



Frações de fósforo em solo sob cana-de-açúcar adubada com fosfatos e torta de filtro⁽¹⁾.

Anelisa de Aquino Vidal Lacerda Soares⁽²⁾; Gustavo Caione⁽³⁾; Renato de Mello Prado⁽⁴⁾; Marcos Rodrigues⁽⁵⁾; Paulo Sergio Pavinato⁽⁶⁾; Cid Naudi Silva Campos⁽⁷⁾.

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos do CNPq.

⁽²⁾ Pesquisador Científico; Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios; Marília, SP; vidal@apta.sp.gov.br; ⁽³⁾ Professor; Universidade do Estado do Mato Grosso; ⁽⁴⁾ Professor; Universidade Estadual Paulista; ⁽⁵⁾ Doutorando; Universidade de São Paulo; ⁽⁶⁾ Professor; Universidade de São Paulo; ⁽⁷⁾ Doutorando; Universidade Estadual Paulista.

RESUMO: Neste trabalho foram quantificadas as frações inorgânicas e orgânicas de P em um Argissolo Vermelho Amarelo, após dois ciclos da cultura da cana-de-açúcar, decorrentes da aplicação de diferentes fontes de fósforo e de torta de filtro. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com arranjo fatorial 4x2 e três repetições, envolvendo oito tratamentos, sendo: controle (sem P); superfosfato triplo; fosfato natural de Araxá e fosfato natural reativo Bayóvar®; na ausência e na presença de 7,5 t ha⁻¹ (base seca) de torta de filtro. Todas as fontes de fósforo foram aplicadas na dose de 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ solúvel em ácido cítrico que representou 50% da dose recomendada por Raij e Cantarella (1997). Após dois ciclos de cultivo da cana-de-açúcar foram retiradas amostras de solo na profundidade de 0–20 cm para o fracionamento do P. As fontes de P afetaram, de maneira variável, as frações do nutriente no solo. O uso da torta de filtro proporcionou aumento de frações lábeis de Pi e Po no solo e, conseqüentemente, redução do P em formas de menor labilidade.

Termos de indexação: frações de fósforo, composto orgânico, superfosfato triplo.

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar se destaca no cenário brasileiro com produção, na safra 2013/2014, de 741,7 milhões de toneladas, em uma área de 9,9 milhões de hectares (Agrianual, 2015). Conseqüentemente, é uma das culturas que mais consome fertilizantes, devido, principalmente, a maioria das áreas de cultivo, estarem instaladas em solos com elevado grau de intemperismo. Desta forma, a adubação fosfatada no plantio da cana-de-açúcar é primordial para o aumento da produtividade da cana planta, soqueiras subsequentes e longevidade dos canais (Caione, 2013).

Dentre os macronutrientes primários, o fósforo é o que apresenta maior opção de fontes no mercado,

as quais podem variar quanto à reatividade. Os fosfatos de alta reatividade apresentam elevada eficiência agrônômica em curto prazo e superior custo por unidade. Há forte competição entre o solo e planta pelo P desses fosfatos (Novais et al., 2007). Como alternativa às fontes solúveis, há fosfatos de menor reatividade, como os naturais reativos. Estes, embora apresentem menor disponibilidade imediata do nutriente para as plantas, normalmente apresentam menor custo (Horowitz & Meurer, 2004). De acordo com Novais & Smyth (1999), em solos com elevada capacidade de adsorção de P, o uso dessas fontes menos reativas pode ser mais conveniente, desde que a menor reatividade não implique em restrição do processo de difusão, que garante o suprimento de P à planta.

A aplicação de compostos orgânicos, como a torta de filtro, pode influenciar na disponibilidade de P. Os mecanismos envolvidos na redução da adsorção de P têm sido atribuídos à combinação de aumento do pH, com diminuição do Al trocável e, também, com a quantidade de P mineralizável que é liberada, pelas fontes de M.O. (Iyamuremye; Dick, 1996), por meio da adsorção competitiva entre os ácidos orgânicos e o P (Erich; Fitzgerald; Porter, 2002), e a complexação de metais e as reações de dissolução (afetando óxidos de Fe e de Al) podem, potencialmente, reduzir o número de sítios de adsorção, liberando P para solução (Guppy et al., 2005).

No entanto, poucas são as informações na literatura sobre o comportamento do P no solo após a aplicação de fontes de P juntamente com compostos orgânicos. Assim, estudos sobre frações de P em solos tem sido realizados no Brasil com o uso da técnica de fracionamento químico proposta por Hedley et al. (1982). Essa técnica usa extratores químicos aplicados seqüencialmente em uma mesma amostra, para remoção progressiva das frações mais disponíveis até as mais estáveis de P inorgânico (Pi) e orgânico (Po).

A resina trocadora de ânions (RTA) inicia o fracionamento com a extração de frações lábeis de P inorgânico (Pi-res). O fracionamento continua



com uso de NaHCO_3 que, também, extrai frações lábeis de P inorgânico e orgânico (Pi-bic e Po-bic). Na sequência, o P é extraído pelo NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (Pi-hid¹ e Pohid¹) e NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (Pi-hid² e Pohid²) que representam, em geral, o P inorgânico ligado aos óxidos e às argilas silicatadas, com energia de ligação intermediária, e o P orgânico de frações moderadamente lábeis (Cross & Schlessinger, 1995). O HCl extrai o P inorgânico contido nos fosfatos de cálcio e fortemente adsorvido aos coloides. A digestão do solo com H_2SO_4 e H_2O_2 finaliza o processo de fracionamento com extração do P residual inorgânico + orgânico (Presidual) do solo, caracterizado por frações recalcitrantes de P, que não contribuem para a nutrição das plantas a não ser em situações de extrema carência no solo (Gatiboni et al., 2005).

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo quantificar frações inorgânicas e orgânicas de P, após dois ciclos da cultura da cana-de-açúcar, decorrentes da aplicação de fontes de fósforo e torta de filtro.

MATERIAL E MÉTODOS

Um estudo de fracionamento de P foi realizado no Departamento de Ciência do Solo da Universidade de São Paulo. Utilizaram-se amostras de solo proveniente de um experimento onde se comparavam fontes de P associadas à aplicação de torta de filtro na cultura da cana-de-açúcar. O experimento foi realizado em uma área da Usina Catanduva S/A, no município de Santa Adélia, SP, situadas a $21^\circ 05'$ de latitude sul e $48^\circ 54'$ de longitude oeste, a uma altitude média de 550 m.

O solo foi classificado em Argissolo Vermelho Amarelo (Santos et al., 2013), e apresentava os seguintes resultados de análises químicas: pH (CaCl_2)= 5,4; M.O.= 12 g dm^{-3} ; P (resina)= 9 mg dm^{-3} ; K^+ = $3,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Ca^{2+} = $22 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Mg^{2+} = $15 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ = $18 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$; CTC= $50,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e V%= 40,2.

Foram avaliados oito tratamentos sendo: controle (sem P); superfosfato triplo; fosfato natural de Araxá e fosfato natural reativo Bayóvar®; na ausência e na presença de $7,5 \text{ t ha}^{-1}$ (base seca) de torta de filtro. Todas as fontes de fósforo foram aplicadas na dose de 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 solúvel em ácido cítrico que representou 50% da dose recomendada por Raij e Cantarella (1997), a fim de verificar a possibilidade de redução da quantidade do fertilizante mineral na presença da torta de filtro.

Cada unidade experimental foi composta por cinco linhas, com 15 m de comprimento, distanciadas 1,5 m entre si, sendo as três linhas

centrais consideradas úteis para as avaliações, desconsiderando-se 1,0 m em cada extremidade. Aos 24 meses após a aplicação dos tratamentos foi realizada a amostragem do solo na profundidade de 0,0-0,20 m.

Aos 24 meses após a aplicação dos fertilizantes foram coletadas, na camada de 0-20 cm, 20 amostras simples nas linhas centrais de plantio de cada parcela. As amostras de solo foram submetidas à análise de fracionamento das formas de fósforo, de acordo com a metodologia descrita por Hedley et al. (1982) com modificações propostas por Cross e Schlesinger (1995) e Gatiboni et al. (2007). A extração sequencial foi com resina trocadora de ânions (0,5 g de solo + 10 mL de H_2O + resina); 10 mL de NaHCO_3 ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$); 10 mL de NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$); 10 mL de HCl (1 mol L^{-1}); 10 mL de NaOH ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$) e digestão residual com $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$. O fósforo inorgânico nos extratos ácidos foi determinado através do método de Murphy e Riley (1962) e nos extratos alcalinos segundo o método proposto por Dick e Tabatabai (1977).

As frações orgânicas foram extraídas por NaHCO_3 ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$), NaOH ($0,1 \text{ mol L}^{-1}$) e NaOH ($0,5 \text{ mol L}^{-1}$) e determinadas por digestão do extrato com persulfato de amônio e H_2SO_4 , em autoclave a 120°C , durante 2 h. Em seguida, o P orgânico foi determinado segundo Murphy e Riley (1962).

Para a interpretação dos resultados identificados no fracionamento, as formas de P foram classificadas em lábeis (Pi-res, Pi-bic e Po-bic), moderadamente lábeis (Pi-hid¹, Po-hid¹, Pihid² e Pohid²) e não-lábeis (P-HCl e Presidual), conforme sugerido por Cross e Schlesinger (1995).

Adotou-se o delineamento de blocos casualizados, com arranjo fatorial 4x2 e três repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O P inorgânico extraído pela resina trocadora de ânions (P-res) e pelo bicarbonato de sódio (Pi-bic) e o P orgânico extraído, também, pelo bicarbonato de sódio (Po-bic) são os primeiros extratores utilizados no fracionamento de Hedley. De acordo com Gatiboni et al. (2007), eles extraem formas de P lábeis que contribuem ativamente no suprimento de P para as plantas. Sendo assim, os dados de P na fração P-res mostraram que, as fontes fosfatadas usadas no ensaio não aumentaram as quantidades de P lábil no solo. Notou-se, também, que no



tratamento sem torta de filtro, os teores foram menores em comparação ao tratamento com torta de filtro, demonstrando que o composto orgânico pode favorecer a presença de formas de P disponíveis em solução. O mesmo comportamento foi verificado nas frações Pibic e Pobic (**Tabelas 1 e 2**).

Tabela 1 – Teores de fósforo extraídos por resina trocadora de ânions, NaHCO_3 0,5 mol L^{-1} , NaOH 0,1 mol L^{-1} e NaOH 0,5 mol L^{-1} e HCl 1,0 mol L^{-1} em um Argissolo Vermelho Amarelo submetido a diferentes fontes de fósforo na presença e ausência de torta de filtro.

Tratamentos	Fração de P				
	P-res	Pi-bic	Pi-hid ¹	Pi-hid ²	P-HCl
	mg dm^{-3}				
Fontes de fósforo (P)					
Sem P	15,3	31,1	29,3 ab	23,6 b	6,6 c
FN	10,3	21,9	26,3 b	42,2 a	152,2 a
FNR	14,8	29,3	32,2 ab	29,3 b	38,2 b
ST	19,5	39,2	39,0 a	26,3 b	8,4 c
DMS	9,33	16,61	11,20	8,85	27,35
Torta de filtro (T)					
Sem	6,6 b	18,4 b	39,6 a	30,8	53,3
Com	23,4 a	42,4 a	23,8 b	29,9	49,4
DMS	4,86	8,66	5,84	4,61	14,26
Teste de F					
P	2,75 ^{ns}	3,06 ^{ns}	4,01*	14,62**	106,67**
T	54,40**	35,33**	33,4**	0,16 ^{ns}	0,34 ^{ns}
P x T	0,85 ^{ns}	1,44 ^{ns}	1,17 ^{ns}	1,02 ^{ns}	0,67 ^{ns}
CV (%)	37,13	32,59	21,08	17,38	31,75

^{1, 2}- NaOH (0,1 e 0,5 mol L^{-1}). Médias seguidas de letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). **, * e ns: significativo a 1% e 5% de probabilidade e não significativo. CV: coeficiente de variação. FN: Fosfato natural de Araxá; FNR: fosfato natural reativo Bayóvar. ST: superfosfato triplo. Pi: fósforo inorgânico

As formas inorgânicas e orgânicas de P extraídas por NaOH 0,1 mol L^{-1} (Pi-hid¹ e Po-hid¹) e NaOH 0,5 mol L^{-1} (Pi-hid² e Pohid²) representam, em geral, o P inorgânico adsorvido aos óxidos e às argilas silicatadas com energia de ligação intermediária e o P orgânico presente em formas medianamente lábeis (Cross & Schlessinger, 1995). O uso do hidróxido nas duas concentrações (**Tabelas 1 e 2**) mostrou que o P inorgânico proveniente do fertilizante superfosfato triplo tende a estar retido em maior quantidade nos óxidos e nas argilas silicatadas, havendo modificações menos expressivas quando usado o extrator Pi-hid². Já o fosfato natural de Araxá resultou em maior valor de Pi-hid². Esse mesmo comportamento foi descrito por Santos et al. (2008) ao estudar frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação no cultivo do milho. A presença de torta de filtro contribuiu para que menores quantidades de P estivessem adsorvidas aos óxidos e argilas silicatadas, sendo este resultado representado pelas frações Pi-hid¹, Po-hid¹ e Po-hid².

Os valores de P extraídos por HCl 1,0 mol L^{-1} (PiHCl) mostraram que, no solo sem adição de fosfato (testemunha) e no tratamento com superfosfato triplo, os teores de PiHCl foram baixos.

Por outro lado, no tratamento com Fosfato Natural de Araxá observou-se o maior valor (**Tabela 1**). Segundo Cross & Schlessinger (1995), o extrator HCl extrai, preferencialmente, formas de P ligadas ao Ca. Esta fração, composta pelo Pi contido nos fosfatos de cálcio e fortemente adsorvido, é considerada pouco lábil (Tiessen et al., 1984). Sendo assim, chama-se a atenção por meio dos resultados obtidos na **Tabela 1**, de que entre os materiais estudados no presente ensaio, o Fosfato Natural de Araxá foi a fonte que, ao reagir no solo, mais adsorveu P em frações pouco lábeis do solo.

Cabe salientar, também, que o extrator HCl ao extrair formas de P ligadas, preferencialmente, ao Ca após a aplicação de fosfatos naturais cálcicos, tipo apatitas, o H⁺ ativo do extrator solubilizaria uma porção apreciável de fósforo, que, no entanto, não teria reagido previamente com o solo. Consequentemente, o fósforo estaria superestimado.

Ainda, na **Tabela 1**, não houve diferença para a forma de P ligado a Ca (P-HCl) entre os tratamentos com e sem a aplicação de torta de filtro.

Tabela 2 - Teores de fósforo extraídos por NaHCO_3 0,5 mol L^{-1} , NaOH 0,1 mol L^{-1} e NaOH 0,5 mol L^{-1} , $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2 + \text{MgCl}_2$ e total calculado em um Argissolo Vermelho Amarelo submetido a diferentes fontes de fósforo na presença e ausência de torta de filtro.

Tratamentos	Fração de P				
	Po-bic	Po-hid ¹	Po-hid ²	P residual	P total calculado
	mg dm^{-3}				
Fontes de fósforo (P)					
Sem P	2,5	35,3 ab	14,3 b	186,4 a	344,4 b
FN	3,1	40,4 a	32,0 a	223,5 a	551,9 a
FNR	2,1	30,6 b	8,6 b	222,9 a	408,0 b
ST	5,8	31,0 b	24,7 a	206,2 a	400,2 b
DMS	4,30	9,14	9,19	38,47	69,01
Torta de filtro (T)					
Sem	1,9 b	40,9 a	22,9 a	204,3	403,0 b
Com	4,8 a	27,8 b	16,9 b	215,2	449,3 a
DMS	2,24	4,76	4,79	20,05	35,97
Teste de F					
P	2,51 ^{ns}	4,19*	21,90**	3,50*	27,77**
T	7,73*	35,17**	7,26*	1,33 ^{ns}	7,59*
P x T	0,27 ^{ns}	1,43 ^{ns}	1,50 ^{ns}	2,77 ^{ns}	0,98 ^{ns}
CV (%)	76,29	15,85	27,47	10,93	9,65

^{1, 2}- NaOH (0,1 e 0,5 mol L^{-1}). Médias seguidas de letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$). **, * e ns: significativo a 1% e 5% de probabilidade e não significativo. CV: coeficiente de variação. FN: Fosfato natural de Araxá; FNR: fosfato natural reativo Bayóvar. ST: superfosfato triplo. Pi: fósforo inorgânico

Os maiores teores de P foram verificados na fração residual (P-residual), que engloba formas inorgânicas e orgânicas mais recalcitrantes (**Tabela 2**). Em termos médios, a fração residual correspondeu à cerca de metade do P total recuperado. Isso foi observado tanto entre as fontes estudadas e a testemunha como, também, nos tratamentos com e sem torta de filtro. Assim, é possível considerar que a maior parte do fósforo do



solo estudado encontra-se em uma fração que, provavelmente, não está disponível para as plantas.

Numa análise conjunta dos resultados deste estudo, pode-se destacar que as fontes não diferiram no P lábil do solo, mostrando a grande capacidade do solo em adsorver o P em formas não lábeis. Entretanto, no P moderadamente lábil (Pi-hid0,1), o supertríplo (fonte mais solúvel) incrementou a fração de P relacionada ao P adsorvido aos óxidos de Fe e Al, enquanto que os fosfatos naturais proporcionaram que parte do P permanecesse ligado a Ca (identificados pelo P-HCl, em sequência). Em solos tropicais, o P-Ca pode ser vantajoso, pois o pH destes solos é ácido, proporcionando solubilização de apatitas ao longo do tempo. O uso de torta de filtro associada a adubações fosfatadas parece ser uma importante ferramenta para aumentar a disponibilidade de P em formais lábeis.

CONCLUSÕES

As fontes de P afetaram, de maneira variável, as frações do nutriente no solo.

O uso da torta de filtro proporcionou aumento de frações lábeis de Pi e Po no solo e, conseqüentemente, redução do P em formas de menor labilidade.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro que possibilitou o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

AGRIANUA 2015. Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio. 472p

Caione, Gustavo. Nutrição e produção da cana planta em Argissolo e Latossolo fertilizado com fontes de fósforo e torta de filtro. 2013. 65f. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal.

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

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; FLORES, J.P.C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. *Revista*

Brasileira de Ciência do Solo, v.31, 4:691-699, 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 American Journal*, v.46, 5:970-976, 1982.

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

RAIJ, B.van; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B.Van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. p.233-239. (Boletim técnico, 100).

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. (Ed.). Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p.

SANTOS, J. Z. L.; NETO, A. E. F.; RESENDE, A. V. de; CURI, N.; CARNEIRO, L. F.; COSTA, S. E. V. G de A. Frações de fósforo em solo adubado com fosfatos em diferentes modos de aplicação e cultivo com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:705-714, 2008.

TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B. & COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformation in soils of differing pedogenesis. *Soil Science*, 48:853-858, 1984.

VAIS, 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, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.471-537.

NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solos e planta em condições tropicais. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

IYAMUREMYE, F.; DICK, R.P. Organic amendments and phosphorus sorption by soils. *Advances in Agronomy*, v.56, p.139-185, 1996.

ERICH, M.S.; FITZGERALD, C.B. & PORTER, G.A. The effect of organic amendments on phosphorus chemistry in a potato cropping system. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 88:79-88, 2002.

GUPPY, C.N.; MENZIES, N.W.; MOODY, P.W. & BLAMEY, F.P.C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. *Austr. J. Soil Res.*, 43:189-202, 2005.