complexing capacity and stability of phosphate-metal-humic complexes. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Davis, v. 55, n. 2, p. 408-413, 2007.

HAYNES, R.J. Lime and phosphate in the soil-plant system. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 37, p. 249-315, 1984.

HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 46, n. 5, p. 970-976, 1982.

HERNANDEZ, D.L.; SIEGERT, G.; RODRIGUEZ, J.V. Competitive adsorption of phosphate with malate and oxalate by tropical soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 57, n. 6, p. 1460-1462, 1986.

HOLFORD, I.C.R. Soil phosphorus: its measurement and, its uptake by plants. **Australian Journal in Soil Research**, Melbourne, v. 35, n. 2, p. 227-239, 1997.

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

IYAMUREMYE, F.; DICK, R.P.; BAHAM, J. Organic amendments and phosphorus dynamics: phosphorus chemistry and sorption. **Soil Science**, Oxford, v. 161, n. 7, p. 426-435, 1996.

JORDÃO, C.P.; COSTA, E.D.; BRUNE, W.; GOURLART, A.T. Adsorção de cátions metálicos em ácidos húmicos de Latossolo. **Química Nova**, São Paulo, v. 16, p. 517-520, 1993.

KIRK, G.J.D. A model of phosphate solubilization by organic anion excretion from plant roots. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 50, n. 3, p. 369-378, 1999.

KORNDÖRFER, G.H. Fósforo na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2004. p. 290-306.

LABOSKI, C.A.M.; LAMB, J.A. Changes in soil test phosphorus concentration after application of manure or fertilizer. **Soil Science Society of America Journal**, Madison v. 67, n. 2, p. 544-554, 2003.

LINDSAY, W.L.; VLEK, P.L.G.; CHIEN, S.H. Phosphate minerals. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 1089-1130.

McBRIDE, M.B. **Environmental chemistry of soils**. New York: University Press, 1994. 406 p.

NANNIPIERI, P.; GREGO, S.; DELL'AGNOLA, G.; NARDI, S. Proprietá biochemiche e fisiologiche della sostanza orgânica. In: NANNIPIERI, P. **Ciclo della sostanza orgânica nel suolo: aspetti agronomici, chimici, ecologici & selvicolturali**. Bologna: Patron, 1993. p. 67-78.

NOBILI, M.; CONTIN, M.; MONDINI, C.; BROOKES P. C. Soil microbial biomass is triggered into activity by trace amounts of substrate. **Soil Biology and Biochemistry**. Amsterdam, v. 33, p. 1163-1170, 2001.

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

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471-537.

NZIGUHEBA, G.; BUNEMANN, E.K. Organic phosphorus dynamics in tropical agroecosystems. In: TURNER, B.L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D.S. **Organic phosphorus in the environment**. Cambridge: CABI Publ., 2005. p. 243-268.

PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 30, p. 1-46, 1978.

_____. Phosphate reactions with natural allophane, ferrihydrite and goethite. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.40, p.359-369, 1989.

PINTON, R.; VARANINI, Z.; NANNIPIERI, P. **The rhizosphere: biochemistry and organic substances at the soil-plant interface**. New York: Marcel Dekker, 2001. 472 p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo dos nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, n. 15/16, p. 2339-2354, 2001.

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

RODRIGUES, M. **Sistemas de manejo e a dinâmica das formas de fósforo e da fertilidade em solos de Cerrado**. 2014. 113 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

RODRIGUES, M.R. **Fatores que afetam a fixação de fosfatos nos solos do Estado de São Paulo**. 1980. 88 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1980.

SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. 491 p.

SENESI, N.; MIANO, T.M.; BRUNETTI, G. Methods and related problems for sampling soil and sediment organic matter: extraction, fractionation and purification of humic substances. **Química Analítica**, Barcelona, v. 13, p. 26-33, 1994.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E.; REIN, T.A. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. cap. 6, p 147-168.

TIESSEN, H.; STEWART, W.B.; COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 4, p. 853-858, 1984.

TRENKEL, M.E. Definitions of slow and controlled release fertilizer and nitrification and urease inhibitors. In: _____. **Slow and controlled release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture**. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010. chap. 1, p. 14-16.

URRUTIA, O.; ERRO, J.; GUARDADO, I.; FRANCISCO, S.S.; MANDADO, M.; BAIGORRI, R.; YVIN, J.C.; MINA, J.M.G. Physico-chemical characterization of humic-metal-phosphate complexes and their potential application to the manufacture of new types of phosphate-based fertilizers. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 177, n. 2, p. 128–136, 2014.

VAUGHAN, D.; MALCOLM, R.E. Influence of humic substances on growth and physiological processes. In: _____. **Soil organic matter and biological activity**. Dordrecht: Martinus Nijhoff/Dr W. Junk, 1985. chap. 1, p. 37-75.

2 FRAÇÕES DE FÓSFORO NO SOLO MEDIANTE A APLICAÇÃO DE SUPERFOSFATO ORGÂNICO-COMPLEXADO

Resumo

Uma estratégia para diminuir os efeitos da adsorção do fósforo aplicado via fertilizante no solo é o uso de superfosfato orgânico-complexado. A justificativa para a eficiência deste produto é a formação de complexos fósforo-metal-ácidos orgânicos, inibindo a fixação de fósforo no solo, incrementando assim o aproveitamento do fertilizante fosfatado pelas culturas. Desta forma objetivou-se verificar o efeito da aplicação do superfosfato orgânico-complexado na adsorção de fósforo em solos com textura contrastantes, submetidos ou não a correção de acidez. Foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação, um em solo arenoso e outro em argiloso. O delineamento experimental em cada solo avaliado foi inteiramente casualizado com quatro repetições com esquema fatorial $3 \times 2 \times 3$, considerando o fator aplicação de fósforo com o superfosfato simples (SFS), superfosfato orgânico-complexado (SOC) e sem fertilizante (SF), o fator correção da acidez do solo, com e sem aplicação de corretivo e o fator época, com avaliações aos 30, 70 e 180 dias após a aplicação dos fertilizantes. Nas épocas de avaliação foram feitas as coletas de amostras de solo para determinação de atributos químicos e frações de fósforo no solo pelo método do fracionamento proposto por Hedley. Observou-se que a maior parte do fósforo aplicado via fertilizantes no solo arenoso permanece nas frações inorgânicas lábeis as quais tem aumento em função da aplicação do fertilizante orgânico-complexado. No solo com maior teor de argila, a aplicação do superfosfato orgânico-complexado aumenta as formas de fósforo orgânico lábil. A ação sinérgica da correção da acidez e o uso do fertilizante orgânico-complexado diminui a quantidade de fósforo inorgânico quimiossorvido a ferro e alumínio no solo com maior teor de argila e aumenta os teores de fósforo lábil, extraído com resina, no solo arenoso.

Palavras-chave: Fracionamento de fósforo; Superfosfato simples; Calagem, arenoso, argiloso

Abstract

A strategy to reduce the effects of adsorption of phosphorus applied via fertilizer into the soil is the use of organic-complexed superphosphate. The reason of this product efficiency is the formation of phosphorus-metal-organic acids complexes by inhibiting the fixation of phosphorus in the soil, thereby increasing the use of phosphate fertilizer by crops. Therefore, the aim was to verify the effect of the application of organic-complexed superphosphate on phosphorus sorption in soils with contrasting texture submitted or not the correction of acidity. Two experiments were conducted in a greenhouse, one on sandy soil and another on clay. The experimental design in each evaluated soil was completely randomized with four replications in a factorial $3 \times 2 \times 3$; the factors are: phosphorus application with simple superphosphate (SS), organic-complexed superphosphate (OCS) and without fertilizer (SF); the correction factor of soil acidity, with and without liming; and the time factor, with evaluations at 30, 70 and 180 days after the fertilizer application. During the assessments soil samples were collected to determine the chemical properties of fertility and phosphorus fractions in soil by the fractionation method proposed by Hedley. It was observed that most of the phosphorus fertilizer applied remained on the labile inorganic fraction which has increased due to the application of organic-complexed fertilizers. The synergistic action of

acidity correction and the use of organic-complexed fertilizer increased the levels of labile phosphorus extracted with resin, in sandy soil.

Keyword: Fractionation of phosphorus; Superphosphate; Liming; Sandy; Clayey

2.1 Introdução

Em solos com baixos teores de fósforo lábil, tem-se como principal estratégia para aumento desses níveis a adubação fosfatada, seja através de fontes orgânicas ou minerais. Entre essas fontes, as mais utilizadas no Brasil são os fosfatos acidulados como os superfosfatos simples e triplo, além do fosfato monoamônico (MAP) e fosfato diamônico (DAP) (NOVAIS; SMITH; NUNES, 2007). Entretanto, o fósforo tem baixo aproveitamento pelas plantas quando aplicado via fertilizante.

Visando o aumento da eficiência da adubação fosfatada tem-se adotados manejos como a correção da acidez do solo, adição de material orgânico no solo e o uso de fertilizantes com tecnologias agregadas.

Com a calagem há o aumento da concentração e atividade dos íons OH^- , tornando a carga superficial das partículas de solo cada vez mais negativa, pela desprotonação de hidroxilas expostas nas argilas e matéria orgânica, aumentando a repulsão entre fosfato e superfície adsorvente, diminuindo o potencial eletrostático do plano de adsorção, além de promover a precipitação de Fe e Al (BARROW, 1985).

A adição de matéria orgânica tem importância na diminuição da adsorção de fósforo devido a formação, durante processo de mineralização, de substâncias húmicas, compostas de grupos funcionais carboxílicos e fenólicos, que bloqueiam os sítios de carga positiva dos óxidos de Fe e Al responsáveis pela ligação do nutriente (HUE, 1991), além de formarem complexos com Al ou com o fósforo da solução do solo, evitando que o mesmo seja adsorvido (IYAMUREMYE; DICK; BAHAM, 1996). As SH atuam também sobre os sais insolúveis de fósforo, seja diminuindo a sua formação ou solubilizando-os (GROSS; INSKEEP, 1991).

Por todas as características benéficas observadas nas substâncias húmicas (SH), tem-se utilizado produtos que as contenham na fertilização de várias culturas, seja através da sua aplicação no sulco de plantio junto com fertilizante, via foliar ou adicionadas aos fertilizantes. Entretanto os efeitos benéficos da adição de substâncias orgânicas com fertilizantes, observado na maioria dos estudos, mostra a necessidade de grandes quantidades dos

componentes orgânicos, o que resultaria em problemas econômicos e logísticos aos produtores (ERRO et al., 2012).

Tentando solucionar este problema, foram criados os superfosfatos orgânico-complexados (SOC). Estes fertilizantes têm como característica a presença de agentes quelantes orgânicos (ácidos húmicos) complexados ao fosfato monocalcário através de pontes metálicas com cálcio, ferro ou alumínio, ou dois destes metais simultaneamente (URRUTIA, 2014). O SOC é obtido com a introdução dos agentes quelantes orgânicos, oriundos de turfa ou leonardita, na reação química para obtenção do superfosfato simples (ERRO et al., 2011). A proporção de carbono total neste fertilizante situa-se entre 0,5 a 0,8% (GIOVANNINI et al., 2013). Este produto foi desenvolvido e patenteado pelo Grupo Rollier (FR 1050009, 2010). A justificativa para a eficiência deste produto é a formação de complexos fósforo-metal-ácidos orgânicos que inibe a fixação de fósforo no solo, incrementando assim o aproveitamento do fertilizante fosfatado (GUARDADO; URRUTIA; MINA, 2007; ERRO et al., 2012).

Giovannini et al. (2013) constataram que a aplicação de SOC aumentou a biomassa e atividade microbiana no solo em comparação a aplicação de superfosfato simples. Estes autores supõem que os ácidos húmicos utilizados no preparo destes produtos possam conter compostos potencialmente capazes de agir como “moléculas gatilho” como descrito em Nobili et al. (2001), causando efeito “*priming*” na atividade dos microrganismos do solo, podendo contribuir na disponibilidade de nutrientes como o fósforo. Erro et al. (2011) avaliando a eficiência agrônômica dos SOC em relação ao superfosfato simples, obtiveram maior peso e concentração de fósforo nas raízes secas de plantas de trigo fertilizadas com o fertilizante orgânico-complexado. Entretanto todos estes trabalhos foram realizados em solos de regiões temperadas, os quais apresentam condições edáficas muito distintas dos solos intemperizados encontrados nos trópicos. Diante disso mais pesquisas com os fertilizantes orgânico-complexados precisam ser feitas nas condições edafoclimáticas tropicais.

O objetivo foi verificar o efeito da aplicação do superfosfato orgânico-complexado na adsorção de fósforo em solos com textura contrastantes, submetidos ou não a correção de acidez.

2.2 Material e métodos

Foram conduzidos dois experimentos em casa de vegetação, pertencente ao departamento de Ciência do Solo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da (Universidade de São Paulo), localizada em Piracicaba-SP (22° 35' S; 47° 37' W e 610 m).

Os experimentos consistiram na aplicação dos tratamentos, um conduzido em solo arenoso (Neossolo Quartzarênico distrófico) e outro em argiloso (Nitossolo Háplico distrófico), cuja caracterização química (RAIJ, et al., 2001) e textural (CAMARGO et al., 1986) encontram-se na tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Caracterização química de fertilidade e textural dos solos previamente a aplicação de corretivo de solo

Solo	pH	P	K	Ca	Mg	H+Al	CTC	V	Areia	Silte	Argila
		mg dm ⁻³			mmolc dm ⁻³			%		g kg ⁻¹	
Arenoso	4,9	6	2,3	5,6	2,0	16	25,9	38,2	855	15	130
Argiloso	4,5	8	2,2	8,5	6,2	59	75,9	22,3	475	73	452

pH: CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; P, K, Ca, Mg: extração pela resina trocadora de íons; H+Al: pH SMP

O delineamento experimental em cada solo avaliado foi inteiramente casualizado com quatro repetições, com esquema fatorial 3 x 2 x 3, considerando o fator aplicação de fósforo com o superfosfato Simples (**SFS**), superfosfato orgânico-complexado (**SOC**) e sem fertilizante (**SF**), o fator correção da acidez do solo, com e sem aplicação de corretivo e o tempo de incubação do solo após a aplicação dos fertilizantes fosfatados, com avaliações aos 30, 70 e 180 dias após a aplicação dos fertilizantes.

As unidades experimentais eram constituídas de um recipiente plástico com 0,3 kg de solo seco peneirado a 2 mm (Figura 2.1). Em cada experimento utilizou-se 72 unidades experimentais destrutivas, ou seja, em cada época de avaliação, eram retiradas 24 unidades compreendendo os três tratamentos referentes à fertilização com fósforo, com e sem correção da acidez do solo em quatro repetições.

Figura 2.1 – Unidades experimentais

Nos tratamentos em que se realizou a calagem, a quantidade do corretivo foi calculada para elevar a saturação por cátions não ácidos a 60%. O corretivo utilizado foi óxido de cálcio (CaO), popularmente chamado de cal “virgem”, o qual possuía poder relativo de neutralização total (PRNT) de 120%. A correção foi realizada com período de incubação de 60 dias antes da aplicação dos fertilizantes fosfatados. Durante o período de incubação, o solo foi mantido com umidade equivalente a 60% da capacidade de retenção de água, para que houvesse reação de neutralização da acidez do corretivo nos solos. Os tratamentos que não receberam o corretivo também tiveram o solo mantido com o mesmo teor de água durante esse período.

Para cada solo fez-se a caracterização dos parâmetros químicos de fertilidade (RAIJ et al., 2001) e as frações de **P** (HEDLEY; STEWART; CHAUAN, 1982), com coleta no dia da aplicação dos fertilizantes fosfatados, ou seja, 60 dias após a calagem, os quais estão mostrados respectivamente nas tabelas 2.2 e 2.3.

Tabela 2.2- Caracterização química dos solos após a calagem e antes da aplicação dos fertilizantes

Tabela 2.2 Caracterização química dos solos após a calagem e antes da aplicação dos fertilizantes							
Fonte	pH CaCl ₂	Ca	Mg	K	H+ Al	CTC	V
		-----mmol _c dm ⁻³ -----					%
Arenoso							
SCC	5,6	11,0	2,5	2,1	13,0	28,6	54,6
SSC	4,9	5,6	2,0	2,3	16,0	25,9	37,9
Argiloso							
SCC	5,1	18,3	5,9	2,2	36,0	62,4	42,3
SSC	4,3	8,5	6,2	2,3	59,0	76,0	22,6

SSC- Solo sem calagem; SCC- Solo com calagem; pH= CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; P, K, Ca, Mg = extração pela resina trocadora de íons; H+Al= pH SMP

Tabela 2.3 – Frações de fósforo no solo no dia da aplicação dos fertilizantes

Tabela 2.5 Planoes de resoro no solo no dia da aplicao dos fertilizantes									
Fonte	RTA	NaHCO ₃ 0,5 mol L ⁻¹		NaOH 0,1 mol L ⁻¹		HCl 1 mol L ⁻¹	NaOH 0,5 mol L ⁻¹		Residual
de	Pi	Pi	Po	Pi	Po	Pi	Pi	Po	Pi
variao	-----mg kg ⁻¹ -----								
Solo Arenoso									
SCC	3,5	3,4	3,5	8,9	6,8	2,1	7,0	7,8	30,3
SSC	3,5	3,1	3,8	8,9	4,9	2,1	6,8	8,0	37,9
Solo Argiloso									
SCC	2,0	5,9	40,9	19,0	158,0	1,4	125,6	114,2	238,8
SSC	2,0	5,1	39,6	19,0	156,0	1,4	125,9	112,0	231,2

SCC: Solo com calagem; SSC: Solo sem calagem

Após o período de incubação para a correção da acidez, os fertilizantes fosfatados, previamente analisados (Tabela 2.4), foram aplicados (Figura 2.2A e 2.2B) em quantidades equivalentes a **200 mg kg⁻¹ de P** e homogeneizados nas unidades experimentais na ausência de plantas. Após a aplicação dos fertilizantes, a umidade do solo foi mantida em 60% da sua capacidade máxima de retenção de água durante todo o período experimental.

Tabela 2.4- Concentração de fósforo (P₂O₅) total e solúvel e cálcio (Ca), enxofre (S) e magnésio (Mg) total em superfosfato orgânico-complexado (SOC) e superfosfato simples (SFS)

Fertilizante	----- P ₂ O ₅ -----				Ca	S	Mg
	Total	H ₂ O	CNA + H ₂ O	AC	----- Total -----		
	----- % -----						
SOC	19,10	15,46	17,38	18,47	20,11	11,56	0,58
SFS	19,56	14,91	17,68	18,43	19,10	11,72	0,62

H₂O: água; CNA + H₂O: citrato neutro de amônio + água; AC: ácido cítrico

Figura 2.2 – Unidades experimentais com solo arenoso (A) e argiloso (B) que receberam a aplicação dos fertilizantes fosfatados em casa de vegetação

Nas épocas de avaliação, 30, 70 e 180 dias após a aplicação dos fertilizantes, foram feitas as coletas de solo para determinação das propriedades químicas de fertilidade e frações de fósforo. Em cada coleta, as unidades experimentais correspondentes a cada tratamento e suas respectivas repetições, foram desmontadas e o solo de cada unidade seco a 40°C e peneirado a 2 mm para as determinações de pH (CaCl₂), cálcio, magnésio, potássio, acidez potencial (H+Al) e as frações de fósforo pelo método do fracionamento proposto por Hedley, Stewart e Chauan (1982)

O pH do solo foi determinado em CaCl₂ (0,01 M L⁻¹), os teores de cálcio, magnésio, potássio trocáveis foram determinados pelo método da extração com resina trocadora de íons

e a acidez total (H + Al) por correlação ao índice SMP conforme descrito por Raij et al. (2001).

A capacidade de troca de cátions (CTC) foi obtida por meio da somatória dos resultados de K, Ca, Mg e H+Al, e a saturação por cátions não ácidos (V%), pela relação entre a soma de cátions não ácidos (K + Mg + Ca) e a CTC do solo, atributo este usualmente chamado de saturação por bases.

A extração sequencial ou fracionamento de fósforo no solo foi baseada no método proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982) com modificações de Condrón, Goh e Newman (1985), o qual pode ser visto em detalhe em Gatiboni (2003) e Rodrigues (2014).

Para realizar a extração sequencial de fósforo inorgânico e orgânico (Pi e Po) pesou-se 0,5 g de solo (seco a 40° C) no qual adicionou-se 10 ml da solução extratora, mantendo a proporção 1:20 (solo:solução). Os extratores em ordem sequencial de extração foram: Resina trocadora de ânion (P_{RTA}); $NaHCO_3$ 0,5 mol l^{-1} (P_{NaHCO_3}); NaOH 0,1 mol l^{-1} ($P_{NaOH\ 0,1}$); HCl 1,0 mol l^{-1} (P_{HCl}); NaOH 0,5 mol l^{-1} ($P_{NaOH\ 0,5}$).

A primeira fração de fósforo no solo obtida foi o fósforo inorgânico (Pi). Nos extratos alcalinos (P_{NaHCO_3} , $P_{NaOH\ 0,1}$ e $P_{NaOH\ 0,5}$) foi determinado o fósforo total (Pt) por digestão com persulfato de amônio + ácido sulfúrico em autoclave (USEPA, 1971), sendo o fósforo orgânico (Po) obtido pela diferença entre fósforo total (Pt) e fósforo inorgânico (Pi).

O fósforo inorgânico dos extratos P_{NaHCO_3} , $P_{NaOH\ 0,1}$ e $P_{NaOH\ 0,5}$ foi analisado pelo método de Dick e Tabatabai (1977). O fósforo dos extratos ácidos (Extrato P_{RTA} e P_{HCl}) além das digestões totais de P_{NaHCO_3} , $P_{NaOH\ 0,1}$ e $P_{NaOH\ 0,5}$ foi determinado segundo a metodologia de Murphy e Riley (1962). Após estas extrações, o solo remanescente foi seco em estufa e submetido à digestão com $H_2SO_4 + H_2O_2 + MgCl_2$ saturado (BROOKES; POWSON, 1981) para determinação do fósforo residual ($P_{residual}$).

As frações obtidas com a extração sequencial do fósforo podem ser agrupadas conforme sua força de ligação no solo, o que influencia sua labilidade, sendo P_{RTA} ; Pi_{NaHCO_3} e Po_{NaHCO_3} (Fósforo lábil) > $Pi_{NaOH\ 0,1}$; $Po_{NaOH\ 0,1}$ e P_{HCl} (Fósforo moderadamente lábil) > $Pi_{NaOH\ 0,5}$; $Po_{NaOH\ 0,5}$ e $P_{residual}$ (Fósforo não-lábil), como ilustrado na figura 2.3.

Figura 2.3- Esquema da técnica do fracionamento de fósforo proposto por Hedley, Stewart e Chauan (1982). (1982) com as modificações de Condrón et al. (1985). Adaptado de Gatiboni (2003)

Os dados foram analisados considerando o delineamento inteiramente casualizado com esquema fatorial triplo **F x C x T** (F: fertilizante = SF - sem fertilizante, SOC superfosfato orgânico-complexado, SFS - superfosfato simples; C: correção do solo = CC – com calagem e SC – sem calagem; T: épocas de avaliação com base no tempo de incubação do solo após a aplicação do fertilizante = 30, 70 e 180 dias) e quatro repetições por meio dos programas estatísticos SAS (2004). Diante da significativa interação das variáveis analisadas pelo teste F na ANOVA, os dados foram submetidos ao teste de comparação de médias pelo teste de Tukey ($p=0,05$).

2.3 Resultados e discussão

Atributos químicos do solo arenoso

A análise de variância dos atributos químicos do solo arenoso é mostrada na Tabela 2.5, em que com exceção do potássio, todas as propriedades químicas de fertilidade apresentaram efeito de algumas das variáveis avaliadas.

Tabela 2.5 – Significância para os atributos químicos – pH (CaCl_2); H+Al (acidez potencial); Ca; Mg; K; CTC (capacidade de troca catiônica); V% (porcentagem da CTC ocupada por cátions não ácidos trocáveis)

Fonte de Variação	pH	H +Al	Ca	Mg	K	CTC	V%
F	**	**	**	**	ns	**	**
C	**	**	**	ns	ns	ns	**
T	**	ns	**	ns	ns	*	*
F x C	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
F x T	ns	ns	**	ns	ns	**	*
C x T	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
F x C x T	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	1,4	5,3	19,6	13,6	17,0	10,0	6,3

**, * e ns: significância < 0.01, < 0.05 e não significativo, respectivamente; F: Fontes de P (sem fertilizante - SF, superfosfato simples - SFS, superfosfato orgânico-complexado - SOC); C: Correção da acidez do solo (com correção - CC e sem correção - SC); T: Tempo de incubação do solo (30,70 e 180 dias após a aplicação dos fertilizantes); CV: Coeficiente de variação.

Os solos corrigidos tiveram maior valor de pH (CaCl_2) (Figura 2.4). Segundo Sousa, Miranda e Oliveira, (2007) o pH determina a atividade de íons H^+ a qual está relacionada com a concentração de H^+ na solução do solo. Com a prática da calagem há produção de

hidroxilas (OH^-), que reagem com os íons hidrogênio (H^+), diminuindo sua atividade, corroborando com os dados.

No solo sem aplicação de fertilizantes fosfatados houve acréscimo significativo do pH (CaCl_2) em relação aos que receberam o fertilizante nas três épocas avaliadas quando realizou-se a calagem (Figura 2.4 A). Ao aplicar superfosfatos, seja simples ou triplo, no solo, ocorre imediatamente reação de hidrólise com a formação de ácido fosfórico e fosfato bicálcico numa primeira etapa, em seguida o ácido fosfórico se dissocia formando íons H^+ resultando no abaixamento do pH ao redor do grânulo (pH 1,5), o que reflete no aumento da acidez trocável e redução do pH (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007), principalmente em solo arenosos, com baixo poder tampão.

Nos solos sem correção, não houve aumento significativo da atividade de íons H^+ com a aplicação dos fertilizantes fosfatados (Figura 2.4B). Este fato sugere que a acidez produzida pela aplicação dos fertilizantes atuou principalmente minimizando os efeitos da calagem e não na diminuição do pH do solo. Este efeito deve-se a alta proporção entre o que foi aplicado de fertilizante ($\sim 2,55 \text{ g kg}^{-1}$) em relação ao de corretivo ($3,16 \text{ g kg}^{-1}$).

Independente da aplicação ou não dos fertilizantes fosfatados, o pH (CaCl_2) manteve-se estável ao longo do tempo (Figura 2.7A). Isto se deve a alta solubilidade dos fertilizantes, que produziram a maior parte do hidrogênio, oriundo da hidrólise, logo após a sua aplicação.

Figura 2.4 - Efeito da interação entre F (Fontes: sem fertilizante - SF; superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado - SOC) x T (Tempo de incubação do solo após a aplicação dos fertilizantes - 30, 70 e 180 dias) x C (solo com calagem (A) e sem calagem (B)) no pH (CaCl_2) do solo. Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para T e F por teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os menores valores de acidez potencial foram verificados na ausência de aplicação de fertilizantes e com a correção do solo (Tabela 2.6). Segundo Raij (2011) a recomendação da calagem pelo método de saturação por bases visa corrigir a acidez trocável e parte da acidez não trocável, fato que refletiu na diminuição do parâmetro H + Al do solo (Tabela 2.6). A aplicação dos fertilizantes, pelos motivos supracitados, minimizou os efeitos da calagem interferindo na concentração de H + Al (Tabela 2.6).

Tabela 2.6 – Valores médios para os atributos químicos do solo pH (CaCl₂); H+Al; Ca; Mg; K; CTC (capacidade de troca catiônica); V% (porcentagem da CTC ocupada por cátions não ácidos trocáveis)

Fonte de	pH	H +Al	Ca	Mg	K	CTC	V
Variação	CaCl ₂	----- mmolc dm ⁻³ -----					%
----- F -----							
SF	5,4 a	14,2 b	6,7 c	2,0 b	2,2	25,2 b	43,6 b
SFS	5,1 b	15,7 a	17,3 b	3,6 a	2,5	39,1 a	59,7 a
SOC	5,2 b	15,8 a	19,7 a	3,4 a	2,1	41,1 a	60,8 a
DMS	0,06	0,65	2,30	0,30	0,40	2,80	2,80
----- C -----							
CC	5,5 a	13,4 b	16,4 a	3,0	2,1	35,1	60,1 a
SC	4,9 b	17,0 a	12,7 b	3,0	2,4	35,0	49,3 b
DMS	0,40	0,44	1,60	0,20	0,30	1,90	1,90
----- T -----							
30	5,3 a	15,3	12,4 b	3,2	2,3	33,4 b	52,8 b
70	5,2 b	14,9	15,2 a	3,1	2,4	35,6 ab	56,1 a
180	5,1 c	15,4	16,1 a	2,8	2,1	36,3 a	55,2 ab
DMS	0,06	0,65	2,30	0,40	0,40	2,80	2,80

F: Fontes de P (sem fertilizante - SF, superfosfato simples - SFS, superfosfato orgânico-complexado - SOC); C: Correção da acidez do solo (com correção - CC e sem correção - SC); T: Tempo de incubação do solo (30, 70 e 180 dias após a aplicação dos fertilizantes); CV: Coeficiente de variação. DMS: Diferença mínima significativa. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem significativamente por teste de Tukey (p<0,05)

Os teores de magnésio no solo aumentaram com a aplicação dos fertilizantes fosfatados, pois estes apresentavam o elemento em suas composições (Tabela 2.4). Prochnow (2001) relatou a presença de impurezas nos fertilizantes fosfatados, sendo o magnésio um dos contaminantes mais comuns. Biasioli (2003) justificou tal fato, pela presença destes elementos em algumas rochas fosfáticas. A aplicação dos fertilizantes visando o fornecimento de 200 mg kg⁻¹ de fósforo, resultou em alta quantidade das fontes (em torno de 2.550 mg kg⁻¹ de solo), com consequente aporte significativo dos contaminantes, especificadamente de magnésio.

A aplicação do corretivo de acidez e dos fertilizantes fosfatados aumentaram os teores de cálcio no solo (Tabela 2.6 e Figura 2.5 A), com destaque para o superfosfato orgânico-

complexado, que diferiu das demais aos 180 dias. Esta dinâmica do cálcio no solo se deve a alta concentração deste elemento na composição dos fertilizantes (Tabela 2.4). Além disso, a aplicação do SOC tem a capacidade em aumentar a atividade e biomassa microbiana (GIOVANNINI et al., 2013), ou seja, este pode ter incrementado a decomposição da matéria orgânica ou o acesso ao Ca mais recalcitrante, seja ele oriundo do solo ou corretivo de acidez, o qual ficaria disponível em formas trocáveis após a lise celular destes microrganismos.

Os solos SF e com aplicação SFS não tiveram os teores médios de Ca alterados ao longo do tempo (Figura 2.5 A). O fato de não haver alteração após 30 dias da aplicação do SFS, justifica-se pela alta solubilidade deste fertilizante, disponibilizando todos os nutrientes nele contido nos primeiros dias após a sua aplicação.

O acréscimo nos teores de cálcio e magnésio, devido à aplicação dos fertilizantes fosfatados, aumentou a capacidade de troca de cátions e a saturação por cátions não ácidos (Figura 2.5). Estes atributos químicos do solo apresentaram a mesma dinâmica que o cálcio, devido a maior participação deste cátion no cálculo destas variáveis. A saturação por cátions não ácidos no solo dos tratamentos que receberam a calagem alcançou valores próximos ao esperado, de 60 %, sendo significativamente superior ao solo que não recebeu este manejo (Tabela 2.6).

Figura 2.5 - Efeito da interação entre F (Fontes: sem fertilizante - SF; superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado – SOC) x T (Tempo de incubação do solo após a aplicação dos fertilizantes – 30, 70 e 180 dias) nos teores de cálcio trocável (A), capacidade de troca de cátions (B) e saturação por cátions não ácidos (C). Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para T e F por teste de Tukey ($p < 0,05$)

Frações de Fósforo no solo arenoso

As únicas frações que não apresentaram efeito das variáveis avaliadas foram Po extraído por NaOH 0,5 mol L⁻¹ e o fósforo residual obtido pela digestão sulfúrica do solo. Na tabela 2.7 é mostrada a análise de variância das frações de P no solo arenoso obtida pelo método do fracionamento.

Tabela 2.7 – Significância para os teores de fósforo inorgânico (Pi) e orgânico (Po) no solo obtidos através da técnica de fracionamento de Hedley

Fonte de variação	RTA	NaHCO ₃ 0,5 mol L ⁻¹		NaOH 0,1 mol L ⁻¹		HCl 1 mol L ⁻¹	NaOH 0,5 mol L ⁻¹		Residual
	Pi	Pi	Po	Pi	Po	Pi	Pi	Po	P
F	**	**	**	**	ns	**	**	ns	ns
C	**	ns	ns	**	ns	ns	*	ns	ns
T	ns	ns	ns	*	**	**	**	ns	ns
F x C	*	ns	ns	**	ns	ns	*	ns	ns
F x T	ns	ns	**	ns	ns	*	ns	ns	ns
C x T	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
F x C x T	ns	ns	ns	**	ns	*	ns	ns	ns
CV (%)	19,0	15,5	40,4	11,1	41,4	62,7	17,8	50,7	30,3

**, * e ns: significância < 0,01, < 0,05 e não significativo, respectivamente; RTA: Resina de troca aniônica; NaHCO₃: Bicarbonato de sódio; NaOH: Hidróxido de sódio; HCl: Ácido clorídrico;; F: Fontes de P (sem fertilizante - SF, superfosfato simples - SFS, superfosfato orgânico-complexado - SOC); C: Correção da acidez do solo (com correção - CC e sem correção - SC); T: Tempo de incubação do solo (30,70 e 180 dias após a aplicação dos fertilizantes); CV: Coeficiente de variação

Todas as formas de fósforo inorgânico, exceto residual, apresentaram aumento em seus valores com aplicação de fertilizantes, sendo os incremento mais expressivos nas formas lábeis (RTA e NaHCO₃) em que mais de 70% do fósforo aplicado permaneceu nestas frações (Tabela 2.8). O aumento expressivo das frações lábeis de fósforo, independente do tipo do fertilizante aplicado ou da correção do solo, ocorreu devido às características texturais e mineralógicas do solo arenoso, evidenciando a sua baixa capacidade de adsorção, e a alta quantidade de fósforo aplicado (200 mg kg⁻¹).

Nos solos sem correção, o teor de P_{RTA} não apresentou efeito da aplicação de distintos fertilizantes fosfatados, porém nos solos corrigidos observou-se aumento significativo desta fração com a aplicação do fertilizante SOC (Figura 2.6), evidenciando o efeito sinérgico entre a aplicação desta fonte e o manejo de correção.

Como já citado, compostos presentes no SOC, estimulam a atividade microbiana do solo (NOBILI et al., 2001; GIOVANNINI et al., 2013), que em ambiente com pH próximo a neutralidade, teria seu crescimento potencializado, acarretando em maior disponibilidade de

nutrientes, principalmente pela decomposição da matéria orgânica, com impacto significativo nas frações P_{RTA} e P_{NaHCO_3} . Estes dados corroboram com Erro et al. (2011), que observaram aumentos nos teores de fósforo nas formas mais lábeis do solo com aplicação do SOC em relação a SFS.

Figura 2.6 - Efeito da interação entre F (Fontes: sem fertilizante - SF; superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado - SOC) x C (com calagem e sem calagem) nos teores Pi_{RTA} . Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para C e F por teste de Tukey ($p < 0,05$)

Tabela 2.8 – Valores médios para os teores de fósforo inorgânico (Pi) e orgânico (Po) no solo obtidos através da técnica de fracionamento proposto por Hedley

Fonte de variação	RTA	NaHCO ₃ 0,5 mol L ⁻¹		NaOH 0,1 mol L ⁻¹		HCl 1 mol L ⁻¹	NaOH 0,5 mol L ⁻¹		Residual
	Pi	Pi	Po	Pi	Po	Pi	Pi	Po	P
	-----mg kg ⁻¹ -----								
	----- F -----								
SF	3,0 c	3,1 c	3,6 b	9,1 b	13,3	2,9 b	7,5 b	21,8	31,1
SFS	102,2 b	44,9 b	7,5 a	33,1 a	15,4	10,3 a	9,0 a	25,9	28,4
SOC	114,1 a	49,6 a	6,8 a	34,8 a	15,6	8,4 a	8,0 ab	30,7	32,8
DMS	9,9	3,5	1,7	2,0	4,4	3,3	1,0	9,6	6,7
	----- C -----								
CC	75,5 a	30,7	6,1	23,8 b	13,9	6,8	7,8 b	28,1	31,1
SC	68,2 b	32,6	5,5	26,8 a	15,6	7,3	8,5 a	24,0	30,3
DMS	6,7	2,4	1,2	1,4	3,0	2,2	0,7	6,5	4,6
	----- T -----								
30	65,8	31,5	5,4	24,3 b	11,2 b	4,3 b	8,0 ab	24,6	32,5
70	75,1	30,9	5,6	25,2 ab	10,6 b	7,5 ab	7,5 b	26,0	29,9
180	75,0	32,4	6,4	26,3 a	22,0 a	9,6 a	9,0 a	27,3	29,5
DMS	9,9	3,5	1,7	2,0	4,4	3,3	1,0	9,6	6,7

RTA: Resina de troca aniônica; NaHCO₃: Bicarbonato de sódio; NaOH: Hidróxido de sódio; HCl: Ácido clorídrico;; F: Fontes de P (sem fertilizante - SF, superfosfato simples - SFS, superfosfato orgânico-complexado - SOC); C: Correção da acidez do solo (com correção - CC e sem correção - SC); T: Tempo de incubação do solo (30,70 e 180 dias após a aplicação dos fertilizantes); DMS: Diferença mínima significativa. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem significativamente por teste de Tukey (p<0,05)

A fração orgânica lábil (Po_{NaHCO₃}) apresentou dinâmica discrepante entre as fontes fosfatadas ao longo do tempo (Figura 2.7). Como componentes desta fração de Po têm-se os ácidos nucleicos e glicerolfosfatos (TIESSEN; MOIR 1993). Os menores teores destes no solo foram observados no tratamento sem aplicação de fertilizante, indicando que parte do nutriente adicionado via fertilizante foi convertido em formas orgânicas pela ação dos microrganismos.

A aplicação de SFS apresentou o maior nível de Po_{NaHCO₃} aos 30 dias após a aplicação dos fertilizantes (Figura 2.7). Isto sugere que parte do fósforo presente no fertilizante orgânico-complexado ficou protegido e não foi assimilado pelos microrganismos nos primeiros 30 dias. Nos períodos seguintes a quantidade de Po_{NaHCO₃} foi similar entre as fontes, indicando que o fósforo contido nos fertilizantes ficaram disponíveis de forma equitativa para possíveis transformações microbianas.

Figura 2.7 - Efeito da interação entre F (Fontes: sem fertilizante - SF; superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado - SOC) x T (Tempo de incubação do solo após a aplicação dos fertilizantes - 30, 70 e 180 dias) nos teores de P_{NaHCO_3} . Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para T e F por teste de Tukey ($p < 0,05$)

A fração inorgânica de fósforo extraída por NaOH 0,1 mol L⁻¹ corresponde a forma quimiossorvida a óxidos de alumínio e ferro, formando ligações mono e bidentadas, sendo considerado moderadamente lábil (CROSS; SCHLESSINGER, 1995). A ausência de correção proporcionou maiores valores desta fração, porém apesar da menor capacidade de adsorção dos solos arenosos, houve incremento dos teores de $Pi_{NaOH\ 0,1}$ com a aplicação dos fertilizantes fosfatados, independente da correção da acidez (Figura 2.8A e 2.8B).

No solo corrigido observou-se superioridade do SOC aos 180 dias (Figura 2.8A), enquanto sem a correção de acidez do solo (Figura 2.8B) os teores de $Pi_{NaOH\ 0,1}$ não apresentaram diferença significativa entre as fontes.

Com os resultados observados infere-se que a prática corretiva foi eficiente em minimizar a fixação do fósforo no decorrer do tempo quando se aplicou o fertilizante convencional. A ausência de alteração nos teores de $Pi_{NaOH\ 0,1}$ ao longo do tempo, com a aplicação do fertilizante orgânico-complexado em solo sem correção de acidez, supõe que a proteção exercida sobre o fósforo pelos quelantes orgânicos minimizou possíveis reações do nutriente aos colóides do solo.

Figura 2.8 - Efeito da interação entre F (Fontes: sem fertilizante - SF; superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado - SOC) x T (Tempo de incubação do solo após a aplicação dos fertilizantes - 30, 70 e 180 dias) x C (solo com calagem (A) e sem calagem (B)) na fração Pi NaOH 0,1. Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para T e F por teste de Tukey ($p < 0,05$)

O fósforo orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L⁻¹ teve incremento aos 180 dias após aplicação dos fertilizantes (Tabela 2.8). Frações orgânicas de fósforo extraído por NaOH podem estar nas formas monoéster, diéster, fosfonatos e polifosfatos (TATE; NEWMAN, 1982). Os fosfatos monoéster são caracterizados pela alta interação com os colóides do solo e, portanto, de baixa acessibilidade ao ataque microbiano (GATIBONI, 2003). A justificativa para os aumentos dos teores desta fração aos 180 dias, é que parte do fósforo inorgânico e orgânico mais lábil passou para formas orgânicas de menor labilidade.

Na figura 2.9 estão apresentados os teores de fósforo extraídos por HCl nos solos com e sem correção da acidez. Esta fração corresponde a forma inorgânica de fósforo ligado ao Ca (CROSS; SCHLESINGER, 1995), sendo muito influenciada pelo teor de Ca e pH do solo. No solo corrigido (Figura 2.9A), aos 70 dias após a aplicação dos fertilizantes, somente o tratamento com SFS apresentou teores de P_{HCl} significativamente maiores que o tratamento sem fertilizante. Este resultado indica que a aplicação do SOC protegeu temporariamente o fósforo da ligação ao Ca, pois aos 180 dias os teores de P_{HCl} foram equivalentes. Apesar de temporária, esta proteção é importante no caso de alguma cultura estabelecida, como por exemplo as anuais, que possuem ciclo mais curto.

Independentemente do fertilizante, os teores de P_{HCl} no solo com a acidez corrigida, não aumentaram significativamente ao longo do tempo (Figura 2.9A). Isto indica que a fração ligada a Ca foi em sua grande maioria estabelecida nos primeiros dias após a aplicação dos fertilizantes, principalmente devido a solubilidade dos fertilizantes.

Nos solos sem correção, a aplicação de fertilizantes aumentou os teores da fração de P_{HCl} após 180 dias (Figura 2.9B), indicando neoformação de fosfato de cálcio, possivelmente oriundo do próprio fertilizante já que não houve aplicação de CaO . Esta neoformação pode ser em virtude da menor atividade microbiana no ambiente de maior acidez, minimizando a incorporação do fósforo pelos microrganismos que diminuiria as interações do nutriente com os argilominerais e cátions do solo.

Os solos fertilizados com SFS tiveram aumento significativo dos teores de P_{HCl} aos 180 dias em relação aos períodos anteriores de avaliação (Figura 2.9B).

Figura 2.9 - Efeito da interação entre F (Fontes: sem fertilizante - SF; superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado - SOC) x T (Tempo de incubação do solo após a aplicação dos fertilizantes - 30, 70 e 180 dias) x C (solo com calagem (A) e sem calagem (B)) na fração P_{HCl} . Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para T e F por teste de Tukey ($p < 0,05$)

Segundo Condron (1995), a fração de fósforo inorgânico extraído por $NaOH$ $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ corresponde as formas de P_i ligado ao Fe e Al. No entanto, não são extraídas pelos $NaOH$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ por estarem fisicamente protegidas no interior de microagregados (CROSS; SCHLESINGER, 1995). Infere-se, portanto que $P_{iNaOH\ 0,5}$ são formas de fósforo que tiveram maior tempo de contato com os colóides do que àquelas extraídas por $NaOH$ $0,1 \text{ mol L}^{-1}$.

No solo sem correção de acidez, a aplicação do SFS elevou o teor de $P_{iNaOH\ 0,5}$ em relação ao solo sem aplicação de fertilizante (Figura 2.10). A ausência desta diferença nos solos corrigidos mostra que este manejo é eficiente em minimizar a adsorção de fósforo. Este efeito é causado pelo aumento da concentração e atividade dos íons OH^- tornando carga superficial de partículas de solo cada vez mais negativa, pela desprotonação de hidroxilas expostas nas argilas e matéria orgânica, aumentando a repulsão entre fosfato e superfície adsorvente.

A aplicação de fertilizante SOC não elevou os teores de $Pi_{NaOH0,5}$ em relação ao solo sem fertilizante, independente da correção do solo, evidenciando a proteção exercida pelo quelante orgânico em proteger o fósforo das ligações mais específica no período avaliado (Figura 2.10).

Figura 2.10 - Efeito da interação entre F (Fontes: sem fertilizante - SF; superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado - SOC) x C (com calagem e sem calagem) nas frações Pi_{RTA} (A) e $Pi_{NaOH0,5}$ (B). Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para C e F por teste de Tukey ($p < 0,05$)

Atributos químicos do solo argiloso

Neste solo, o potássio trocável também foi o único atributo químico que não apresentou efeito das variáveis estudadas. Na tabela 2.9 é apresentada a análise de variância para os atributos químicos avaliados.

Tabela 2.9 – Significância para os atributos químicos: pH ($CaCl_2$); H+Al (acidez potencial); Ca; Mg; K; CTC (capacidade de troca catiônica); V% (porcentagem da CTC ocupada por cátions não ácidos trocáveis)

Fonte de Variação	pH	H +Al	Ca	Mg	K	CTC	V
F	ns	ns	**	**	ns	**	**
C	**	**	**	ns	ns	**	**
T	ns	ns	**	ns	ns	**	**
F x C	ns	ns	ns	ns	ns	ns	**
F x T	ns	ns	**	*	ns	**	**
C x T	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
F x C x T	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	0,9	3,3	7,5	7,9	10,5	5,5	4,4

**, * e ns: significância < 0.01 , < 0.05 e não significativo, respectivamente; F: Fontes de P (sem fertilizante - SF, superfosfato simples - SFS, superfosfato orgânico-complexado - SOC); C: Correção da acidez do solo (com correção - CC e sem correção - SC); T: Tempo de incubação do solo (30,70 e 180 dias após a aplicação dos fertilizantes); CV: Coeficiente de variação

A aplicação de corretivo (CaO) aumentou significativamente o pH (CaCl₂) e os teores de Ca do solo e diminuiu a acidez potencial (Tabela 2.10). Estes resultados eram esperados visto que a aplicação do corretivo produz hidroxilas (OH⁻) que reagem com o hidrogênio e alumínio presentes nos solo em formas trocáveis e parte das não trocáveis. O aumento dos teores de Ca também é coerente visto que o corretivo tem em sua composição 70% do nutriente (Tabela 2.10).

Por ser um atributo calculado, a CTC teve seu valor diminuído devido ao elevado decréscimo dos teores de H+Al (Tabela 2.10). Neste solo devido ao elevado poder tampão, o hidrogênio produzido na reação de hidrólise dos fertilizantes não foi suficiente para alterar significativamente a acidez ativa e potencial.

Tabela 2.10 – Valores médios para os atributos químicos do solo: pH (CaCl₂); H+Al (acidez potencial); Ca; Mg; K; CTC (capacidade de troca catiônica); V% (porcentagem da CTC ocupada por cátions não ácidos trocáveis)

Fonte de	pH	H +Al	Ca	Mg	K	CTC	V
Variação	CaCl ₂	----- mmolc dm ⁻³ -----					%
----- F -----							
SF	4,63	48,9	15,2 b	6,7 b	2,16	73,1 b	33,6 b
SFS	4,69	50,7	26,9 a	8,7 a	2,20	86,5 a	42,7 a
SOC	4,71	48,5	26,1 a	8,5 a	2,12	85,3 a	43,3 a
DMS	0,05	1,83	1,40	0,51	0,30	3,69	1,45
----- C -----							
CC	4,96 a	39,3 b	28,2 a	8,1	2,18	76,32 b	48,9 a
SC	4,40 b	59,1 a	17,4 b	7,8	2,21	86,53 a	31,2 b
DMS	0,02	0,90	0,95	0,35	0,30	2,49	0,98
----- T -----							
30	4,70	48,4	20,9 c	7,8	2,13	79,3 b	38,9 b
70	4,65	50,1	22,9 b	8,0	2,18	81,0 ab	39,3 b
180	4,68	49,7	24,3 a	8,1	2,17	84,3 a	41,1 a
DMS	0,05	1,83	1,40	0,51	0,30	3,69	1,45

F: Fontes de P (sem fertilizante - SF, superfosfato simples - SFS, superfosfato orgânico-complexado - SOC); C: Correção da acidez do solo (com calagem - CC e sem calagem - SC); T: Tempo de incubação do solo (30,70 e 180 dias após a aplicação dos fertilizantes, DMS: Diferença mínima significativa. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem significativamente por teste de Tukey (p<0,05)

Nos solos com a aplicação dos fertilizantes fosfatados houve aumento dos teores cálcio e magnésio (Figura 2.11 A e B) em função da presença destes elementos nas fontes aplicadas (Tabela 2.4). Entretanto com aplicação do SOC houve menor teor de cálcio aos 30 dias após a aplicação das fontes. No SOC parte do cálcio Ca está ligada ao fósforo e a uma

matriz orgânica (ERRO et al., 2011), o que diminuiria a sua disponibilidade a curto prazo, porém, como nas avaliações seguintes não houve diferença nos teores de cálcio do solo entre os tratamentos com aplicação de fertilizantes, infere-se que a disponibilização dos nutrientes por ambos tenha sido equiparada.

A saturação do solo por cátions não ácidos e a CTC calculada foram influenciadas diretamente, pois são atributos dependentes da quantidade cátions presentes no solo (Figura 2.11 C e D). Ressalta-se que o aumento da CTC quando há aplicação de fertilizantes se deve ao aporte de cátions não ácidos, principalmente Ca, sem a proporcional diminuição dos teores de H+Al. Esta desproporcionalidade é devido à ação limitada da aplicação de das fontes fosfatadas em diminuir da acidez potencial em solos com alto poder tampão.

Figura 2.11 - Efeito da interação entre F (Fontes: sem fertilizante - SF; superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado - SOC) x T (Tempo de incubação do solo após a aplicação dos fertilizantes - 30, 70 e 180 dias) nos teores de cálcio trocável (A), magnésio trocável (B), capacidade de troca de cátions (C) e saturação por cátions não ácidos (D). Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para T e F por teste de Tukey ($p < 0,05$)

A saturação por cátions não ácidos foi o único atributo do solo influenciado pela interação fonte x corretivo (Tabela 2.9). Quando se aplicou calcário, independentemente da aplicação ou não de fertilizantes, houve aumento da V%, atingindo, portanto o objetivo deste manejo (Figura 2.12). Ao contrário do solo arenoso, a quantidade de calcário aplicada não foi suficiente para elevar a saturação por bases a 60% no período de avaliação do experimento. Esse fato deve-se a maior resistência deste solo a alteração das suas propriedades químicas, ou seja, maior poder tampão.

A aplicação de fertilizante aumentou a saturação por cátions não ácidos independentemente da correção ou não da acidez do solo (Figura 2.12). Isso é resultado do aporte de cálcio e magnésio pela aplicação das altas doses fontes (em torno de 2550 mg kg⁻¹), mesmo em solo com elevada CTC.

Figura 2.12 - Efeito da interação entre F (Fontes: sem fertilizante - SF; superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado – SOC) x C (com calagem e sem calagem) na saturação por cátions não ácidos. Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para C e F por teste de Tukey ($p < 0,05$)

Frações de Fósforo no solo argiloso

A análise de variância para as frações de fósforo no solo argiloso é mostrada na tabela 2.11, em que com exceção do P residual, todas as frações de fósforo apresentaram o efeito das variáveis avaliadas. A fração residual geralmente não se modifica com aplicações de fósforo via fertilizantes, indicando a permanência do nutriente adicionado em formas de maior labilidade (GATIBONI, 2003).

A fração de P_{RTA} teve aumento significativo em função da aplicação dos fertilizantes fosfatados (Tabela 2.12), mas em nenhuma das épocas avaliadas houve distinção entre as fontes (Figura 2.13).

Os teores de P_{RTA} foram incrementados ao longo do tempo nos solos fertilizados (Figura 2.13) evidenciando que os fertilizantes continuaram sendo solubilizados, de modo a aumentar os teores de P lábil de forma significativa até o último período de avaliação do solo, diferentemente do ocorrido no solo arenoso (Tabela 2.9). Esta diferença se deve a menor taxa de solubilização dos fertilizantes no solo mais argiloso, que pela sua maior capacidade de retenção, necessitou menor reposição de água ao longo do tempo.

Tabela 2.11 – Significância para os teores de fósforo inorgânico (Pi) e orgânico (Po) no solo obtidos através da técnica de fracionamento proposto por Hedley

Fonte de variação	RTA	NaHCO ₃ 0,5 mol L ⁻¹		NaOH 0,1 mol L ⁻¹		HCl 1 mol L ⁻¹	NaOH 0,5 mol L ⁻¹		Residual
	Pi	Pi	Po	Pi	Po	Pi	Pi	Po	P
F	**	**	**	**	**	**	*	ns	ns
C	*	**	ns	**	**	ns	ns	ns	ns
T	*	**	**	ns	ns	ns	*	ns	ns
F x C	ns	**	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns
F x T	*	**	**	ns	ns	ns	*	*	ns
C x T	*	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
F x C x T	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	19,9	21,4	27,6	12,1	9,7	42,3	17,7	21,9	13,8

**, * e ns: significância < 0,01, < 0,05 e não significativo, respectivamente; RTA: Resina de troca aniônica; NaHCO₃: Bicarbonato de sódio; NaOH: Hidróxido de sódio; HCl: Ácido clorídrico;; F: Fontes de P (sem fertilizante - SF, superfosfato simples - SFS, superfosfato orgânico-complexado - SOC); C: Correção da acidez do solo (com correção - CC e sem correção - SC); T: Tempo de incubação do solo (30,70 e 180 dias após a aplicação dos fertilizantes); DMS: Diferença mínima significativa

Figura 2.13 - Efeito da interação entre F (Fontes: sem fertilizante - SF; superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado - SOC) x T (Tempo de incubação do solo após a aplicação dos fertilizantes - 30, 70 e 180 dias) na fração Pi_{RTA} . Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para T e F por teste de Tukey ($p < 0,05$)

O solo corrigido apresentou teor superior de P_{RTA} aos 30 dias após a aplicação dos fertilizantes (Figura 2.14). Este resultado é coerente visto que o manejo de correção de acidez aumenta as cargas negativas superficiais do solo ou da matéria orgânica e, conseqüentemente, a repulsão entre fosfato na superfície adsorvente, diminuindo a adsorção do fósforo aplicado via fertilizante. Além disso, pode ter ocorrido maior aporte de fósforo oriundo da mineralização da matéria orgânica, devido ao provável aumento da atividade microbiana gerado pela correção da acidez.

A ausência de diferença de P_{RTA} nos demais períodos de avaliação pode ser explicado pelo incremento do fósforo lábil apenas no solo sem calagem, em decorrência, provavelmente, da maior saturação prévia dos sítios de adsorção à medida que os fertilizantes foram sendo solubilizados (Figura 2.14).

Figura 2.14 - Efeito da interação entre C (com calagem e sem calagem) x T (Tempo de incubação do solo após a aplicação dos fertilizantes – 30, 70 e 180 dias) na fração P_{RTA} . Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para T e F por teste de Tukey ($p < 0,05$)

Tabela 2.12 – Valores médios para os teores de fósforo inorgânico (Pi) e orgânico (Po) no solo obtidos através da técnica de fracionamento proposto por Hedley

Fonte de variação	RTA	NaHCO ₃ 0,5 mol L ⁻¹		NaOH 0,1 mol L ⁻¹		HCl 1 mol L ⁻¹	NaOH 0,5 mol L ⁻¹		Residual
	Pi	Pi	Po	Pi	Po	Pi	Pi	Po	P
-----mg kg ⁻¹ -----									
----- F -----									
SF	4,1 b	7,6 b	25,4 c	28,1 b	132,8 b	0,87 b	73,8 b	141,1 b	231,6
SFS	66,1 a	36,8 a	45,8 b	61,5 a	224,6 a	1,76 a	88,6 a	181,5 a	235,5
SOC	58,3 a	34,3 a	59,1 a	57,8 a	224,5 a	1,87 a	85,2 ab	203,1 a	235,5
DMS	7,9	6,8	10,7	4,9	13,6	0,5	12,6	27,2	22,7
----- C -----									
CC	45,5 a	24,6 b	44,5	46,9 b	182,6 b	1,58	80,4	182,9	243,4
SC	40,7 b	28,1 a	42,9	51,3 a	205,5 a	1,44	84,6	169,3	225,6
DMS	4,1	2,7	5,8	2,8	9,1	0,3	7,1	18,5	25,5
----- T -----									
30	38,1 b	21,2 b	51,1 a	48,1	194,9	1,36	76,1 b	215,2 a	229,4
70	41,6 b	28,5 a	43,5 ab	49,5	194,9	1,75	83,2 ab	157,6 b	237,5
180	49,2 a	29,5 a	36,8 b	49,5	193,4	1,42	88,1 a	154,8 b	235,7
DMS	6,1	4,0	10,1	5,2	13,3	0,45	10,3	27,2	22,9

Fontes de P (sem fertilizante - SF, superfosfato simples - SFS, superfosfato orgânico-complexado - SOC); C: Correção da acidez do solo (com calagem - CC e sem calagem - SC); T: Tempo de incubação do solo (30,70 e 180 dias após a aplicação dos fertilizantes); DMS: Diferença mínima significativa. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem significativamente por teste de Tukey (p<0,05)

Independente do manejo de correção do solo, a aplicação dos fertilizantes incrementou a fração lábil de fósforo extraída por NaHCO₃ (Figura 2.15). Esse resultado é esperado em razão da grande quantidade de fósforo aplicado através destas fontes. Entretanto não houve distinção entre as fontes testadas, provavelmente pelos mesmos motivos observados na fração P_{RTA}.

Os teores de Pi_{NaHCO3} foram distintos ao longo do tempo em função dos tratamentos com os fertilizantes e da correção do solo. Nos tratamentos com a aplicação de SOC houve aumento significativo dos teores de Pi_{NaHCO3} aos 180 dias comparado a primeira avaliação no solo corrigido (Figura 2.15A). O menor teor de fósforo lábil na primeira avaliação pode ser em decorrência da imobilização pela microbiota, com posterior liberação através da lise celular destes microrganismos, levando ao incremento do teor de P_{NaHCO3} no último período de avaliação. No solo sem correção houve aumento significativo nos teores de Pi_{NaHCO3} aos 70 dias e posterior decréscimo na última avaliação com a aplicação do SFS (Figura 2.15B). Provavelmente este fertilizante teve elevada taxa de disponibilização de fósforo no período

entre 30 e 70 dias após sua aplicação, sendo posteriormente superada pela de adsorção do fosfato.

Figura 2.15 - Efeito da interação entre F (Fontes: sem fertilizante - SF; superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado - SOC) x T (Tempo de incubação do solo após a aplicação dos fertilizantes - 30, 70 e 180 dias) x C (solo com calagem (A) e sem calagem (B)) na fração Pi_{NaHCO_3} . Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para T e F por teste de Tukey ($p < 0,05$)

A fração Po_{NaHCO_3} foi significativamente inferior no solo sem fertilizante aos 30 dias, enquanto os fertilizados não diferiram entre si. Aos 70 e 180 dias após a aplicação dos fertilizantes, o solo que recebeu aplicação de SOC apresentou o maior teor de Po_{NaHCO_3} (Figura 2.16). Esta fração corresponde ao fósforo orgânico lábil, como por exemplo, ácidos nucleicos e glicerolfosfatos (TIESSSEN; MOIR, 1993). Com o aumento da atividade microbiana na aplicação de SOC, parte do fósforo inorgânico do fertilizante e da mineralização da matéria orgânica do solo foram incorporados aos tecidos microbianos e liberados após a lise celular destes organismos nas formas orgânicas acima citadas. Este provável aumento da atividade microbiana proporcionou, ao longo das avaliações, maior teor de Po lábil. Isto é respaldado pela queda significativa do teor de Po_{NaHCO_3} , observada apenas no solo em que foi aplicado o SFS (Figura 2.16).

Figura 2.16 - Efeito da interação entre F (Fontes: sem fertilizante - SF; superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado - SOC) x T (Tempo de incubação do solo após a aplicação dos fertilizantes - 30, 70 e 180 dias) na fração PO_{NaHCO_3} . Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para T e F por teste de Tukey ($p < 0,05$)

A aplicação de fertilizantes aumentou os teores de $Pi_{NaOH\ 0,1}$, independente da correção de acidez (Figura 2.17). Esse resultado é devido a característica argilosa e de alta capacidade de adsorção de fósforo do solo, já que esta fração corresponde ao fósforo inorgânico quimiossorvido a óxidos de alumínio e ferro (CROSS; SCHLESSINGER, 1995).

A calagem foi eficiente em diminuir os teores de $Pi_{NaOH\ 0,1}$ apenas com aplicação do SOC (Figura 2.17). O efeito isolado da correção da acidez ou da proteção exercida pelos quelantes orgânicos no SOC não foram eficientes em diminuir a adsorção do fósforo, porém ao utilizar essas duas ferramentas concomitantemente foi possível verificar efeito minimizador, ou seja, caracterizando efeito sinérgico dos manejos.

Figura 2.17 - Efeito da interação entre F (Fontes: sem fertilizante - SF; superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado - SOC) x C (com calagem e sem calagem) na fração $Pi_{NaOH\ 0,1}$. Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para C e F por teste de Tukey ($p < 0,05$)

Os tratamentos com fertilizantes e a correção do solo apresentaram efeitos sobre a fração de fósforo orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L⁻¹ (Tabela 2.12), que corresponde ao Po moderadamente lábil que é formado principalmente por fosfatos monoésteres caracterizados pela alta interação com os coloides do solo. Segundo Redel et al. (2007), o maior dreno orgânico para o fósforo adicionado via fertilizantes é a formação de complexo deste nutriente com substâncias húmicas. Este fato explica o aumento significativo dos teores desta fração de fósforo orgânico em função da aplicação de fertilizantes em solo argiloso com maiores teores de matéria orgânica. Entretanto, os fertilizantes avaliados não diferiram entre si quanto a essa fração de fósforo orgânico.

Nos solos que receberam calagem houve menores teores de Po_{NaOH 0,1} (Tabela 2.12). O aumento da concentração e atividade dos íons OH⁻, devido à calagem, tornou as cargas superficiais de matéria orgânica mais negativa pela desprotonação de hidroxilas expostas nestes sólidos, aumentando a repulsão entre fosfato e superfície adsorvente (BARROW, 1985) dificultando posterior ligação mais específica.

O fósforo extraído por HCl 1 mol L⁻¹, que corresponde à forma inorgânica de fósforo ligado a cálcio (CROSS; SCHLESINGER, 1995), teve aumento com a aplicação dos fertilizantes (Tabela 2.12), porém apresentou valores irrisórios em relação à quantidade do nutriente aplicado via fertilizante ou presente em outras frações. Isto se deve ao solo estudado ser altamente intemperizado, consequentemente com elevados teores de óxidos de Fe e Al, favorecendo a adsorção do fósforo nestes argilominerais.

A ausência de efeito da correção deve-se a insuficiente quantidade de corretivo adicionado ao solo para elevar o pH e o cálcio a teores que pudessem complexar o fósforo a este cátion em grandes proporções. Para aumentos mais expressivos nos valores de P_{HCl}, a quantidade de CaO aplicada deveria ser maior, de modo a elevar o pH do solo próximo a alcalinidade, fato que não ocorreu neste estudo.

A aplicação dos fertilizantes incrementou os teores de Pi extraído com NaOH 0,5 mol L⁻¹ somente na avaliação feita aos 70 dias de incubação do solo (Figura 2.18). Este dado indica que pequena quantidade de fósforo oriundo do fertilizante sofreu ligações específicas com Fe e Al a ponto de se tornarem protegidas nos microagregados do solo, característica principal desta fração de fósforo.

A aplicação do SOC proporcionou menor teor de Pi_{NaOH0,5} aos 30 dias após a aplicação das fontes em relação aos períodos subsequentes (Figura 2.18). Infere-se, portanto que este fertilizante teve efeito em minimizar a curto e médio prazo as possíveis ligações do

fósforo com Fe e Al, fator importante para manter os teores de fósforo lábil no solo por maior período.

Figura 2.18 - Efeito da interação entre F (Fontes: sem fertilizante - SF; superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado - SOC) x T (Tempo de incubação do solo após a aplicação dos fertilizantes - 30, 70 e 180 dias) na fração $Pi_{NaOH0,5}$. Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para T e F por teste de Tukey ($p < 0,05$)

As frações orgânicas de fósforo extraído com $NaOH\ 0,5\ mol\ L^{-1}$ são aquelas protegidas fisicamente no interior dos agregados (CROSS e SCHLESINGER, 1995), consideradas não lábeis. Nas duas primeiras avaliações houve aumento desta fração com a aplicação dos fertilizantes (Figura 2.19) mostrando que o fósforo aplicado pode ser indisponibilizado às plantas através de ligações complexas com compostos orgânicos presentes no solo em período relativamente curto.

Na última avaliação houve diminuição dos teores de $P_{NaOH0,5}$, nos solos com aplicação de fertilizantes, tornando-os similares aos do solo sem fertilização, devido, provavelmente, a mineralização dos compostos orgânicos que complexam o fósforo.

Figura 2.19 - Efeito da interação entre F (Fontes: sem fertilizante - SF; superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado - SOC) x T (Tempo de incubação do solo após a aplicação dos fertilizantes - 30, 70 e 180 dias) x C (solo com calagem (A) e sem calagem (B)) na fração $Pi_{NaOH\ 0,5}$. Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não diferem, respectivamente, para T e F por teste de Tukey ($p < 0,05$)

2.4 Conclusões

No solo arenoso a maior parte do fósforo aplicado via fertilizantes permanece nas frações inorgânicas lábeis (P_{RTA} e Pi_{NaHCO_3}) as quais têm aumento, em função da aplicação do fertilizante orgânico-complexado;

A prática da calagem e a aplicação de fertilizante orgânico complexado tem efeito sinérgico em aumentar os teores de fósforo extraído por resina de troca aniônica no solo arenoso;

A aplicação de fertilizante orgânico-complexado aumenta as formas de fósforo orgânico lábil no solo com maior teor de argila;

A ação sinérgica da correção da acidez e o uso do fertilizante orgânico-complexado diminui a quantidade de fósforo inorgânico quimiossorvido a ferro e alumínio ($Pi_{NaOH\ 0,1}$) no solo com maior teor de argila.

Referências

- BARROW, N.J. Reaction of anions and cations with variable-charge soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, p. 183-230, 1985.
- BIASSOLI, G.M. **Influência do pH e da força iônica na liberação de fósforo de compostos do tipo Fe - K - P presentes em superfosfatos**. 2003. 76 p. (Dissertação Solos e Nutrição de Plantas)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- BROOKES, P.C.; POWLSON, D.S. Preventing phosphorus losses during perchloric acid digestion of sodium bicarbonate soil extracts. **Journal of Science and Food Agriculture**, London, v. 32, p. 671-674, 1981.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solo do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas, Instituto Agronômico, 1986. 94p. (Boletim técnico, 106).
- CONDRON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 36, p. 199-207, 1985.
- CROSS, A.F.; SCHLESSINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorous in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, n. 3/4, p. 197-214, 1995
- DICK, W.A.; TABATABAI, M.A. determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 6, p. 82-85, 1977.
- ERRO, J.; BAIGORRI, R.; YVIN, J.C.; GARCÍA-MINA, J.M. ³¹P NMR characterization and efficiency of new types of water-insoluble phosphate fertilizers to supply plant available phosphorus in diverse soil types. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Davis, v. 59, 1900–1908, 2011.
- ERRO, J.; URRUTIA, O.; BAIGORRI, R.; APARICIO-TEJO, P.; IRIGOYEN, I.; TORINO, F.; MANDADO, M.; YVIN J. C.; GARCIA-MINA, J. M. Organic Complexed Superphosphates (CSP): physicochemical. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Davis, v. 60, p. 2008–2017, 2012.
- GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 231 p. Tese (Doutorado em Biodinâmica dos Solos) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003. 231p.
- GIOVANNINI, C.; GARCIA-MINA, J.M.; CIAVATTA, C.; MARZADORI, C. Effect of organic-complexed superphosphates on microbial biomass and microbial activity of soil. **Biology and Fertility of Soils**, Florence, v. 49, p. 395–401, 2013.

GROSSL, P.R.; INSKEEP, W.P. Precipitation of dicalcium phosphate dihydrate in the presence of organic acids. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 670–675, 1991.

GUARDADO, I.; URRUTIA, O.; MINA, J.M.G. Size distribution; complexing capacity and stability of phosphate-metal-humic complexes. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Davis, v. 55, p. 408–413, 2007.

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

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

IYAMUREMYE, F.; DICK, R.P.; BAHAM, J. Organic amendments and phosphorus dynamics: phosphorus chemistry and sorption. **Soil Science**, Oxford, v. 161, p. 426-435, 1996.

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

NOBILI, M.; CONTIN, M.; MONDINI, C.; BROOKES, P.C. Soil microbial biomass is triggered into activity by trace amounts of substrate. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v 33, p. 1163–1170, 2001.

NOVAIS, R.F; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471-537.

PROCHNOW, L.I. **Eficiência agrônômica de fosfatos acidulados contendo compostos fosfáticos de ferro para arroz-de-sequeiro e arroz inundado**. 2001. 118 p. Tese (Livre Docência) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo dos nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

RAIJ, B van.; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285 p.

REDEL, Y.; RUBIO, R.; ROUANET, J.L.; BORIE, B. Phosphorus availability in a Chilean Ultisol as affected by tillage and crop rotation. **Geoderma**, Amsterdam, v. 139, p. 388-396, 2007.

RODRIGUES, M. **Sistemas de manejo e a dinâmica das formas de fósforo e da fertilidade em solos de Cerrado**. 2014. 113 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

SAS INSTITUTE. **SAS, OnlineDoc 9.1.3.** Cary, 2004.

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. BARROS, N.F.; FONTES, R.L.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 205-274.

TATE, K.R.; NEWMAN, R.K. Phosphorus fractions of a climosequence of soils in New Zeland tussock gassland. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 14, p. 191-196, 1982.

TIESSEN, H.; MOIR, J.O. Characterization of available P by sequential extraction. In: CARTER, M.R. (Ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. Boca Raton: Lewis Publ., 1993. p. 75–86.

URRUTIA, O.; ERRO, J.; GUARDADO, I.; FRANCISCO, S.S.; MANDADO, M.; BAIGORRI, R., YVIN, J.C.; MINA, J.M.G. Physico-chemical characterization of humic-metal-phosphate complexes and their potential application to the manufacture of new types of phosphate-based fertilizers. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 177, n. 2, p. 128–136, 2014.

3 USO DE SUPERFOSFATO ORGÂNICO-COMPLEXADO NA CULTURA DA CANA-DE- AÇÚCAR

Resumo

Nas adubações, cerca de 80% do total do fósforo aplicado, tornar-se indisponível à planta, sendo que o principal motivo é a adsorção do elemento nos óxidos de ferro e alumínio e argilas 1:1 presentes nos solos intemperizados. Como parte do cultivo da cana-de-açúcar realizado no Brasil ocorre em solos com estas características, uma estratégia para diminuir o efeito dessa adsorção é o uso de superfosfato orgânico-complexado. A justificativa para a eficiência deste produto é a formação de complexos fósforo-metal-ácidos orgânicos que diminuem a fixação de fósforo no solo. O objetivo foi avaliar a efeito da aplicação do superfosfato orgânico-complexado na nutrição e produtividade de cana planta e na primeira soqueira. Para isso foi desenvolvido experimento em um Latossolo Vermelho álico em que avaliou-se os efeitos da aplicação de superfosfato orgânico-complexado (SOC) e superfosfato simples (SFS), nas doses de 0, 45, 90, 135 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em cana planta, além da reaplicação da dose 45 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na soqueira nos tratamentos que anteriormente receberam 45 e 90 kg ha⁻¹. Foram avaliados o acúmulo de matéria seca e nutrientes no colmo e ponteiro, produtividade de colmos industrializáveis e os teores de fósforo no solo após a colheita. Em cana planta a aplicação do SFS aumenta o acúmulo de matéria seca de colmo planta com a aplicação de níveis crescentes de fósforo, enquanto o uso do SOC não tem influência além de promover menor acúmulo de fósforo nesta parte da planta. Na soqueira, a produtividade de colmos industrializáveis e o acúmulo de massa seca no colmo não tem efeito da aplicação dos fertilizantes, porém há menor acúmulo de matéria seca, nitrogênio e fósforo no ponteiro com o uso do fertilizante orgânico-complexado.

Palavras-chave: Fósforo; Superfosfato simples; Produtividade de colmo; Cana-planta; Soqueira

Abstract

In fertilization, about 80% of the total phosphorus applied becomes unavailable to the plant and the main reason is the adsorption of the element in iron and aluminum oxides and clays 1: 1 present in weathered soils. As part of the cultivation of sugar cane in Brazil is conducted in soils with these characteristics, a strategy to decrease the effect of adsorption is the use of organic-complexed superphosphate. The reason of this product efficiency is the formation of phosphorus-metal-organic acids complex that inhibits the fixation of phosphorus in the soil. The aim was to evaluate the effect of application of organic-complexed superphosphate in nutrition and productivity of plant cane and first ratoon. For this an experiment was developed on a typical oxisol in which the effects of application of organic-complexed superphosphate (OCS) and simple superphosphate (SS) at doses of 0, 45, 90, 135 and 180 kg ha⁻¹ P₂O₅ in plant cane were assessed, but doses of 45 kg ha⁻¹ P₂O₅ were reapplied in ratoons in treatments that previously received 45 and 90 kg ha⁻¹. The accumulation of dry matter and nutrients in the stalk and growing point, productivity of industrialized stalks and phosphorus levels in the soil after harvest were evaluated. In plant cane, the application of SS increased the accumulation of dry plant stalk with the application of crescent levels of phosphorus, while the use of OCS had no influence and promoted lower phosphorus accumulation in this part of the plant. In ratoon, the productivity of industrialized stalks and dry matter accumulation in the stem had no effect from the fertilizer application, but there is

less accumulation of dry matter, nitrogen and phosphorus in the growing point with the use of organic-complexed fertilizer.

Keywords: Phosphorus; Single superphosphate; Sugarcane yield; Cane Plant; Sugarcane Ratoon

3.1 Introdução

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com produção estimada para a safra 2014/15 em 671,7 milhões de toneladas (CONAB 2014). Para o desenvolvimento adequado desta cultura é necessário fertilização, com destaque para o fósforo, que depois do nitrogênio, é o macronutriente que mais limita o crescimento dos vegetais, por promover a formação inicial e o desenvolvimento da raiz, exercendo função-chave em vários processos metabólicos das plantas, como armazenamento e transferência de energia, desdobramento de açúcares, formação de sacarose (ALEXANDER, 1973), além de aumentar a eficiência da utilização de água pela planta, bem como a absorção e a utilização de outros nutrientes (KORNDÖRFER, 2004).

Nas adubações, cerca de 80% do total do fósforo aplicado tornar-se indisponível à planta (HOLFORD, 1997). A principal causa da baixa eficiência da fertilização fosfatada é a adsorção de fósforo nos óxidos de ferro e alumínio e argilas 1:1 presentes nos solos altamente intemperizados, justamente onde grande parte do cultivo da cana-de-açúcar é feito Brasil.

A adição de matéria orgânica tem importância na diminuição da adsorção de P devido principalmente a formação, durante o processo de decomposição, de substâncias húmicas (SH) que bloqueiam os sítios de carga positiva dos óxidos de Fe e Al responsáveis pela adsorção de P (HUE, 1991), além de formar complexos com Al ou complexos solúveis com o P da solução do solo, evitando que o mesmo seja adsorvido (IYAMUREMYE; DICK; BAHAM, 1996).

Vários trabalhos têm demonstrado que as substâncias húmicas podem influenciar a acumulação de nutrientes e o crescimento vegetal (VAUGHAN; MALCOLM, 1985), o que levou ao seu uso em várias culturas, seja através da aplicação no sulco de plantio, junto com o fertilizante, via foliar ou adicionadas aos fertilizantes. Porém estes efeitos benéficos foram observados, na maioria dos estudos, quando adicionou-se grandes quantidades dos componentes orgânicos, o que resulta em problemas econômicos e logísticos aos produtores (ERRO et al., 2012).

Tentando solucionar estes inconvenientes foi desenvolvido o superfosfato orgânico-complexado (SOC). Este fertilizante tem como característica a presença de agentes quelantes orgânicos (ácidos húmicos) complexados ao fosfato monocálcio através de pontes metálicas com cálcio, ferro ou alumínio, ou dois destes metais simultaneamente (URRUTIA et al., 2014) introduzidos na reação química para obtenção do superfosfato simples (ERRO et al., 2011). Com proporção de carbono total entre 0,5 a 0,8% (GIOVANNINI et al., 2013), este fertilizante foi desenvolvido e patenteado pelo Grupo Rollier (FR 1050009, 2010).

Giovannini et al (2013) constataram que a aplicação de SOC aumentou a biomassa e atividade microbiana no solo em comparação a aplicação de superfosfato simples. Erro, et al (2011) fazendo a mesma comparação, obtiveram maior peso e concentração de P nas raízes de plantas de trigo fertilizadas com o SOC. A justificativa para a eficiência do SOC é a formação de complexos fósforo-metal-ácidos orgânicos que diminui a fixação de fósforo no solo, incrementando assim o aproveitamento do fertilizante fosfatado (GUARDADO; URRUTIA; MINA, 2007; ERRO et al., 2012). Entretanto há pouca informação sobre o uso deste fertilizante em condições tropicais, principalmente com a cultura da cana-de-açúcar.

O objetivo foi avaliar a efeito da aplicação do superfosfato orgânico-complexado na cana planta e primeira soqueira.

3.2 Material e Métodos

O experimento foi conduzido em área comercial de cana-de-açúcar localizada no município de Charqueada-SP (22° 33' 15"S; 47° 43' 28" W) com altitude de 600 m. A cultivar plantada foi a CTC 14, de forma mecanizada, em novembro de 2011, caracterizando plantio de ano. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho álico (EMBRAPA, 1999), cuja caracterização química (RAIJ, et al., 2001; VITTI, 1989) e textural (CAMARGO et al., 1986) encontram-se respectivamente nas tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.1- Atributos químicos do solo da área experimental

Prof	pH	P	S-SO ₄	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V
Cm	CaCl ₂	-----mg kg ⁻¹ ---				-----mmolc dm ⁻³ -----				%
00-20	5,6	13	12	3,5	41	26	31	70,5	101,5	69,5
20-40	5,5	9	22	3,1	38	22	38	63,1	101,1	62,4

pH= CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; P, K, Ca, Mg = extração pela resina trocadora de íons; H+Al= pH SMP; S-SO₄= extração Ca(H₂PO₄)₂ 0,01 mol-L⁻¹

Tabela 3.2 - Textura do solo da área experimental

Prof cm	Argila	Silte	Areia	Classe textural
	-----g kg ⁻¹ -----			
00-20	642	72	286	muito argiloso
20-40	665	99	236	muito argiloso

Os tratamentos consistiram da aplicação de **superfosfato orgânico-complexado (SOC)** e **superfosfato simples (SFS)**, nas doses de 0, 45, 90, 135 e 180 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em cana planta. Os tratamentos que receberam as doses de 45 e 90 kg ha⁻¹ tiveram reaplicação dos fertilizantes fosfatados na dose de 45 kg ha⁻¹ de P₂O₅ na soqueira, (Tabela 3.3). As concentrações de fósforo (P), cálcio (Ca), enxofre (S) e magnésio (Mg) nos fertilizantes encontra-se na Tabela 3.4. O delineamento experimental foi em blocos casualizados com quatro repetições.

Houve aplicação de enxofre elementar (95 % de S) visando à equiparação da quantidade do nutriente entre os tratamentos devido a sua presença nos fertilizantes aplicados em diferentes doses.

Tabela 3.3 – Descrição dos tratamentos

Tratamentos	Épocas de aplicação		
	Plantio	Soqueira	Total
	-----P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹) -----		
SOC 0+0	0	0	0
SOC 45+45	45	45	90
SOC 90+45	90	45	135
SOC 135+00	135	0	135
SOC 180+00	180	0	180
SFS 0+0	0	0	0
SFS 45+45	45	45	90
SFS 90+45	90	45	135
SFS 135+00	135	0	135
SFS 180+00	180	0	180

Tabela 3.4 - Concentração de fósforo (P_2O_5) total e solúvel e cálcio (Ca), enxofre (S) e magnésio (Mg) total em superfosfato orgânico-complexado (SOC) e superfosfato simples utilizados no experimento (SFS)

superfosfato orgânico complexado (SOC) e superfosfato simples utilizados no experimento (SFS)							
Fertilizante	----- P ₂ O ₅ -----				Ca	S	Mg
	Total	H ₂ O	CNA + H ₂ O	AC	----- Total -----		
	----- % -----						
SOC	19,10	15,46	17,38	18,47	20,11	11,56	0,58
SFS	19,56	14,91	17,68	18,43	19,10	11,72	0,62

H₂O: água; CNA + H₂O: citrato neutro de amônio + água; AC: ácido cítrico

Todos os tratamentos receberam 50 e 120 kg ha⁻¹ de N e K₂O respectivamente na cana planta e 100 kg ha⁻¹ de ambos os nutrientes na soqueira.

A unidade experimental consistiu de parcela com 10 linhas de cana-de-açúcar de 15 m de comprimento, espaçadas alternadamente em 0,9 e 1,5 m, totalizando 180 m².

Foram realizadas avaliações na cana planta e na primeira soqueira. Dez meses após o plantio e o primeiro corte fez-se avaliação biométrica da cana-de-açúcar colhendo-se, em 2 metros de cada parcela, toda a parte aérea das plantas, separando-a em ponteiro e colmo, os quais foram pesados. Após a pesagem, amostras de cada parte do vegetal foram trituradas em picadora de forragem e a seguir subamostrado (aproximadamente 0,3 kg). As subamostras foram pesadas antes e após secagem a 65°C em estufa ventilada, para determinação da umidade do material. As amostras secas foram trituradas em moinho tipo Willey, em seguida determinou-se nitrogênio, por digestão sulfúrica e destilação; e fósforo e potássio por digestão nitroperclórica (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

A quantidade dos nutrientes acumulados foi calculada pelo produto da matéria seca multiplicada pelo teor do nutriente contido em cada componente da planta amostrado.

A produtividade dos colmos comercializáveis foi determinada com o auxílio de caminhão instrumentado (com uma balança adaptada na carroceria), sendo colhidas, de forma mecânica, todas as linhas da unidade experimental. Devido a erros logísticos, em que a cana planta do experimento foi colhida pela usina, houve a determinação da produtividade de colmo comercializáveis apenas da soqueira, 12 meses após o primeiro corte.

No momento da colheita foi realizada amostragem do solo, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm de profundidade, visando determinar os teores de fósforo. A amostragem de solo foi realizada na linha da cultura (faixa de adubação), com trado holandês, coletando-se aleatoriamente 5 amostras simples, para formar uma composta. O fósforo foi determinado pelo método da resina (RAIJ et al., 2001).

Os dados de cana planta foram submetidos à análise de variância, utilizando o teste F a 0,01 e 0,05 de probabilidade. Diante da significativa interação das variáveis os dados foram submetidos ao teste de comparação de médias pelo teste de Tukey ($p=0,05$) e estudo de regressão para efeito de doses, enquanto nos dados referentes a soqueira foi aplicado contraste ortogonal. Os dados foram analisados pelo programa SAS (2004).

3.3 Resultado e discussão

Os valores médios e a significância para os atributos biométricos e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em cana planta e teores de fósforo no solo por ocasião da colheita são mostrados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Valores médios e significância das variáveis analisadas na cana planta, massa seca de colmo (MSC); massa seca de ponteiro (MSP); nitrogênio no colmo (NC); fósforo no colmo (PC); potássio no colmo (KC); nitrogênio no ponteiro (NP); fósforo no ponteiro (PP); potássio no ponteiro (KP); teor de fósforo no solo de 0 a 20 cm (P_{0-20}); teor de fósforo no solo de 20 a 40 cm (P_{20-40})

Fonte de Variação	MSC Mg ha ⁻¹	MSP	NC	PC	KC	NP	PP	KP	P ₀₋₂₀	P ₂₀₋₄₀
-----kg ha ⁻¹ -----mg dm ⁻³										
----- F -----										
SFS	34,3	6,2	162,3	14,4 a	235,9	59,2	6,0	94,1	20,5	15,1
SOC	32,8	5,6	158,7	12,1 b	230,5	54,3	5,6	80,5	19,5	13,6
DMS	1,8	0,8	14,5	1,6	50	7,1	0,7	15,2	2,5	2,0
----- D -----										
0	31,8	6,2	129,8 b	10,7c	207,5	57,3	5,7	86,3	14,2 c	11,0 b
45	31,8	5,3	148,7 b	11,4bc	204,3	51,7	5,2	73,2	18,8bc	14,5 a
90	35,4	6,2	183,1 a	14,5ab	267,1	59,9	6,6	96,6	20,2ab	14,1 a
135	33,8	5,6	173,1ab	14,7ab	232,1	53,7	5,6	77,0	21,6ab	14,3 a
180	35,0	6,3	167,8ab	14,9 a	255,1	61,2	6,0	103,3	25,1 a	15,3 a
DMS	4,1	1,4	32,7	3,7	90,5	15,9	1,6	32	5,6	3,5

F	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
D	ns	ns	**	**	ns	ns	ns	ns	**	*
F x D	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CV (%)	8,3	16,7	13,9	19,1	33	19,1	18,9	25,1	19,3	13,7

**, * e ns: significância < 0.01, < 0.05 e não significativo, respectivamente; F: Fertilizante (superfosfato simples – SFS e superfosfato orgânico-complexado - SOC); D: Dose de P_2O_5 (0; 45; 90; 135; 180 kg ha⁻¹); DMS: Diferença Mínima significativa; CV: Coeficiente de variação. Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem significativamente por teste de Tukey ($p<0,05$)

A aplicação de níveis crescentes de fósforo, com o uso do superfosfato simples, teve efeito linear no acúmulo de matéria seca de colmo dez meses após o plantio, com incremento próximo a 19% com o uso da maior dose (Figura 3.1), o que era esperado devido ao baixo teor de fósforo no solo (13 mg dm^{-3}). Entretanto, não houve resposta em acúmulo de massa seca de colmo com o aumento dos níveis de fósforo aplicado com o uso do fertilizante orgânico-complexado (Figura 3.1).

Segundo Urrutia et al. (2014) plantas que recebem adubação com fertilizantes orgânico-complexados tendem a acumular menos fósforo, porém apresentam melhor aproveitamento metabólico do nutriente depois que este é absorvido, de maneira que a produção vegetal não é afetada, quando comparado com plantas que receberam fósforo oriundo das fontes solúveis convencionais. Estes autores afirmam que devido à complexação do fósforo é necessário que a planta exsude pelas raízes substâncias, principalmente ácidos orgânicos, a fim de liberar o nutriente do complexo orgânico para poder ser absorvido, o que envolve gasto de energia, levando a planta, através de respostas metabólicas, a maximizar o aproveitamento do fósforo absorvido. Os resultados encontrados neste trabalho corroboram parcialmente aos encontrados por estes autores, sendo que com a aplicação de SOC houve menor acúmulo médio de fósforo no colmo, porém a resposta em tecido vegetal foi inferior do que com o uso do superfosfato simples (Figura 3.1). Com a aplicação das maiores doses de fósforo na forma de SOC pode ter havido maior gasto energético da planta para absorver o nutriente, justificando a ausência de incremento em acúmulo de matéria seca no colmo.

Figura 3.1 - Efeito da interação entre Fertilizantes (superfosfato simples - SFS e superfosfato orgânico-complexado - SOC) e Doses de P₂O₅ (0, 45, 90, 135, 180 kg ha⁻¹) na massa seca de colmo da cana planta; **, * e ns: significância < 0.01, < 0.05 e não significativo, respectivamente

Os acúmulos de nitrogênio e fósforo no colmo tiveram efeito positivo da aplicação de níveis crescentes de fósforo através dos fertilizantes (Figura 3.2A e 3.2B). Segundo Novais e Smith (1999) o fósforo influencia a absorção e o metabolismo do nitrogênio, em que o suprimento adequado de P aumenta a absorção e transporte de nitrato na planta.

O maior acúmulo destes nutrientes é respaldado pelo incremento dos teores de fósforo no solo em função da sua aplicação em doses crescentes. A aplicação dos fertilizantes fosfatados aumentou os teores de fósforo disponível no solo nas camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm, com incrementos mais expressivos na camada superficial (Figuras 3.2 C e 3.2 D). Esse efeito era esperado em razão do montante de fósforo aplicado e o local de aplicação dos fertilizantes estar a aproximadamente à 20 cm da superfície.

Figura 3.2 - Efeito das doses de P_2O_5 (0, 45, 90, 135, 180 $kg\ ha^{-1}$) no acúmulo de nitrogênio (A) e fósforo (B) no colmo e nos teores de fósforo do solo a 0-20 cm (C) e 20-40 cm (D)

Os valores médios, os contrastes ortogonais e a suas respectivas significâncias para as variáveis avaliadas na soqueira estão mostrados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Valores médios, significância e contraste ortogonal das variáveis, analisadas na soqueira, da produção de colmos industrializáveis (THC), massa seca de colmo (MSC); massa seca de ponteiro (MSP); teor de fósforo no solo de 0 a 20 cm (P_{0-20}); teor de fósforo no solo de 20 a 40 cm (P_{20-40})

Fonte de Variação	THC	MSC	MSP	P_{0-20}	P_{20-40}
	----- Mg ha ⁻¹ -----			mg dm ⁻³	
SOC 0+0	90,5	34,8	5,6	16,7	13,8
SOC 45+45	91,0	30,5	5,2	21,8	19,0
SOC 90+45	95,0	35,8	6,5	28,1	18,2
SOC 135+00	92,5	34,3	5,1	24,1	17,1
SOC 180+00	92,6	31,6	5,6	23,7	16,6
SFS 0+0	90,5	34,8	5,6	16,7	13,8
SFS 45+45	95,7	32,5	5,5	27,5	19,3
SFS 90+45	88,6	33,0	8,1	26,9	20,4
SFS 135+00	90,7	33,0	7,7	26,1	20,2
SFS 180+00	89,4	35,1	8,4	21,8	17,5
CV (%)	11,5	16,9	26,9	22,0	17,0
----- Contrastes -----					
(0+0) vs (fertilizado)	-0,3 ns	1,6 ns	-0,9 ns	-7,6 *	-4,8 *
(SOC) vs (SFS)	1,3 ns	0,3 ns	-1,8 **	-2,7 ns	-1,6 ns
(SOC 90+45) vs (SFS 90+45)	6,4 ns	2,9 ns	-1,5 ns	1,1 ns	-2,3 ns
(SOC 135+00) vs (SFS 135+00)	1,7 ns	1,4 ns	-2,7 **	-2,0 ns	-3,1 ns
(90+45) vs (135+00)	-2,3 ns	0,8 ns	0,9 ns	2,4 ns	0,6 ns
(45+45) vs (90+45) + (135+00)	2,0 ns	-2,5 ns	-1,5 **	-0,1 ns	0,2 ns
(45+45) vs (180+00)	2,3 ns	-1,9 ns	-1,7 **	1,9 ns	2,1 ns
(90+45) + (135+00) vs (180+00)	1,4 ns	0,7 ns	-0,1 ns	2,0 ns	1,9 ns

**, * e ns: significância < 0.01, < 0.05 e não significativo, respectivamente

O acúmulo de massa seca no colmo aos 10 meses após o primeiro corte e a produção de colmo industrializável (THC) não foram afetados por nenhuma das variáveis avaliadas em cana soca (Tabela 3.6). A ausência de resposta a adubação fosfatada na soqueira, segundo Korndorfer e Alcarde (1992), tem sido relacionado ao efeito residual do nutriente no aplicado no plantio e à maior eficiência da cana-soca em acumular fósforo, oriundo do solo ou do fertilizante. Além disso, devido à adsorção do ânion fosfato na superfície dos minerais de argila e sua pequena mobilidade no solo (FONTES; WEED, 1996), tem-se baixo aproveitamento pelas soqueiras do nutriente recentemente aplicado. Provavelmente neste ciclo houve maior coeficiente de utilização biológica (CUB), ou seja, produção vegetal por

unidade de nutriente absorvido (FREIRE, 2001). A maior ou menor competição entre planta e solo pelo P aplicado como fertilizante, reflete-se em maior ajuste da planta na utilização da quantidade de P que lhe é colocado a disposição (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Conforme compilação feita por Castro (2009), a eficiência de absorção, sob baixa disponibilidade de P, pode ser influenciada por alterações morfológicas, fisiológicas e/ou bioquímicas no sistema radicular das plantas, tais como: desenvolvimento de raízes laterais e de pelos radiculares, aumento na relação entre raízes e parte aérea; mudanças na arquitetura radicular; formação de raízes proteóides; aumento na associação com fungos micorrízicos; aumento na velocidade máxima de absorção; mudanças no pH da rizosfera; exsudação de compostos orgânicos pelas raízes e níveis de fosfatases nas células das raízes.

O acúmulo de nutrientes no colmo seguiu a mesma tendência da matéria seca, não apresentando influência das fontes de variação (Tabela 3.7).

A massa seca dos ponteiros foi influenciada pelos fatores fertilizante e nível de P_2O_5 (Tabela 3.6). As plantas que receberam as menores doses de fósforo ou o uso do fertilizante orgânico-complexado tiveram menor acúmulo de matéria seca, nitrogênio e fósforo no ponteiro (Tabela 3.6 e 3.7).

O uso de fósforo em baixas doses ou organicamente complexado, provavelmente dificultou o acesso destas plantas ao nutriente, diminuindo a sua absorção e consequente acúmulo. A menor entrada de fósforo teve como consequência diminuição na absorção de nitrato, pela ação sinérgica de ambos nutrientes, levando ao menor desenvolvimento e acúmulo de massa no ponteiro, devido à importância dos elementos no metabolismo vegetal. A necessidade de descomplexação do fósforo ao quelante orgânico pela planta no SOC (URRUTIA et al., 2014), pode justificar os resultados supracitados, quando aplicou-se esta fonte alternativa de fósforo.

Nas profundidades avaliadas, houve incremento nos teores de fósforo no solo à adubação fosfatada independente da fonte. Este fato era esperado, principalmente na soqueira, em virtude de dois ciclos de extração sem a adição do nutriente. Entre os tratamentos que receberam fertilizantes, não houve efeito significativo no teor de fósforo no solo (Tabela 3.6), devido principalmente a aplicação do nutriente na soqueira nos tratamentos que receberam as menores doses acumuladas nos dois ciclos. O fósforo aplicado na cana planta, devido ao maior tempo de contato do nutriente com o solo, teve a sua disponibilidade diminuída ao longo do tempo, enquanto que o nutriente aplicado em soqueira, devido ao menor tempo de contato com os colóides do solo, elevou os teores do elemento no solo a valores similares.

Tabela 3.7 – Valores médios, significância e contraste ortogonal das variáveis, analisadas na soqueira, de nitrogênio no colmo (NC); fósforo no colmo (PC); potássio no colmo (KC); nitrogênio no ponteiro (NP); fósforo no ponteiro (PP); potássio no ponteiro (KP)

Fonte de Variação		NC	PC	KC	NP	PP	KP
		----- kg ha ⁻¹ -----					
SOC	0+0	135,5	10,3	256,6	43,2	4,6	86,9
SOC	45+45	111,2	7,7	196,4	43,4	4,2	94,3
SOC	90+45	172,7	10,3	254,2	59,7	5,9	104,1
SOC	135+00	140,1	8,5	182,9	49,5	4,5	83,2
SOC	180+00	141,8	8,5	164,8	53,7	5,0	86,5
SFS	0+0	135,5	10,3	256,6	43,2	4,6	86,9
SFS	45+45	141,2	8,5	176,2	50,7	4,6	86,2
SFS	90+45	156,6	8,5	192,0	75,7	6,8	130,5
SFS	135+00	137,1	9,2	220,7	70,7	6,4	104,9
SFS	180+00	139,0	8,0	281,0	75,8	7,7	128,9
CV (%)		24,3	25,6	29,3	28,2	28,4	26,9
		----- Contrastes -----					
(0+0) vs (fertilizado)		-10,9 ns	1,6 ns	47,9 ns	-16,7 **	-1,0 ns	-15,4 ns
(SOC) vs (SFS)		-2,1 ns	0,2 ns	-18,1 ns	-16,6 **	-1,5 **	-20,6 ns
(SOC 90+45) vs (SFS 90+45)		16,1 ns	1,7 ns	61,2 ns	-15,9 ns	-0,9 ns	46,6 ns
(SOC 135+00) vs (SFS 135+00)		2,9 ns	-0,7 ns	-37,8 ns	-21,1 **	-2,0 **	-26,5 ns
(90+45) vs (135+00)		26,1 ns	0,6 ns	21,7 ns	7,6 ns	0,9 ns	-10,8 ns
(45+ 45) vs (90+45) + (135+ 00)		-25,4 ns	-1,1 ns	-26,4 ns	-16,8 **	-1,5 **	-15,4 ns
(45+45) vs (180+00)		-14,2 ns	-0,2 ns	-36,6 ns	-17,7 **	-1,9**	-17,5 ns
(90+45) + (135+00) vs (180+00)		11,2 ns	0,9 ns	-10,2ns	-0,9 ns	-0,4 ns	-2,1 ns

**, * e ns: significância < 0.01, < 0.05 e não significativo, respectivamente

3.4 Conclusões

Em cana-de-açúcar, CTC 14, plantada nos anos agrícolas 2011/12 (cana planta de ano) e 2012/13 (cana soca), em Latossolo Vermelho álico no município de Charqueada-SP, a aplicação de duas fontes de fósforo, superfosfato orgânico complexado e superfosfato simples, leva as seguintes conclusões:

Plantas fertilizadas com o superfosfato simples apresentam aumento de matéria seca de colmo em cana planta com o aumento das doses de P₂O₅, enquanto a aplicação do superfosfato orgânico-complexado não tem nenhuma influência.

A adubação com o fertilizante orgânico-complexado promove menor acúmulo de fósforo no colmo aos dez meses após o plantio, em relação à aplicação do fertilizante convencional mineral.

A aplicação de níveis crescentes de fósforo no solo aumenta o acúmulo de P e N no colmo em cana planta, mostrando efeito sinérgico destes nutrientes;

Os teores de fósforo no solo aumentam linearmente devido a aplicação das doses crescentes de fósforo, independentemente da fonte, com o efeito mais pronunciado na camada de 0 a 20 cm.

A aplicação de fósforo na soqueira não tem efeito na produtividade de colmos industrializáveis e o acúmulo de massa seca no colmo aos dez meses após o primeiro corte.

A soqueira fertilizada com superfosfato orgânico-complexado tem menor acúmulo de matéria seca, nitrogênio e fósforo no ponteiro em relação às plantas que receberam superfosfato simples.

Os teores de fósforo no solo, ao final da primeira soqueira, revelou-se significativamente inferior, somente no tratamento controle (sem aplicação de fósforo).

Referências

ALEXANDER, A.G. **Sugarcane physiology**: a comprehensive study of the *Saccharum* source-to-sink system. Amsterdam: Elsevier, 1973. 752 p.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solo do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas, Instituto Agronômico, 1986. 94p. (Boletim técnico, 106).

CASTRO, G. **Eficiência de absorção e utilização de fósforo em batata cultivada in vitro**. 2009. 52 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2009.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Central de Informações Agropecuárias. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 25 abr. 2014.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solo**. Brasília: Embrapa Produção de informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

ERRO, J.; BAIGORRI, R.; YVIN, J.C.; MINA, J.M.G. ³¹P NMR characterization and efficiency of new types of water-insoluble phosphate fertilizers to supply plant available phosphorus in diverse soil types. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Davis, v. 59, 1900–1908, 2011.

ERRO, J.; URRUTIA, O.; BAIGORRI, R.; APARICIO-TEJO, P.; IRIGOYEN, I.; TORINO, F.; MANDADO, M.; YVIN J. C.; MINA, J. M. G. Organic Complexed Superphosphates (CSP): physicochemical. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Davis, v. 60, p. 2008–2017, 2012.

FONTES, M.P.F.; WEED S.B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 72, p. 37–51, 1996.

FREIRE, F.J. **Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana-de-açúcar**. 2001. 144 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

GIOVANNINI, C., GARCIA-MINA, J. M., CIAVATTA, C., MARZADORI, C. Effect of organic-complexed superphosphates on microbial biomass and microbial activity of soil. **Biology and Fertility of Soils**, Florence, v. 49, p. 395–401, 2013.

GUARDADO, I.; URRUTIA, O.; MINA, J. M. G. Size distribution; complexing capacity and stability of phosphate-metal-humic complexes. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Davis, v. 55, p. 408–413, 2007.

HOLFORD, I.C.R. Soil phosphorus: its measurement and, its uptake by plants. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 35, n. 3, p. 227–239, 1997.

IYAMUREMYE, F.; DICK, R.P.; BAHAM, J. Organic amendments and phosphorus dynamics: phosphorus chemistry and sorption. **Soil Science**, Baltimore, v. 161, p. 426–435, 1996.

KORNDÖRFER, G.H. Fósforo na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2004. p. 290–306.

KORNDÖRFER, G.H.; ALCARDE, J.C. Acúmulo e teor de fósforo em folhas de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, p. 217–222, 1992.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.B **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

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

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2001. 285p.

SAS INSTITUTE. **SAS, OnlineDoc 9.1.3**. Cary, 2004.

URRUTIA, O.; ERRO, J.; GUARDADO, I.; FRANCISCO, S.S.; MANDADO, M.; BAIGORRI, R.; YVIN, J.C.; MINA, J.M.G. Physico-chemical characterization of humic-metal-phosphate complexes and their potential application to the manufacture of new types of

phosphate-based fertilizers. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, New York, v. 177, n. 2, p. 128–136, 2014.

VAUGHAN, D.; MALCOLM, R.E. Influence of humic substances on growth and physiological processes. In: _____. (Ed.). **Soil organic matter and biological activity**. Dordrecht: Martins Nijhoff Dr W. Junk, 1985. p. 37-75.

VITTI, G.C. **Avaliação e interpretação do enxofre no solo e na planta**. Jaboticabal: Funep, 1989. 37 p.