

FORMAS PREFERENCIAIS DE ACUMULAÇÃO DE FÓSFORO EM SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO NORDESTE⁽¹⁾

M. S. B. ARAÚJO⁽²⁾ & I. H. SALCEDO⁽³⁾

RESUMO

Neste trabalho, foram quantificadas as principais formas de acumulação do P proveniente do fertilizante, em solos com diferentes propriedades físicas e químicas, cultivados com cana-de-açúcar em Pernambuco. Solos de 11 cultivos comerciais foram amostrados, logo após a colheita da cana-planta (jan. 1994), a qual tinha sido fertilizada no sulco de plantio 18 meses antes. Para obter amostras com P derivado daquela fertilização, cavou-se uma trincheira perpendicular à linha de cana e retiraram-se 28 amostras de solo da região do sulco, usando como guia uma grade metálica de 70 cm de largura por 40 cm de altura e com malha de 10 x 10 cm. A grade foi fixada, a partir da profundidade de 10 cm, e centrada nos resíduos ainda remanescentes dos rebolos do plantio da cana. Todas as amostras foram extraídas com NaOH 0,1 mol L⁻¹. Nos 11 solos, os maiores teores de P corresponderam às amostras da camada de 10-20 cm, da qual foram, então, escolhidas as amostras que apresentaram o menor e o maior valor de P extraível com NaOH 0,1 mol L⁻¹, de cada solo. O fósforo, nessas duas amostras, foi extraído, seqüencialmente, com resina (P-res), NaHCO₃ (P-bic, inorgânico e orgânico), NaOH (P-hid, inorgânico e orgânico) e H₂SO₄ (P-ac), seguido por uma digestão com H₂SO₄ / H₂O₂ (P-rdu). A maior parte das diferenças entre as amostras com alto e baixo conteúdo de P (ΔP), atribuídas à fertilização feita dezoito meses antes, foi encontrada nas frações inorgânicas (P-res, Pi-bic, Pi-hid e P-ac). Nos cinco solos que continham granulometria mais fina e alto teor de Fe e Al extraível com ditionito, mais de 50% de ΔP foi encontrado como Pi-hid. Nos demais, o P ficou semelhantemente distribuído entre P-res + Pi-bic e Pi-hid ou, no caso dos solos mais arenosos, concentrou-se nas formas extraíveis por resina e bicarbonato. A presença de quantidade elevada de P em formas lábeis, P-res e Pi-bic, mesmo após 18 meses de contato solo-fertilizante, indica a possibilidade de obtenção de efeito residual do fertilizante em alguns desses solos.

Termos de indexação: fracionamento de P, fertilização fosfatada, disponibilidade de P.

⁽¹⁾ Parte de Projeto financiado pela International Foundation for Science - IFS-Suécia. Recebido para publicação em dezembro de 1996 e aprovado em outubro de 1997.

⁽²⁾ Pesquisadora Assistente, Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Luiz Freire, 1000. CEP 50740-540 Recife (PE). E-mail: socorro@solos.ufv.br.

⁽³⁾ Professor Titular, Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco. E-mail: salcedo@npd.ufpe.br.

SUMMARY: PREFERENTIAL FORMS OF PHOSPHORUS ACCUMULATION IN SOILS CULTIVATED WITH SUGAR-CANE IN NORTHEASTERN BRAZIL

The objective of this work was to quantify the main forms of P derived from fertilizer in soils of varying physical and chemical properties, cultivated with sugar-cane, in Pernambuco. Soils from 11 commercial plantations were sampled following the harvest of the plant-cane (Jan. 1994), that had been fertilized in the furrow 18 months before. To find samples with fertilizer-derived P, a pit was opened perpendicular to the plant line and 28 soil samples were taken with the aid of a metal grid measuring 70 cm long by 40 cm high, with 10x10 cm cells. The grid was fixed 10 cm below the soil surface and centered on the residues of the seedpieces. Phosphorus in all these samples was extracted with 0.1 mol L⁻¹ NaOH. In all cases the largest P concentrations were found in the 10-20 cm layer. Two samples were then selected from this layer for additional work, those with the highest and lowest NaOH extractable-P content, for each soil. Phosphorus in these selected samples was sequentially extracted with resin (P-res), NaHCO₃ (inorganic and organic P-bic), NaOH (inorganic and organic P-OH), H₂SO₄ (P-ac), and followed by a final digestion with H₂SO₄ and H₂O₂ (P-rdu). Most of the difference between samples with high and low P contents (ΔP), attributed to the fertilization 18 months before, was found in inorganic (P-res, Pi-bic, Pi-OH and P-ac) forms. In five of the soils, fine textured and with high dithionite-extractable Fe and Al, more than 50% of ΔP was found as Pi-OH. In the other six soils, P was similarly distributed among P-res, P-bic and P-OH or even favored the resin and bicarbonate-extractable forms (more sandy soils). The presence of large amounts of labile P-res and P-bic forms, even after 18 months of soil-fertilizer contact, suggests the possibility of obtaining residual fertilizer effects in some of these soils.

Index terms: P fractionation, phosphate fertilization, P availability.

INTRODUÇÃO

Áreas de plantio comercial com cana-de-açúcar, localizadas na faixa úmida costeira de Pernambuco, são responsáveis pela maior parte da demanda de fertilizantes fosfatados no Estado. Tem sido estimado que, aproximadamente, 20% do P adicionado como fertilizante é absorvido pelas plantas durante o primeiro período de cultivo (Manhães, 1977). O fósforo do fertilizante remanescente no solo é, lentamente, transformado para formas menos disponíveis, por meio de reações com a superfície das partículas do solo, pela cristalização de compostos insolúveis ou pela difusão para o interior de óxidos (Engelstad & Terman, 1980; Sample et al., 1980; Barrow, 1985; Raij, 1991).

Na ausência de adições anuais de fertilizantes fosfatados, a produtividade dependerá da quantidade e disponibilidade desse P residual acumulado no solo (Barrow, 1980).

As informações sobre as transformações do P acumulado e do seu efeito residual em solos da região são ainda limitadas (Araújo et al., 1993a, b; Pereira, 1994). As análises de rotina de terra determinam, normalmente, uma parcela do P inorgânico total, mais ou menos correlacionada com o P disponível. Permanecem sem quantificação a totalidade do P orgânico e parcela considerável do P inorgânico. Entretanto, em solos altamente intemperizados e com baixos teores de P total, parte desse P remanescente pode também contribuir com a nutrição fosfatada das plantas (Tiessen et al., 1984; Araújo et al., 1993b; Pereira, 1994), e parte sofrer transformações, que podem

ser monitoradas por meio de um método de extração seqüencial de P. Essa extração propõe quantificar frações que diferem na sua biodisponibilidade (Hedley et al., 1982; Tiessen et al., 1984; Ball-Coelho et al., 1993; Araújo et al., 1993 a, b), mais do que tentar separar o P em frações quimicamente semelhantes. Tal método, por separar formas orgânicas e inorgânicas de P, pode também ser usado para acompanhar modificações nas formas de P causadas por processos biológicos no solo.

A extração seqüencial quantifica as frações mais lábeis, mediante extração com resina trocadora de ânions (Sibbesen, 1977), considerada a mais disponível (Hedley et al., 1982), seguida por uma extração com NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ do fósforo orgânico (Po-bic) e inorgânico (Pi-bic), este último correspondendo ao P lábil sorvido na superfície do solo (Bowman & Cole, 1978; Hedley et al., 1982). A extração seguinte com NaOH 0,1 mol L⁻¹ identifica um reservatório de P inorgânico (Pi-hid) e orgânico (Po-hid), considerado menos disponível, por ser, particularmente Pi-hid, fortemente adsorvido pelos compostos de Fe e Al (Ryden et al., 1977; Mc Laughlin et al., 1981; Hedley et al., 1982). A última extração é com H₂SO₄ 1 mol L⁻¹ (P-ac), definindo um reservatório de P relacionado com minerais, como apatita (Williams et al., 1967), ou com fósforo ocluído em solos mais intemperizados (Williams et al., 1980). O resíduo dessas quatro extrações é digerido com mistura de H₂SO₄/H₂O₂ (P-rdu), determinando-se, então, as formas mais estáveis de Po e as mais insolúveis de Pi (Hedley et al., 1982).

No presente trabalho, objetivou-se utilizar essa extração seqüencial para quantificar as formas

preferenciais de acumulação de P proveniente de fertilizante adicionado, sob condições de campo, 18 meses antes da amostragem, em relação a amostras sem fertilizante. Analisando solos de propriedades físicas e químicas diferentes, tentou-se identificar as relações entre esses atributos e os padrões de acumulação de P observados.

MATERIAL E MÉTODOS

Solos de 11 cultivos comerciais de cana-de-açúcar na região costeira de Pernambuco foram amostrados logo após a colheita da cana-planta: três foram classificados como gley pouco húmico (HGP1 a HGP3), cinco como podzólico vermelho-amarelo (PV1 a PV5), um como latossolo amarelo (LA), um como orgânico (HO) e um como areia quartzosa (AQ).

Segundo informações recolhidas em cada área, a cana tinha sido fertilizada no sulco, por ocasião do plantio, 18 meses antes. Com a finalidade de obter amostras com altos teores de P remanescente dessa fertilização, foi aberta uma trincheira na linha de cana e, em uma das paredes perpendiculares à linha, colocada uma grade de metal de 70 cm de largura e 40 cm de altura (malha de 10 x 10 cm). A grade foi posicionada a partir de uma profundidade de 10 cm e centrada nos restos dos rebolos do plantio da cana. As amostras de terra foram retiradas, inserindo-se um tubo de aço inox ($\varnothing = 7,5$ cm) através de cada uma das malhas da grade (total de 28 amostras), amostrando-se uma espessura de 15 cm de solo.

Paralelamente, foram coletadas amostras indeformadas de cada profundidade (10-20, 20-30, 30-40 e 40-50 cm) para determinação da densidade de solo.

As amostras coletadas através da grade foram secas ao ar, destorroadas, passadas através de peneira de 2 mm, e o fósforo extraído com NaOH 0,1 mol L⁻¹, durante 16 h. Uma alíquota do extrato foi acidificada com 1 ml de H₂SO₄ concentrado, adicionado 0,5 g de K₂S₂O₈, autoclavada durante 1 h a 127°C, e nela determinado o fósforo total (inorgânico mais orgânico) colorimetricamente (Murphy & Riley, 1962). O fósforo extraído com NaOH nesta análise exploratória foi denominado P-extrOH e não deve ser confundido com a fração P-hid, também extraída com NaOH, mas como parte de uma extração seqüencial (ver mais adiante). Os maiores teores de P-extrOH, em todos os solos, foram encontrados na camada de 10-20 cm. Para o restante do trabalho, foram escolhidas apenas duas amostras dessa camada: as que apresentaram o maior e o menor valor de P-extrOH de cada solo, considerando que a amostra com elevada concentração de P representaria parte do volume de solo fertilizado, 18 meses antes, por ocasião do plantio da cana-de-açúcar, enquanto a amostra com baixo teor representaria um volume de solo que não recebeu P durante a última fertilização (ou recebeu muito pouco), uma vez que sua posição estava deslocada lateralmente em relação ao sulco. Ao retirar as duas amostras da mesma profundidade, tentou-se assegurar que as propriedades físicas e

químicas das amostras fossem as mais semelhantes possíveis.

Com base nessas hipóteses, no restante do trabalho, as amostras com baixo teor de P-extrOH foram denominadas não fertilizadas, enquanto as que apresentaram alto teor foram denominadas fertilizadas. A informação recolhida na maioria das áreas, quanto à dose de fertilizante utilizada, não foi apresentada, uma vez que não seria possível relacionar a dose com a quantidade de P em uma única amostra da grade.

As amostras de terra escolhidas foram analisadas, em duplicata, quanto à: textura (Day, 1965); pH em água (solo-solução = 1:2,5); carbono total (Snyder & Trofymow, 1984); bases extraíveis com NH₄Cl 1 mol L⁻¹, determinando-se Na, por emissão de chama, e Ca, Mg e K, por espectrometria de absorção atômica; Fe e Al extraíveis por ditionito-citrato-bicarbonato (DCB) (Mehra & Jackson, 1960) e por oxalato de amônio (Schwertmann, 1964), determinando-se Fe e Al, por espectrometria de absorção atômica. O fósforo total, nessas amostras em duplicata, foi extraído, seqüencialmente, segundo o método proposto por Hedley et al. (1982), e depois modificado por Tiessen et al. (1984) e Araújo et al. (1993a). Subamostras de 0,5 g de solo (passadas em peneira de malha de 0,297 mm) foram extraídas com resina Dowex 1-X8 (P-res), NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ (P-bic), NaOH 0,1 mol L⁻¹ (P-hid), H₂SO₄ 1 mol L⁻¹ (P-ac), e o resíduo digerido com H₂SO₄ concentrado e H₂O₂ (P-rdu) (Araújo et al., 1993a). Os extratos do bicarbonato e do hidróxido foram analisados duas vezes: para P total, digerindo-se uma alíquota, em autoclave, com 1 ml de H₂SO₄ 6 mol L⁻¹ e 0,5 g de K₂S₂O₈, durante 1 h a 127°C, e para P inorgânico (Pi), acidificando-se outra alíquota até pH 1 com H₂SO₄ 6 mol L⁻¹ e centrifugando-se para separação do precipitado. O fósforo orgânico (Po) foi, então, calculado por diferença entre o P total e o Pi determinados nesse extrato. Em todos os casos, o P foi determinado, colorimetricamente, usando-se o método de Murphy & Riley (1962).

RESULTADO E DISCUSSÃO

As amostras representaram as classes de solos mais freqüentes na região úmida de PE, associadas a quatro situações de topografia predominantes. Quanto às características físicas, os três solos gley (HGP1 a HGP3) de várzea tiveram conteúdos de argila semelhantes (Quadro 1). O solo orgânico (HO), embora também de várzea, apresentou teor de argila bastante menor. Os podzólicos (PV1 a PV5), normalmente encontrados em posições de meia-encosta, apresentaram gradiente de conteúdo de argila (Quadro 1). Os altos valores de densidade aparente no PV3 a PV5 indicaram problemas de compactação na camada sub-superficial (10-20 cm). Normalmente, nessa região, solos de encosta mostram sinais de erosão, resultantes, entre outros fatores, dessa compactação. Os latossolos (LA) aparecem, tipicamente, em posições de topo da encosta, enquanto as areias quartzosas (AQ) são mais freqüentes

Quadro 1. Granulometria e densidade do solo na profundidade de 10-20 cm das amostras dos 11 solos estudados

Variáveis	Solos ⁽¹⁾										
	HGP1	HGP2	HGP3	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5	LA	HO	AQ
Argila, g kg ⁻¹	684	676	582	614	534	434	266	194	410	414	81
Silte, g kg ⁻¹	140	193	120	134	58	54	68	110	119	180	21
Areia, g kg ⁻¹	176	132	298	252	408	512	667	696	471	406	898
D. Ap., g cm ⁻³	1,38	1,13	1,52	1,39	1,47	1,64	1,67	1,70	1,41	1,03	1,61

⁽¹⁾ HGP: gley pouco húmico; PV: podzólico vermelho-amarelo; LA: latossolo amarelo; HO: solo orgânico. AQ: areia quartzosa; D. ap.: densidade do solo.

nos tabuleiros costeiros, embora também possam aparecer como manchas em solos de baixada.

O maior conteúdo de C orgânico foi encontrado no solo orgânico (HO), 82,1 g kg⁻¹, seguido de dois solos gley, HGP2 e HGP3, mas com teores cinco vezes menores (Quadro 2). Os demais solos tiveram valores ainda menores, oscilando entre 10,6 g kg⁻¹, no LA, até 0,9 g kg⁻¹, na areia quartzosa (AQ). Apesar da semelhança nas propriedades físicas entre os solos gley (Quadro 1), o solo HGP1 contrastou com o HGP2 e HGP3 pelos seus baixos valores de C orgânico, bases trocáveis, soma dos teores de Fe e Al e P-extrOH (Quadro 2). Todas as amostras revelaram pH na faixa ácida, em concordância com os baixos conteúdos de bases trocáveis, típicos de solos altamente intemperizados e lixiviados. Somente no PV5, notou-se o efeito da calagem, coincidindo o maior valor de pH com teores de Ca e Mg trocáveis também elevados, em relação aos demais PV e ao LA. Em sete dos solos, o pH da amostra com fertilizante foi mais ácido que o da sem fertilizante (Quadro 2). Isto, provavelmente, decorreu do efeito acidificante dos fertilizantes comerciais, que são, comumente, usados na região, tais como o superfosfato triplo e o fosfato monoamônico (Sample et al., 1980).

Em geral, as concentrações de Fe e Al extraídas por oxalato foram semelhantes, enquanto para o DCB, os teores de Fe foram mais abundantes que os de Al (Quadro 2). Isso era esperado, uma vez que o ditionito tem ação redutora sobre o Fe³⁺, aumentando sua solubilidade, mas sem afetar o Al (Borggaard, 1990). Os teores de Fe e Al desses solos foram comparáveis aos publicados por Singh et al. (1983) para classes de solos semelhantes da Amazônia.

O valores de P-extrOH foram muito variáveis, tanto entre solos quanto entre as amostras, com e sem P do fertilizante, de um mesmo solo (Quadro 2). Para a maioria dos solos, as amostras selecionadas de maior valor foram encontradas na posição central da grade, coincidente com a linha do sulco. Contrariamente, as menores concentrações foram encontradas nas amostras localizadas em ambos os extremos da grade. Em três dos solos, porém, não houve nenhum padrão de distribuição das amostras com altos e baixos valores de P ao longo da grade. Como o plantio e a fertilização

em áreas de relevo ondulado são feitas, normalmente, de forma manual, essa distribuição irregular do P adicionado no sulco não é incomum (Pereira, 1994).

Fracionamento de P nas amostras sem fertilizante

O fracionamento de P nas amostras sem fertilizante indicou que o P residual (P-rdu) é uma fração bastante significativa do P total nesses solos (Figura 1a). Em sete deles, o P-rdu foi similar ou superior à soma do P inorgânico (ΣPi) e orgânico (ΣPo) extraídos no fracionamento seqüencial (Figura 1a). Quando a digestão não é precedida por uma extração com ácido a quente, P-rdu é constituído por formas inorgânicas e orgânicas de P (Tiessen & Moir, 1993) relativamente estáveis e de disponibilidade muito baixa às plantas (Tiessen et al., 1984). No presente trabalho, P-rdu não foi analisado quanto à sua partição nessas formas. Por esse motivo, tanto ΣPi quanto ΣPo subestimam as quantidades totais de Pi e Po no solo. Por outro lado, ΣPi e ΣPo englobam as frações de maior interesse em relação às transformações de P do solo.

Verificou-se que, dentre as frações inorgânicas extraíveis das amostras não fertilizadas, Pi-hid foi a predominante, sendo superior à soma das frações P-res e Pi-bic, consideradas como o P lábil, na maioria dos solos (Figura 1b), as quais, juntas, não excederam 20 mg kg⁻¹ de P em sete dos solos analisados. A fração extraível por ácido representou uma proporção relativamente constante (14-17%) do ΣPi nas amostras não fertilizadas, a despeito da grande variabilidade do ΣPi entre os solos.

O Po-hid foi a fração predominante do P orgânico extraível (Figura 1c). Em solos de clima temperado, as modificações nela causadas pelo manejo do solo foram intermediárias entre o Po-bic e o P orgânico na fração residual (Hedley et al., 1982; Tiessen et al., 1984). Os poucos resultados disponíveis para solos de regiões tropicais indicam que Po-hid é mais efetivo do que Po-bic em mostrar a dinâmica do P orgânico (Tiessen et al., 1992; Araújo et al., 1993a; Ball-Coelho et al., 1993). Os teores de Po-hid, determinados por esses autores, foram maiores que os de Po-bic, como no presente trabalho (Figura 1c), e oscilaram, significativamente, em função do manejo do solo, enquanto os de Po-bic permaneceram relativamente constantes.

Quadro 2. Caracterização química das amostras da camada de 10-20 cm, que continham ou não P do fertilizante com base nos teores de P-extrOH⁽¹⁾

Solo	Fert.	C org.	pH H ₂ O	Ca	Mg	K	Na	Soma	Fe-ox	Fe-dit	Al-ox	Al-dit	P-extrOH
		g kg ⁻¹			mmol _c kg ⁻¹				g kg ⁻¹			mg kg ⁻¹	
HGP1	Não	4,6	4,2	6,5	3,6	0,7	1,0	11,8	1,05	1,65	1,20	1,5	72
	Sim	2,1	3,8	9,5	4,6	2,1	0,9	17,1	1,77	2,10	1,56	0,9	392
HGP2	Não	17,3	4,1	47,1	41,2	1,6	10,5	100,4	4,62	5,21	5,04	2,8	401
	Sim	17,7	3,8	56,7	42,7	3,6	10,5	113,5	4,06	7,03	3,36	2,8	653
HGP3	Não	11,7	4,1	70,9	18,4	4,7	2,0	96,0	1,96	3,52	3,36	2,0	490
	Sim	11,6	4,1	53,3	17,7	3,1	1,4	75,5	1,48	4,04	3,72	2,5	737
PV1	Não	9,4	4,1	12,9	5,4	0,6	0,3	19,2	1,24	19,0	1,08	3,1	102
	Sim	7,0	3,8	10,2	8,6	1,0	0,5	20,3	3,37	15,0	1,80	2,8	199
PV2	Não	7,6	4,5	7,0	2,2	0,4	0,4	10,0	1,29	14,0	1,80	3,5	84
	Sim	6,2	3,9	3,7	1,8	0,5	0,5	6,5	1,45	12,0	1,23	3,1	231
PV3	Não	7,5	5,1	16,6	8,7	0,2	0,3	25,8	1,13	11,0	1,08	2,1	68
	Sim	3,9	4,7	26,3	14,3	0,5	0,3	41,4	2,62	9,00	1,20	1,8	326
PV4	Não	3,7	4,0	15,8	8,3	0,7	0,3	25,1	1,51	4,44	0,96	1,5	134
	Sim	4,4	3,6	10,3	3,4	1,0	0,6	15,3	1,16	3,41	0,96	1,5	268
PV5	Não	4,0	6,3	31,4	12,2	0,3	0,4	44,3	1,00	5,20	0,96	1,0	228
	Sim	5,7	5,9	37,6	14,8	0,5	0,4	53,3	1,40	6,21	1,21	1,5	405
LA	Não	10,6	4,1	15,4	5,4	0,8	0,5	22,1	1,90	8,00	2,40	3,5	118
	Sim	10,3	4,0	17,0	8,6	5,2	0,7	31,5	1,77	8,04	2,40	3,8	200
HO	Não	73,1	3,9	31,6	38,5	1,8	10,9	82,8	11,4	12,0	2,16	2,5	392
	Sim	82,1	3,9	63,3	57,0	3,3	12,7	136,3	10,5	12,0	3,04	3,1	742
AQ	Não	3,4	4,3	1,3	0,3	0,2	0,3	2,1	0,12	0,20	0,82	0,8	59
	Sim	0,9	4,8	11,4	0,9	0,2	0,4	12,9	0,10	0,17	0,84	0,7	120

⁽¹⁾ P-extrOH: extração preliminar com NaOH 0,1 mol L⁻¹; org: orgânico; ox: extraído com oxalato de amônio; dit: extraído com ditionito-citrato-bicarbonato.

Fracionamento de P nas amostras com fertilizante

Os aumentos líquidos no conteúdo de P total (ΔPt), nas amostras fertilizadas, variaram entre 28 e 442 mg kg⁻¹ de P e ficaram restritos, quase que exclusivamente, às frações inorgânicas, ΔPi (Quadro 3). Perdas ou ganhos de Po foram também observados, mas, com poucas exceções, permaneceram em torno de 10% ou menos dos valores de ΔPt . Uma dessas exceções foi o aumento de 75 mg kg⁻¹ de P no solo no HGP3 (imobilização), bem como a redução de 17 mg kg⁻¹ de Po na amostra do solo AQ (mineralização). Em um oxissolo profundo do semi-árido, na região da Chapada do Araripe, tanto a imobilização quanto a mineralização de P estiveram associadas a modificações correspondentes no teor de C do solo (Tiessen et al., 1992), caso do solo AQ, já que, ao decréscimo de Po na amostra fertilizada, em relação à não fertilizada, correspondeu um decréscimo do C orgânico total (Quadro 2). Entretanto, no caso do HGP3, não foi observada essa correspondência entre as modificações de Po e C. Para a maioria dos solos, 18 meses foram insuficientes para produzir mudanças consistentes nas quantidades de P orgânico.

As modificações em P-rdu, na maioria dos solos, também foram da ordem de 10% de ΔPt ou menores (Quadro 3). A ausência de maiores modificações nessa fração após a fertilização e o cultivo foi observada também por Ball-Coelho et al. (1993) e por Araújo et

al. (1993a). Nesse último trabalho, os acréscimos em P-rdu foram particularmente baixos, considerando-se que, após 25 anos de cultivo e fertilização contínua com P, o teor total desse nutriente tinha triplicado na camada de 0-15 cm. Os resultados do presente trabalho sugerem que a transformação de P para formas não extraíveis com esse método é pouco acentuada ou muito lenta.

Foi mencionado que as diferenças de ΔPt entre os solos foram consideráveis (28 e 442 mg kg⁻¹ de P) (Quadro 3). Isso pode ser atribuído às doses diferentes de fertilizantes aplicados e, principalmente, à desuniformidade na sua aplicação no sulco (além da variabilidade espacial do P existente antes do plantio). Para avaliar o efeito das propriedades dos solos nos padrões de acumulação do P do fertilizante, foi necessário expressar as quantidades de P recuperadas de forma relativa. Como a principal forma de acumulação de P foi a inorgânica (ΔPi), as variações líquidas de cada uma das frações de Pi (P-res, Pi-bic, Pi-hid e P-ác) foram expressas como percentagem do ΔPi para cada solo (Quadro 3).

O enriquecimento relativo dessas frações variou muito entre solos. Parte dessa variação poderia decorrer das "doses" (ΔPt 's) bastante diferentes de P recuperadas, que poderiam afetar a reação com o solo e o destino preferencial para um ou outro reservatório.

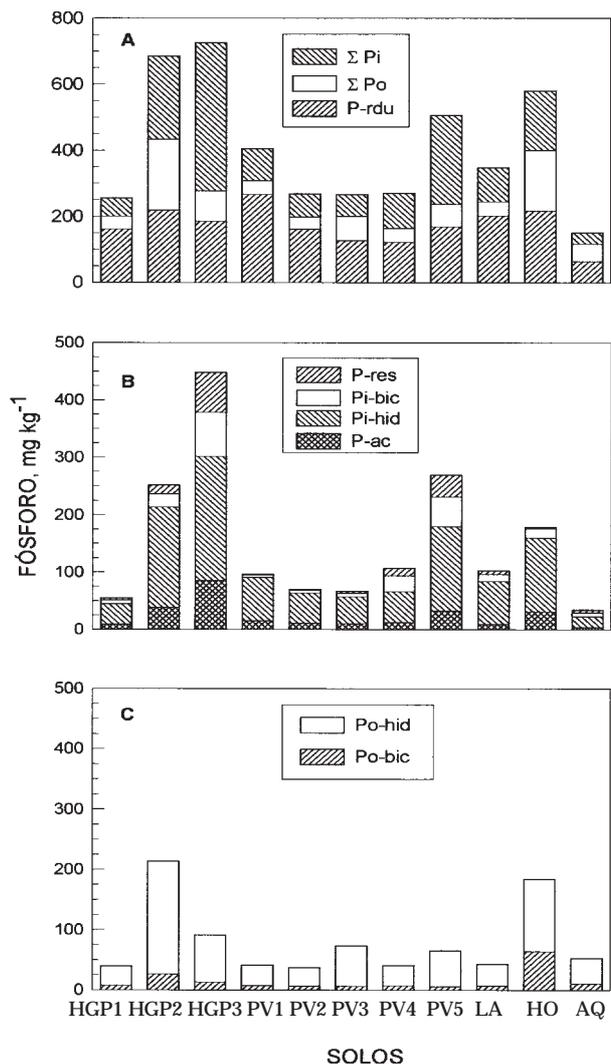


Figura 1. Fósforo extraído de amostras não fertilizadas de 11 solos cultivados com cana-de-açúcar: A) Fósforo residual (Prdu) e somatório das frações inorgânicas ($\Sigma Pi = P-res + Pi-bic + Pi-hid + P-ac$) e orgânicas ($\Sigma Po = Po-bic + Po-hid$); B) Frações inorgânicas (P-res, Pi-bic, Pi-hid e P-ac); e, C) Frações orgânicas (Po-bic e Po-hid).

Entretanto, os resultados das amostras dos solos PV indicam não ser esse o caso: apesar das diferenças marcantes em ΔPt entre as amostras (Quadro 3), houve uma relação estreita entre os teores decrescentes de Pi-hid e de argila (Quadro 1). Isso indica que as propriedades dos solos, e não a intensidade dos acréscimos em P, foram determinantes na distribuição do P entre as frações. O efeito da textura ficou restrito aos solos PV, uma vez que, quando considerados todos os solos (exceto o orgânico), os conteúdos de argila e silte não mais se correlacionaram ($p < 0,010$) com as proporções de Pi recuperado nas frações, sendo, por esse motivo, excluídos da matriz de correlação (Quadro 4). O solo orgânico (HO) não foi incluído na análise, considerando seus valores elevados de carbono orgânico e Fe-oxalato

Quadro 3. Distribuição dos aumentos líquidos de fósforo entre amostras com alto e baixo conteúdo de P, no fósforo total e nas frações inorgânica, orgânica e residual. Proporção do aumento em P inorgânico que correspondeu a P extraído com resina, bicarbonato, hidróxido e ácido

Solos	Aumentos em fósforo				ΔPi			
	$\Delta Pt^{(1)}$	ΔPi	ΔPo	$\Delta Prdu$	P-res	Pi-bic	Pi-hid	P-ac
	mg kg ⁻¹				%			
HGP1	442	404	-6	45	23	37	33	7
HGP2	192	177	10	4	22	30	40	7
HGP3	228	155	75	-2	3	20	54	23
PV1	92	97	12	-17	1	11	81	7
PV2	151	115	12	25	4	13	74	9
PV3	311	287	-5	30	12	16	55	17
PV4	108	117	-2	-7	22	46	27	5
PV5	330	345	-25	10	35	29	22	14
LA	79	76	4	-1	10	22	61	6
HO	371	366	-4	9	12	32	49	8
AQ	28	54	-17	-9	40	47	12	0

(1) t: total; i: inorgânico; o: orgânico; rdu: residual; res: resina; bic: bicarbonato de sódio; hid: hidróxido de sódio; ac: ácido sulfúrico.

Quadro 4. Coeficientes de correlação simples (n = 10, p < 0,010) entre as variáveis selecionadas em dez dos solos estudados⁽¹⁾

	P-res ⁽²⁾	Pi-bic	Pi-hid	Fe-ox	Fe-dit	Al-ox	Al-dit	C-org.
P-res	1	0,809	-0,936	ns ⁽³⁾	ns	ns	-0,781	ns
Pi-bic		1	-0,903	ns	-0,821	ns	ns	ns
P-lábil ⁽⁴⁾			-0,967	ns	-0,800	ns	-0,792	ns
Pi-hid			1	ns	0,865	ns	0,880	ns
Fe-ox				1	ns	0,920	ns	0,878
Fe-dit					1	ns	ns	ns
Al-ox						1	ns	0,918
Al-dit							1	ns
C-org.								1

(1) O solo orgânico (HO) foi excluído da análise de correlação. (2) res: resina; bic: bicarbonato de sódio; hid: hidróxido de sódio; ox: oxalato de amônio; dit: ditionito-citrato-bicarbonato; org: orgânico. (3) ns: não significativo ao nível de $p < 0,010$. (4) P-lábil: P-res + Pi-bic.

(Quadro 2), que influenciaram muito os coeficientes de correlação.

A proporção de P do fertilizante distribuído entre P-res e Pi-bic tendeu a favorecer o bicarbonato na maioria dos solos, sobretudo naqueles em que a proporção de P-res foi 10% ou menor. Ao mesmo tempo, ambas as frações correlacionaram-se positivamente (Quadro 4). Dessa forma, a condição de P disponível às plantas (P lábil), atribuída, normalmente, a P-res (Sibbesen, 1977), poder-se-ia estender também, em algum grau, ao Pi-bic. Tais evidências foram apresentadas por Araújo et al. (1993b) em ensaio com plantas.

No quadro 4, observa-se, também, que ambas as frações foram significativas e inversamente relacionadas com o Pi-hid. Quando P-res e Pi-bic foram combinadas em um único reservatório, denominado de P-lábil, as correlações negativas com o Pi-hid ficaram ainda maiores (Quadro 4). A variável responsável pela partição de P do fertilizante entre o P-lábil e o P-hid foi a concentração de Fe e Al extraídos por ditionito, que se correlacionou positivamente com o Pi-hid e negativamente com P-lábil. As amostras com baixos conteúdos de Fe-dit e Al-dit tenderam a manter o fertilizante fosfatado como P extraível por resina e bicarbonato, ainda dezoito meses após a fertilização. Nas amostras com maiores conteúdos de Fe-dit e Al-dit, a dinâmica do P favoreceu as formas extraíveis por hidróxido no mesmo período de tempo. Essa última tendência é desvantajosa, do ponto de vista da eficiência de uso do fertilizante, uma vez que o Pi-hid mostrou-se relativamente menos disponível do que P-res ou Pi-bic, quando se comparou o decréscimo em cada fração causado pela absorção pelas plantas (Araújo et al., 1993b).

Em três dos solos analisados (HGP3, PV3 e PV5), percebeu-se que parte significativa do P do fertilizante pôde ser recuperada na fração P-ac (Quadro 3). Esse fato também foi observado por Pereira (1994), resultante, provavelmente, do uso de fertilizantes parcialmente acidulados ou fosfatos naturais (fosfato de Olinda), apesar da ausência de informações precisas a esse respeito nessas áreas. De toda forma, o acréscimo nessa fração não se correlacionou, significativamente, com quaisquer das outras variáveis e foi excluída do quadro 4. Essa ausência de correlação, provavelmente, indica que, a fração P-ac não desempenha papel muito importante na dinâmica de P desses solos (Salcedo, 1993).

O carbono orgânico não se correlacionou com os acréscimos relativos das frações de P inorgânico (Quadro 4). A correlação significativa com as quantidades de Po-bic e Po-hid, nas amostras não fertilizadas, foi fortemente influenciada pelos solos HO e HGP2, que apresentaram os maiores teores de C (Quadro 1) e de Po (Figura 1b). Excluindo estas duas amostras da correlação, os coeficientes (r) ficaram na ordem de 0,20. Por outro lado, o C orgânico correlacionou-se estreitamente com as formas de Fe e Al extraídas com oxalato de amônio (Quadro 4). Esse fato, provavelmente, decorre do efeito inibidor que os compostos orgânicos têm sobre o processo de cristalização de óxi-hidróxidos de Fe (Schwertmann et al., 1986) e de Al (Huang & Violante, 1986), favorecendo a formação de formas microcristalinas de elevada superfície específica. Tais superfícies têm uma elevada capacidade de retenção de P, mas, ao mesmo tempo, vários compostos orgânicos competem com o ânion ortofosfato pelos seus sítios de adsorção (Lopez-Hernandez et al., 1986). O resultado final dessas interações, embora precise ser mais bem esclarecido, evidencia a relevância da matéria orgânica na disponibilidade de P, além da que tem nas transformações entre formas orgânicas e inorgânicas de fósforo (Stewart & Tiessen, 1987).

CONCLUSÕES

1. Dezoito meses após a aplicação de fertilizantes fosfatados no sulco de plantio da cana-de-açúcar, o fósforo foi, preferencialmente, recuperado em formas inorgânicas.
2. Sua distribuição entre os reservatórios mais e menos disponíveis pareceu dever-se aos conteúdos de Fe e Al extraível dos solos por ditionito-citrato-bicarbonato.
3. Em solos com baixos teores de Fe-dit e Al-dit, até 70% do P do fertilizante foi recuperado sob formas inorgânicas de P prontamente biodisponíveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a International Foundation for Science- Suécia e ao CNPq- Brasil, pelo apoio financeiro recebido para o desenvolvimento deste projeto. Ao professor Arnaldo Jugurta de O. Alves, da UFRPE, pela colaboração na classificação dos solos utilizados neste estudo, e a dois revisores anônimos, pelas suas relevantes contribuições.

LITERATURA CITADA

- ARAÚJO, M.S.B, SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solo cultivado com cana-de-açúcar. I. Intensidade e formas de acumulação. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 17:389-396, 1993a.
- ARAÚJO, M.S.B, SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Efeito de fertilizações fosfatadas anuais em solo cultivado com cana-de-açúcar. I Formas disponíveis e efeito residual do P acumulado. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 17:397-403, 1993b.
- BALL-COELHO, B.; SALCEDO, I.H.; TIESSEN, H. & STEWART, J.W.B. Short- and long-term phosphorus dynamics in a fertilized ultisol under sugarcane. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison 57:1027-1034, 1993.
- BARROW, N.J. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C. & KAMPRATH, E.J., eds., The role of phosphorus in agriculture. Madison, ASA/CSSA/SSSA, 1980. p.333-355.
- BARROW, N.J. Reactions of anions and cations with variable charge soils. Adv. Agron., 38:183-230. 1985.
- BORGGAARD, O.K. Kinetics and mechanisms of soil iron oxide dissolution in EDTA, oxalate and dithionite. In: INTERNATIONAL CLAY CONFERENCE, 9., Strasbourg, 1989. Proceedings. FARMER, V.C. & TARDY Y., eds., Sci. Géol., Strasbourg, 1990, p.139-148.
- BOWMAN, R.A. & COLE, C.V. Transformation of organic phosphorus substrates in soils evaluated by NaHCO₃ extraction. Soil Sci., Baltimore, 125:49-54, 1978.
- DAY, P.R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C.A. et al. eds., Methods of soil analysis, Part 1. ASA/SSSA, Madison, 1965, p.545-566. (Agronomy 9)

- ENGELSTAD, O.P. & TERMAN, G.L. Agronomic effectiveness of phosphate fertilizers. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C. & KAMPRATH, E.J., eds., *The role of phosphorus in agriculture*. ASA/SSSA, Madison, 1980, p.311-332.
- HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B. & CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 46:970-976, 1982.
- HUANG, P.M. & VIOLANTE, A. Influence of organic acids on crystallization and surface properties of precipitation products of aluminum. In: HUANG, P.M. & SCHNITZER, M., eds., *Interactions of soil minerals with natural organics and microbes*. SSSA, Madison, 1986, p.159-221. (Special Publication 17)
- LOPEZ-HERNANDEZ, D.; SIEGERT, G. & RODRIGUEZ, J.V. Competitive adsorption of phosphate with malate and oxalate by tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 50:1460-1462, 1986.
- MANHÃES, M.S. Eficiência no uso de fertilizantes em cana-de-açúcar no Brasil. *Brasil Açucareiro*, Rio de Janeiro, 90:17-22, 1977.
- McLAUGHLIN, J.R.; RYDEN, J.C. & SYERS, J.K. Sorption of inorganic phosphate by iron-and-aluminum-containing compounds. *J. Soil Sci.*, London, 32:365-377, 1981.
- MEHRA, O.P. & JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: NATIONAL CONFERENCE ON CLAYS AND CLAY MINERALS, 7., Washington, 1958, Proceedings. Washington, 1960, p.317-327.
- MURPHY, J. & RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta*, Amsterdam, 27:31-36, 1962.
- PEREIRA, J.N. Aproveitamento do fósforo residual pela primeira soca, em três solos de Pernambuco. Recife, UFRPE, 1994. 60p. (Dissertação de Mestrado)
- RAIJ, B. van. Fertilidade do solo e adubação. São Paulo, Piracicaba; Ceres, Potafos, 1991. 343p.
- RYDEN, J.C.; McLAUGHLIN, J.R. & SYERS, J.K. Mechanisms of phosphate sorption by soils and hydrous ferric oxide gel. *J. Soil Sci.*, London, 28:72-92, 1977.
- SALCEDO, I.H. Diagnóstico e dinâmica de fósforo em solos de Pernambuco. Recife, UFPE, 1993, 256 p. (Tese de Professor Titular)
- SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J. & RACZ, G.L. Reactions of phosphate fertilizers in soil. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C. & KAMPRATH, E.J., eds. *The role of phosphorus in agriculture*. Madison, ASA/CSSA/SSSA, 1980. p.263-310.
- SCHWERTMAN, W.U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit saurer Ammoniumoxalat-Lösung. *Z. Pflanzenernaehr Bodenkd.*, Berlin, 105:194-202, 1964.
- SCHWERTMAN, W.U.; KODAMA, H. & FISCHER, W.R. Mutual interactions between organics and iron oxides. In: HUANG, P.M. & SCHNITZER, M., eds., *Interactions of soil minerals with natural organics and microbes*. SSSA, Madison, 1986, p.223-250. (Special Publication 17)
- SIBBESEN, E. A simple ion-exchange resin procedure for extracting plant available elements from soil. *Pl. Soil*, The Hague, 46:665-669, 1977.
- SINGH, R.; MÖLLER, M.R.F. & FERREIRA, W. de A. Características da sorção do fósforo relacionadas com propriedades selecionadas de solos dos trópicos úmidos da Amazônia. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 7:233-241, 1983.
- SNYDER, J.D. & TROFYMOW, J.A. A rapid accurate wet oxidation diffusion procedure for determining organic and inorganic carbon in plant and soil samples. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, New York, 15:587-597, 1984.
- STEWART, J.W.B. & TIESEN, H. Dynamics of soil organic phosphorus. *Biogeochemistry*, Boston, 4:41-60, 1987.
- TIESEN, H.; SALCEDO, I.H. & SAMPAIO, E.V.S.B. Nutrients and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. *Agric. Ecosyst. Environ.*, Boca Raton, 38:139-151, 1992.
- TIESEN, H., STEWART, J.W.B. & COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 48:853-858, 1984.
- TIESEN, H. & MOIR, J.O. Characterization of available P by sequential extraction. In: CARTER, M.R., ed., *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Amsterdam, Can. Soc. Soil Sci. / Lewis Publishers, 1993. p.75-86.
- WILLIAMS, J.D.H.; MAYER, T. & NRIAGU, J.O. Extractability of phosphate minerals common in soils and sediments. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 44:462-465, 1980.
- WILLIAMS, J.D.H.; SYERS, J.K. & WALKER, T.W. Fractionation of soil inorganic phosphate by a modification of Chang and Jackson's procedure. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, 31:736-739, 1967.