

AVALIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO, POR DIVERSOS EXTRATORES, EM AMOSTRAS DE SOLOS CULTIVADOS COM CANA-DE-AÇÚCAR⁽¹⁾

F. C. da SILVA⁽²⁾ & B. van RAIJ⁽³⁾

RESUMO

Extratores de fósforo foram comparados em amostras de solos de áreas canavieiras, com características físico-químicas diversas. Cultivou-se a cana-de-açúcar, durante 75 dias, a partir de novembro de 1989, em condições de casa de vegetação, na ESALQ/USP, adicionando-se todos os nutrientes, com exceção de P. Determinaram-se as correlações entre os conteúdos referenciais de "P disponível" das partes aérea e subterrânea e as quantidades de fósforo no solo extraídas pelos seguintes processos: resina trocadora de íons; H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹; H₂SO₄ 0,25 mol L⁻¹; HCl 0,050 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,125 mol L⁻¹ (Mehlich-1); resina com Fe(OH)₃; resina sem agitação e papéis-filtro impregnados com Fe(OH)₃, com e sem agitação. Em geral, o P acumulado na planta relacionou-se com os teores nos solos obtidos pelos diferentes procedimentos de extração. A seqüência de valores decrescentes de r² dos modelos lineares, em relação aos conteúdos de fósforo nas partes aérea e subterrânea, foram, respectivamente: resina (62,0 e 77,7); resina-Fe (57,3 e 77,3); H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹ (57,3 e 75,4); Mehlich 1 (57,2 e 68,9); H₂SO₄ 0,25 mol L⁻¹ (54,7 e 71,0); resina-S/A (48,0 e 68,0); papel-S/A (35,8 e 44,6) e papel-CAC (29,4 e 40,4). A correlação múltipla, usando-se os teores de P e de argila do solo como variáveis independentes, e o P absorvido pela planta como variável dependente, foi superior na avaliação da disponibilidade, em comparação à simples correlação com o fósforo no solo. Separando-se os solos pelo teor de argila, verifica-se que, nos menos argilosos (< 200 g kg⁻¹) todos os métodos testados foram adequados, enquanto no outro agrupamento de solos, os métodos da resina e Mehlich-1 foram superiores aos demais. Quando se introduziu o teor de argila e a acidez do solo nos modelos que descrevem a disponibilidade de fósforo no solo, verificou-se que todos os processos de extração, exceto a resina com agitação, foram sensivelmente influenciados, melhorando a possibilidade de previsão da disponibilidade de P no solo.

Termos de indexação: fósforo, extratores e disponibilidade; cana-de-açúcar.

SUMMARY: EVALUATION OF PHOSPHORUS AVAILABILITY IN SOILS CULTIVATED WITH SUGAR-CANE

Twenty soils with varied physical-chemical properties were collected in sugar-cane growing areas of the State of São Paulo, Brazil, to compare soil tests for phosphorus. Sugar cane, variety SP 70-1284, was cultivated under greenhouse conditions for 75 days, beginning November 1989, in 6 kg pots, with three replicates for each soil. The soils were limed as needed and micronutrients, sulfur, nitrogen and potassium were supplied. The limiting factor of growth was considered to

(1) Trabalho apresentado na XX Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, em 28 de julho de 1992, Piracicaba (SP). Apoio financeiro: FAPESP. Recebido para publicação em outubro de 1993 e aprovado em fevereiro de 1996.

(2) Pesquisador EMBRAPA/CNPSolos, Rua Jardim Botânico, 1024. CEP 22460-000 Rio de Janeiro (RJ).

(3) Pesquisador do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), Seção de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, Caixa Postal 28, CEP 13001-970 Campinas (SP). Bolsista do CNPq.

be phosphorus. Dry matter of roots and above-ground parts of the plants and their P contents were taken as reference for the availability of the element in the soil. Phosphorus was extracted from soils by different procedures using ion exchange resin, $0.025 \text{ mol L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$, $0.25 \text{ mol L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$, $0.05 \text{ mol L}^{-1} \text{HCL} + 0.125 \text{ mol L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$ (Mehlich-1), ion exchange resin with $\text{Fe}(\text{OH})_3$, ion exchange resin without shaking, and filter paper impregnated with $\text{Fe}(\text{OH})_3$, with and without shaking. In general, P uptake of different plant parts was related to P, determined by the different procedures. The values of determination coefficients (r^2) for P contained in the above-ground parts and roots were the following: resin (62.0 and 77.7); resin-Fe (57.3 and 77.3); $0.025 \text{ mol L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$ (57.3 and 75.4); Mehlich 1 (57.2 and 68.9); $0.25 \text{ mol L}^{-1} \text{H}_2\text{SO}_4$ (54.7 and 71.0); resin without shaking (48.0 and 68.0); and filter paper impregnated with $\text{Fe}(\text{OH})_3$, without (35.8 and 44.6) and with shaking (29.4 and 40.4). Multiple correlations including soil P, clay content and soil acidity as independent variables were superior for assessing availability, as compared with simple correlations with soil P alone and plant P as dependent variable. In soils with less than 200 g kg^{-1} clay, all methods were adequate, whereas in soils with higher clay content, the resin and Mehlich-1 methods were superior to the others. When clay content and soil acidity related parameters were also considered in multiple regressions, all extraction processes, with the exception of resin without shaking, improved the possibility of predicting P availability in the soil.

Index terms: phosphorus, P extractors, P availability, sugar-cane.

INTRODUÇÃO

A análise de fósforo em solos, para a cultura da cana-de-açúcar, ainda é assunto que suscita dúvidas no Brasil. Nas décadas dos 60s e 70s, essa análise era feita com dois extratores ácidos. Inicialmente, utilizava-se a solução extratora de H_2SO_4 $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ proposta por Catani & Gargantini (1954), com uma relação de 4 g de terra para 100 ml de solução extratora. A partir de 1965, passou-se a usar, em todos os Estados, exceto São Paulo, o chamado duplo ácido, ou método Mehlich-1, consistindo em H_2SO_4 $0,0125 \text{ mol L}^{-1} + \text{HCL}$ $0,050 \text{ mol L}^{-1}$ (Nelson et al., 1953). Tal método foi adaptado para o Brasil na relação de 10 cm^3 de terra e 100 mL de solução extratora, relação essa também adotada, na ocasião, para a solução de H_2SO_4 $0,025 \text{ mol L}^{-1}$, usada em São Paulo. Na prática, os resultados de fósforo, quando extraídos pelas soluções de Mehlich-1 ou com H_2SO_4 $0,025 \text{ mol L}^{-1}$, pouco diferem entre si.

Posteriormente, em face da constatação experimental da baixa correlação entre os teores de P extraídos por tais métodos e a resposta das plantas à adubação fosfatada (Raij et al., 1984), decidiu-se pesquisar outros extratores. Para a cultura de cana-de-açúcar, Bittencourt et al. (1978) propuseram o uso de solução ácida mais concentrada, ou seja, a de H_2SO_4 $0,25 \text{ mol L}^{-1}$, para extração de fósforo do solo. A partir de pesquisas de campo, Manhães et al. (1981) propuseram, para os Estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Minas Gerais, a calibração dos teores P extraídos por essa solução mais concentrada e a produção relativa da cana-de-açúcar.

Os extratores ácidos, apesar de sua simplicidade e rapidez em rotinas de análise de solo (Vettori, 1969), apresentam baixa capacidade de extração de P em latossolos com textura argilosa e com maiores teores de óxidos de ferro e alumínio, característicos do Estado de São Paulo (Raij et al., 1984). Ademais, por extrair mais P ligado ao cálcio no solo e apenas pequena proporção do elemento ligado a Fe e Al (Kamprath & Watson, 1980), acusam o P de resíduos de fosfatos

de rocha adicionados ao solo como adubos e não disponíveis às plantas.

Todavia, existem métodos de extração de fósforo do solo que se mostram pouco afetados por resíduos de fosfatos naturais no solo e que extraem fósforo ligado a Fe e Al. Entre eles, destacam-se a resina trocadora de íons (Raij et al., 1986), o bicarbonato de sódio $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ a pH 8,5 - Olsen 1 (Olsen et al., 1954), a solução de ácido clorídrico $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ com fluoreto de amônio $0,03 \text{ mol L}^{-1}$ - Bray 1 (Bray & Kurtz, 1945) e o papel-filtro impregnado com hidróxido férrico (Menon et al., 1988). Entre esses extratores de P, a resina trocadora de íons é bem menos afetada pelos citados problemas (Raij et al., 1986), em parte devido ao efeito do tamponamento da suspensão em pH pouco abaixo da neutralidade e à presença de íons bicarbonato (Sibbesen, 1977).

Na literatura mundial têm surgido novas técnicas para avaliar a disponibilidade de fósforo no solo, destacando-se o uso de tiras de papel-filtro impregnado com hidróxido férrico (papel- $\text{Fe}(\text{OH})_3$) (Menon et al., 1988, 1989).

Em virtude de a cultura de cana-de-açúcar utilizar em rotina a solução H_2SO_4 $0,25 \text{ mol L}^{-1}$ como extrator de P, pelos resultados promissores do papel- $\text{Fe}(\text{OH})_3$ em nível internacional e pelo emprego crescente da resina trocadora de íons difundida no Brasil, realizou-se o presente trabalho para avaliar a disponibilidade do P em amostras de solos canavieiros, comparando-se a eficiência de tais extratores.

MATERIAL E MÉTODOS

Para comparar os extratores de fósforo, utilizaram-se vinte solos com características diversas. Cultivou-se a cana-de-açúcar em vasos e determinaram-se as correlações entre o fósforo absorvido pela planta e os valores no solo obtidos com os processos de extração.

Solos - Para a escolha dos solos testados, procedeu-se a uma avaliação preliminar de 29 tipos do Estado de São Paulo, coletados em regiões canavieiras, efetuando-se análise química de rotina e determinando-se os teores de P pelos principais extratores. Vinte solos foram escolhidos, cujas características físico-químicas, mostram grande variabilidade nos teores de fósforo e em sua textura - Quadro 1. Os solos com saturação por bases inferior a 50% receberam calagem para corrigir a acidez até esse nível, utilizando-se calcário dolomítico com PRNT de 64% (Raij et al., 1985). Foram incubados durante dois meses, mantendo-se, nesse período, sua umidade por cobertura com lona plástica.

Instalação e condução do ensaio - O delineamento foi o inteiramente casualizado, com três repetições, perfazendo um total de sessenta vasos plásticos do tipo mescha como o descrito por Bataglia (1989), de 6,5 L de capacidade. Na fase inicial de condução do ensaio, procedeu-se à germinação de gemas destacadas da variedade SP 70-1284, em canteiro de areia lavada instalado ao ar livre. As gemas pré-germinadas, uma semana e meia após o plantio inicial, foram colocadas nos vasos previamente preenchidos com 6 kg de solo (base seca). Durante todo o período de cultivo, o teor de água dos solos foi mantido próximo da capacidade de campo. Por ocasião do plantio das gemas pré-germinadas, foram feitas aplicações

de solução de micronutrientes, na base de 60 mL da solução por vaso, por recipiente: 51,5 mg de ZnSO₄, 27,4 de MnSO₄.2H₂O, 14,4 mg de CuSO₄.5H₂O, 14,4 mg de Na₂B₄O₇ e 0,4 mg de (NH₄)₂MoO₄. A adubação de nitrogênio foi calculada tomando como base uma estimativa de produção de 80 gramas da matéria seca por vaso e considerando a composição média da parte aérea da cana-de-açúcar, aos seis meses, de 8 g de N kg⁻¹ e 10 g de K kg⁻¹ (Orlando Filho, 1978). Aplicou-se a adubação NK de 570 mg de nitrato de amônio e 760 mg de cloreto de potássio por vaso, parcelada em três vezes, no plantio e aos quinze e trinta dias da instalação do ensaio; aos trinta dias, adicionaram-se 1.130 mg de sulfato de amônio por vaso.

Colheita e análise do extrato - A colheita foi realizada 75 dias após o plantio, cortando-se a parte aérea da planta rente ao solo. As raízes remanescentes foram separadas do solo por lavagem com água corrente e retidas em peneira. A seguir, o material foi seco a 65°C, até massa constante. Foram determinadas as massas do material seco e moído. A análise do fósforo foi feita mediante preparo do extrato nítrico-perclórico, do material seco, e utilizando o método colorimétrico do amarelo do vanadatolibdato, segundo Sarruge & Haag (1974).

Análises físicas e químicas de caracterização dos solos - Para a obtenção das principais características físicas e químicas desses solos (Quadro 1),

Quadro 1. Resultados analíticos das amostras dos solos utilizados no ensaio

Amostra	Identificação	M.O.	Fósforo				pH CaCl ₂	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺ + Al ³⁺	SB ⁽¹⁾	CTC ⁽²⁾	V ⁽³⁾	Argila
			Re-sina	Mehlich-1	Pap-Fe (s/ag)	H ₂ SO ₄ 0,25 mol L ⁻¹									
n.º		g kg ⁻¹	mg dm ⁻³				mmolc dm ⁻³					%	g kg ⁻¹		
01	PVa	10	44	61	7,0	148	4,9	4,0	17	5	19	26	45	58	120
02	AQ	13	5	5	0,4	11	6,1	1,6	16	6	15	23	39	60	120
03	TEe	8	4	4	0,6	30	5,4	2,1	17	5	19	24	43	56	510
04	PVa	15	4	11	1,8	10	4,2	3,0	20	8	12	31	43	72	140
05	PVa	13	9	18	1,8	27	5,4	2,5	19	4	21	26	47	55	150
06	PVa	13	13	22	1,8	37	4,9	2,5	19	4	21	26	47	55	200
07	AQ	10	10	15	1,8	45	5,0	0,7	25	21	45	50	95	53	100
08	V	31	18	6	0,5	49	5,8	2,5	216	50	27	263	290	91	630
09	LRd	27	45	20	3,0	92	5,0	5,1	28	9	43	42	85	50	520
10	Cbe	7	6	12	0,4	22	5,3	2,4	19	11	22	32	54	60	120
11	PVe	21	40	27	3,0	11	4,9	7,4	42	12	45	61	106	58	610
12	LVA	10	18	35	0,4	55	4,5	0,9	4	7	26	12	38	42	080
13	LRd	15	32	32	2,3	50	5,3	0,6	6	5	19	12	31	39	390
14	LR ác	24	56	46	2,1	147	5,3	3,2	23	9	23	35	58	60	280
15	TEl	30	18	13	3,3	46	6,2	3,6	186	50	15	240	255	94	730
16	AQ	15	8	15	3,2	30	4,9	5,7	14	5	20	25	45	56	110
17	TEe	22	46	39	1,3	83	4,8	2,3	29	10	30	41	71	50	480
18	LEd	14	61	47	6,6	124	4,8	4,3	14	5	25	23	48	48	240
19	PVa	7	6	10	0,5	22	6,4	1,0	17	7	26	25	51	49	190
20	LRd	21	22	6	1,7	52	4,9	9,6	16	10	25	22	47	47	530

⁽¹⁾ SB = Ca + Mg + K e P. ⁽²⁾ CTC = SB + H + Al. ⁽³⁾ Saturação de bases (V) = SB x 100/CTC.

utilizaram-se os seguintes procedimentos analíticos: teor de argila (Camargo et al., 1986); pH em CaCl_2 0,005 mol L^{-1} ; potássio, cálcio e magnésio, extraídos com o auxílio da resina trocadora de íons e determinação por espectrofotometria de absorção atômica; acidez total (H + Al) por potenciometria em tampão SMP e matéria orgânica por colorimetria (Raij et al., 1987).

Extração e determinação de fósforo - Para o estudo da disponibilidade de fósforo, os solos foram analisados pelos seguintes métodos:

Extração com solução de H_2SO_4 0,025 mol L^{-1} - Agitação de 10 cm^3 de terra com 100 mL de solução de H_2SO_4 0,025 mol L^{-1} , por quinze minutos. A suspensão foi deixada decantar, retirando-se as alíquotas para análise (Raij & Zullo, 1977).

Extração com solução de H_2SO_4 0,25 mol L^{-1} - Agitação de 10 cm^3 de terra e 100 cm^3 de solução de H_2SO_4 0,25 mol L^{-1} , por quinze minutos. Filtração e retirada de alíquotas para análise (Bittencourt et al., 1978).

Extração com extrator de Mehlich-1 ou "Carolina do Norte" - Agitação de 10 cm^3 de terra em 100 cm^3 de solução extratora Mehlich-1 (0,0125 mol L^{-1} de H_2SO_4 e 0,050 mol L^{-1} de HCl) por quinze minutos (Vettori, 1969). Filtração e retirada de alíquotas para análise.

Extração com resina trocadora de íons - Utilizou-se o método descrito por Raij et al. (1986), com base na extração de 2,5 cm^3 de amostras de terra com 2,5 cm^3 de mistura de resinas catiônica e aniônica, previamente tratada com bicarbonato de sódio 1,0 mol L^{-1} por agitação de 16 horas com 25 mL de água.

Extração com resina trocadora de íons, contendo precipitado de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ (Resina-Fe) - Modificação do método anterior (Raij et al., 1986). Nesta variante, a resina foi previamente tratada com solução de FeCl_3 com NaOH 1 mol L^{-1} , formando um precipitado de $\text{Fe}(\text{OH})_3$, de forma que, para cada 25 mol_c de capacidade de troca catiônica de resina, adicionaram-se 10 mol_c de $\text{Fe}(\text{OH})_3$. A seguir, a resina foi tratada com solução de NaHCO_3 1 mol L^{-1} (em pH 8,5) e decantada. A partir daí, o procedimento foi o mesmo do item anterior.

Extração com resina trocadora de íons sem agitação (resina - sem agitação) - Trata-se de outra variante do método da resina, suprimindo o período de agitação de 16 horas por repouso no mesmo período.

Extração com papel-filtro, contendo precipitado de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ e com agitação (Papel-Fe com agitação) - O papel-filtro foi previamente preparado, por modificação da técnica de Menon et al. (1988), mergulhando-o em solução acidificada de FeCl_2 , drenando o excesso, secando e mergulhando, em seguida, em solução de amônia a 50 g L^{-1} . A extração do solo foi feita com 2,5 cm^3 de terra, 25 mL de água destilada e 100 cm^2 de superfície de papel-Fe, agitando-se por 16 horas. Após, o papel-Fe foi lavado com água destilada e o fósforo, extraído com HCl 2,0 mol L^{-1} .

Extração por meio de papel com $\text{Fe}(\text{OH})_3$ precipitado [Papel-Fe], sem agitação - Trata-se de modificação do método descrito no item anterior, no qual não é feita agitação do solo em água e papel- $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Deixou-se o solo em contato com o Papel-Fe, sem agitar. Para isso, três camadas de solo foram intercaladas com as tiras de papel-filtro. Adicionou-se água apenas para umedecer, sem excesso de líquido livre, e deixou-se em equilíbrio por 16 horas.

O fósforo foi determinado pelo método colorimétrico descrito por Raij et al. (1987).

Procedimento estatístico - Os resultados de P extraído das amostras dos solos foram correlacionados com as quantidades de fósforo contido na parte aérea e nas raízes. Para os parâmetros de solo e conteúdos de fósforo acumulados na parte aérea e nas raízes das plantas, testou-se a heterogeneidade das suas variâncias e a normalidade das distribuições dos dados, através de regressões lineares entre o logaritmo da média e o da variância de cada uma delas, visando verificar a necessidade de transformar a distribuição de alguma variável em normal, para adequá-la às condições essenciais de análise da variância e outros testes paramétricos, o que foi aferido pelos testes de Hartley e Bartlett (Barbosa, 1983).

Posteriormente, realizou-se a análise de regressão linear múltipla de acordo com o modelo:

$$Y - B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 \dots + B_nX_n + E,$$

onde:

Y = fósforo acumulado nas partes aérea ou raízes da cana-de-açúcar;

X_i = fósforo extraído do solo pelos diferentes métodos;

X₁ a X_n = atributos do solo (pH, saturação por bases, acidez potencial, soma de bases, capacidade de troca, porcentagem de argila e matéria orgânica).

Com o critério de seleção de parâmetros do solo que possam melhorar o modelo multivariado geral de acumulação de P pela planta, adotou-se o coeficiente padrão (Cp), de Mallóws (1973), técnica que possibilita maximizar o valor de r^2 , selecionando a introdução dos novos parâmetros de solo significativos (teste F).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes de determinação ($r^2 \times 100$) - Figura 1 - para as relações lineares entre P contido na parte aérea e P no solo, permitem ordenar os métodos de extração, pelo valor decrescente de eficiência: resina (62,0), resina-Fe (57,3); H_2SO_4 0,25 mol L^{-1} (57,3); Mehlich n°1 (57,2), H_2SO_4 0,025 mol L^{-1} (54,7), resina-SA (48,0), papel-SA (35,8) e papel-CA (29,4).

Considerando o P contido nas raízes - Figura 2 - a seqüência passa a ser: resina (77,7), resina-Fe (77,3), H_2SO_4 0,025 mol L^{-1} (75,4), H_2SO_4 0,25 mol L^{-1} (71,0), Mehlich 1 (68,9), resina-SA (68,0), papel-SA (44,6) e papel-CA (40,4). Percebe-se, assim, pequena superioridade do método de extração pela resina e que a

adição de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ à resina (Figura 2f), feita para acentuar a adsorção de P, não se revelou medida eficaz. Muito menos o papel saturado com $\text{Fe}(\text{OH})_3$ revelou-se extrator adequado.

As técnicas que medem o fator quantidade, como resina e os extratores ácidos, mostraram-se mais eficientes na avaliação da disponibilidade de P do que as baseadas na extração por difusão (resina-SA e papel-SA).

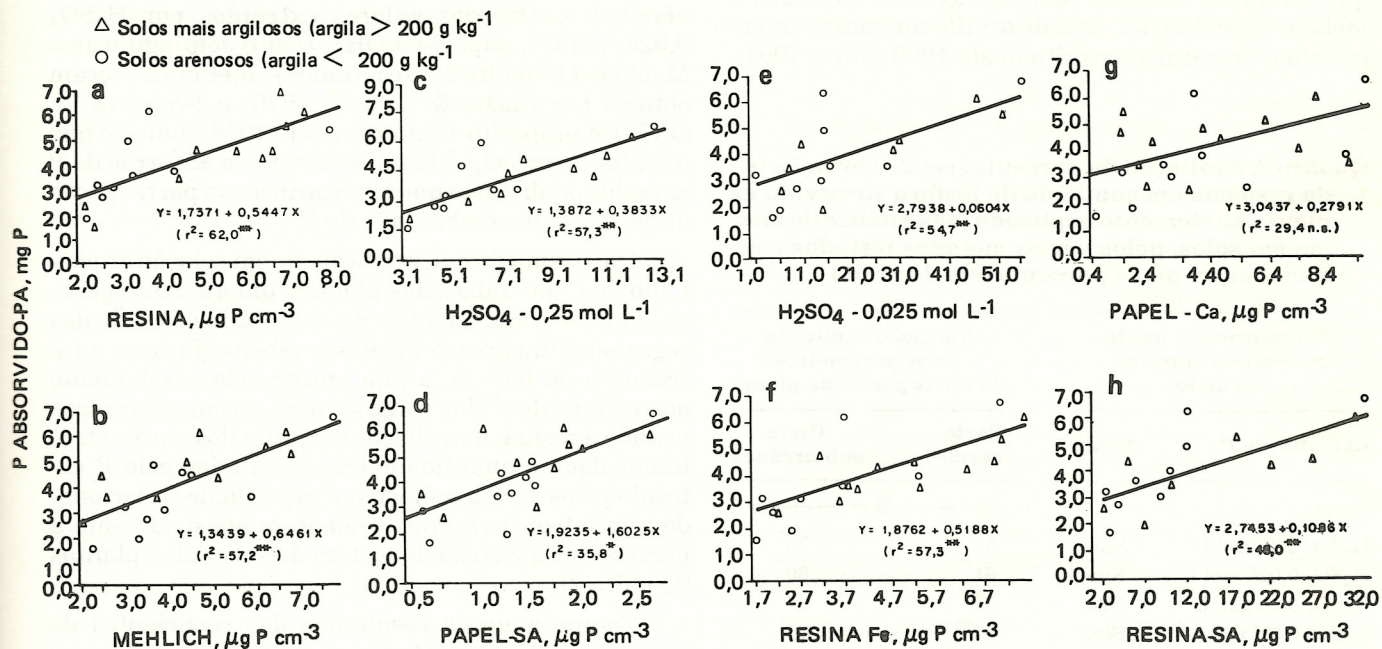


Figura 1. Relação entre o P acumulado na parte aérea da planta e o P extraído do solo pelos métodos da resina trocadora de íons⁽¹⁾ (a); Mehlich⁽¹⁾ (b); $\text{H}_2\text{SO}_4 - 0,25 \text{ mol L}^{-1}$ (c); papel- $\text{Fe}(\text{OH})_3$ sem agitação (d); $\text{H}_2\text{SO}_4 - 0,025 \text{ mol L}^{-1}$ (e); resina- $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ⁽¹⁾ (f); papel-Fe com agitação (g), e resina sem agitação (h).

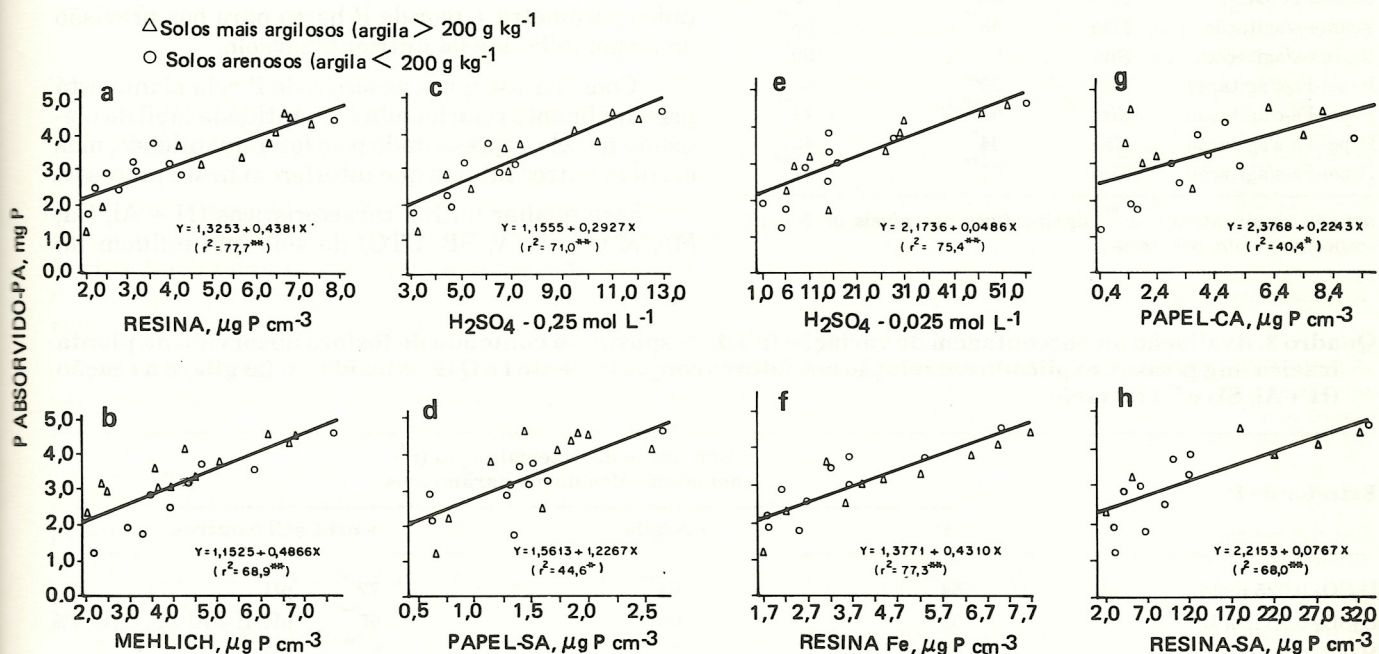


Figura 2. Relação entre o P acumulado na raiz e o P extraído do solo pelos métodos de resina trocadora de íons⁽¹⁾ (a); Mehlich⁽¹⁾ (b); $\text{H}_2\text{SO}_4 - 0,25 \text{ mol L}^{-1}$ (c); papel- $\text{Fe}(\text{OH})_3$ sem agitação (d); $\text{H}_2\text{SO}_4 - 0,025 \text{ mol L}^{-1}$ (e); resina- $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ⁽¹⁾ (f); papel-Fe com agitação (g), e resina sem agitação (h).

⁽¹⁾ Dados transformados em \sqrt{x} .
 ** Significativo ao nível de 1%.

Também, o P absorvido pelas raízes revelou-se um pouco melhor do que o P contido na parte aérea, como parâmetro fisiológico de disponibilidade de P no solo.

Com relação aos métodos mais usados nos laboratórios de análise de solo do Brasil, deve-se salientar que o fato de a resina com agitação ter superado o método de Mehlich-1, está de acordo com praticamente toda a literatura consultada até 1990 (Silva, 1991).

Quadro 2. Avaliação da porcentagem de variação (r^2) da resposta em conteúdo de fósforo absorvido na planta ao elemento explicada pela análise do mesmo em solos, pelos vários métodos testados e associados ou não à porcentagem de argila

Característica usada no modelo ajustado aos dados		Variação explicada pelos parâmetros de P nas partes da planta	
Extrator de P	Argila	Parte aérea	Parte subterrânea
		%	
H ₂ SO ₄ 0,25 mol L ⁻¹	Não	55**	75**
H ₂ SO ₄ 0,025 mol L ⁻¹	Sim	61**	80**
H ₂ SO ₄ 0,25 mol L ⁻¹	Não	57**	71**
H ₂ SO ₄ 0,5N mol L ⁻¹	Sim	63**	72**
Mehlich ¹	Não	57**	69**
Mehlich ¹	Sim	64**	81**
Resina (IAC) ¹	Não	62**	78**
Resina (IAC) ¹	Sim	62**	78**
Resina Fe(OH) ₃ ¹	Não	57**	77**
Resina-Fe(OH) ₃ ¹	Sim	58**	78**
Resina-s/agitação	Não	48**	68**
Resina-s/agitação	Sim	55**	69**
Papel-Fe-c/agitação	Não	29 ^{ns}	40*
Papel-Fe-c/agitação	Sim	51**	71**
Papel-Fe-s/agitação	Não	34*	45*
Papel-Fe-s/agitação	Sim	51**	67**

ns: não significativo; * e ** significativos aos níveis de 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

Quando se introduziu o teor de argila do solo nos modelos de regressão múltipla, por ser uma característica intimamente relacionada com o poder tampão (ou fator capacidade) de P dos solos (Camargo et al., 1974), constatou-se uma melhoria significativa na capacidade de previsão do P acumulado na parte aérea, a partir dos valores extraídos por H₂SO₄ 0,025 mol L⁻¹, papéis-Fe(OH)₃ com e sem agitação e Mehlich-1 (Quadro 2). Resultados semelhantes foram obtidos por Bache & Rogers (1970) e Freire et al. (1979). A propósito, Camargo et al. (1974) indicam que a argila é o principal fator envolvido na adsorção de P em solos paulistas, o que explicaria a sua participação decisiva na disponibilidade de P.

Da mesma forma, verificou-se, em relação ao acúmulo de P nas raízes das plantas, um aumento generalizado nos coeficientes de determinação (r^2) das regressões lineares múltiplas estabelecidas com a introdução do teor de argila, mostrando nivelamento dos valores de r^2 das soluções ácidas com as técnicas usando a resina. A avaliação conjunta dos parâmetros intensidade e quantidade (representados pelo P extraído pelos vários métodos) e capacidade (relacionado com o teor de argila), melhoram sensivelmente a previsão de absorção de fósforo do solo pelas plantas (Quadro 2).

Comparando os resultados dos coeficientes de determinação apresentados nesse quadro, com e sem a introdução do teor de argila no modelo de regressão, percebe-se que todos os processos de extração, exceto resina com agitação, foram sensivelmente influenciados pela consideração da textura. Isso ressalta a vantagem do método de extração por resina, já que um único parâmetro, o teor de P, basta para boa previsão da disponibilidade do nutriente no solo.

Considera-se que a absorção de P pela planta está principalmente relacionada à quantidade lábil do elemento no solo, representado pelo fator quantidade, mas existem outros fatores que interferem neste processo.

Para avaliar outras características (H + Al, Ca, Mg, M.O., pH, V, SB, CTC) do solo que influem na

Quadro 3. Avaliação da porcentagem de variação (r^2) da resposta em conteúdo de fósforo absorvido na planta inteira (mg p/vaso), explicado em relação aos fatores conjuntamente I e Q (P extraído), C (argila) e a reação (H + Al, SB e V) do meio

Extrator de P	Coeficiente de determinação (r^2) com adição dos novos parâmetros		
	P	+ Argila	+ pH CaCl e outros
H ₂ SO ₄ 0,025 mol L ⁻¹	54**	64**	72** pH
H ₂ SO ₄ 0,25 mol L ⁻¹	59**	60**	95** pH, H + Al, SB, CTC, V%
Mehlich-1	54**	76**	84** pH
Resina (IAC)	62**	62**	73** pH
Resina-Fe(OH) ₃	56**	61**	78** pH, Ca, M.O.
Resina - s/agitação	54**	59**	81** pH, H + Al, CTC, V%
Papel-Fe(OH) ₃ c/agit.	30 ^{ns}	53**	98** pH, H + Al, SB, CTC
Papel-Fe(OH) ₃ s/agit.	48*	57**	65** pH

ns: não significativo; * e ** significativos aos níveis de 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

absorção de fósforo pela planta, adotou-se o critério do coeficiente padrão (Cp) de Mallöws (1973). Foram testadas, assim, as melhores regressões lineares múltiplas, obtendo-se os modelos que minimizaram esse valor, isto é, possibilitaram melhor diagnóstico (r^2) com a seleção de parâmetros significativos ao modelo. Nota-se, no quadro 3, que os parâmetros complementares ao modelo que influenciaram na eficiência das soluções ácidas (H_2SO_4 0,025 mol L⁻¹, H_2SO_4 0,25 mol L⁻¹ e Mehlich-1), para diagnosticar a disponibilidade de P para a cana-de-açúcar, foram as características do solo que estão associadas à sua acidez, tais como a acidez total (H + Al), a soma de bases (SB), a saturação por bases (V) e a CTC.

Em geral, observa-se uma tendência de nivelamento nos valores de r^2 em platô mais elevado nos modelos, quando se considerou o teor de argila (C), mantendo, porém, certa diferenciação entre métodos. Entretanto, a inclusão de características do solo associadas à acidez, nesses modelos, possibilitou a previsão precisa da disponibilidade de P para as plantas, mostrando influência notável da reação (pH, H + Al, SB e CTC) do meio e da textura, principalmente sobre os métodos do H_2SO_4 0,25 mol L⁻¹, papel-Fe(OH)₃ com agitação e resina sem agitação. Daí, ressaltar que os extratores de P muito influenciados pela acidez do solo mostram-se mais suscetíveis a erro. Quanto maior for o poder tampão do solo, tanto maior deverá ser o erro inerente à análise de P, pois se extrairá menos deste elemento, devido à ação de tamponamento do complexo coloidal.

CONCLUSÕES

1. O P acumulado nas diferentes partes da planta relacionou-se com o teor no solo determinado pelos diferentes processos de extração do elemento, na seguinte seqüência de valores decrescentes de r^2 : resina com agitação, resina-Fe, H_2SO_4 0,025 mol L⁻¹, Mehlich 1, H_2SO_4 0,25 mol L⁻¹, resina sem agitação, papel-Fe sem e com agitação. A parte da planta que mais se relacionou com o P do solo foi a subterrânea (raízes).

2. A disponibilidade do P no solo foi mais bem estimada quando foram considerados o pH e o teor de argila, exceto para a resina com agitação.

3. Nos solos com teor de argila inferior a 200 g kg⁻¹, a avaliação da disponibilidade de P foi eficaz, independentemente do extrator testado.

4. Em geral, os métodos que empregaram o papel-Fe apresentaram baixa capacidade de extração, o que implicou maior imprecisão.

LITERATURA CITADA

BACHE, B.W. & ROGERS, N.E. Soil phosphate values in relation to phosphate supply to plants for some Nigerian soils. *J. Agric. Sci., Oxford*, 74:383-390, 1970.

BARBOSA, J.O. O problema de heterocedasticidade da análise de variância. Seminários de C.P.G. em "Estatística e Experimentação Agrônoma", da ESALQ/USP, 1983. Piracicaba. 14p.

BATAGLIA, O.C. Sistemas de irrigação em vasos para experimento de adubação. *R. bras. Ci. Solo, Campinas*, 13:81-86, 1989.

BITTENCOURT, V.C.; ORLANDO F^o, J. & ZAMBELLO JR., E. Determination of available P for sugar cane in tropical soils by extraction with H_2SO_4 0,5N. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 16., São Paulo, 1977. Proceedings. São Paulo, Impress, 1978. v.2, p.1175-1186.

BRAY, R.H. & KURTZ, L.T. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Sci., Baltimore*, 59(1):39-45, 1945.

CABALA, R.P. & SANTANA, M.B.M. Disponibilidade e diagnose de fósforo pela análise química do solo com referência ao Brasil. *R. bras. Ci. Solo, Campinas*, 7(2):109-118, 1983.

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

CAMARGO, O.A. de; RAIJ, B. van & GROHMANN, F. Fixação do fósforo em solos avaliada pelo índice de Bache e Williams e sua correlação com outras propriedades. *Ci. Cult., São Paulo*, 26(7):681-685, 1974.

CATANI, R.A. & GARGANTINI, H. Extração do fósforo do solo pelo método de Neubauer e métodos químicos. *Bragantia, Campinas*, 13(1):55-62, 1954.

COOKE, I.J. & HISLOP, J. Use of anion exchange resin for the assesment available soil phosphate. *Soil Sci., Baltimore*, 96(3):308-311, 1963.

FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F.; BRAGA, J.M.; FRANÇA, G.C.; SANTOS, H.L. & SANTOS, P.R.R.S. Adubação fosfatada para a cultura da soja (*Glycine max.* (L) Merrill) baseada no fósforo disponível e no fator "capacidade". *R. bras. Ci. Solo, Campinas*, 3(2):105-111, 1979.

KAMPRATH, E.J. & WATSON, M.E. Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLES, E.C.; KAMPRATH, E.J., eds. The role of phosphorus in agriculture. Madison, American Society of Agronomy, 1980. p.433-469.

MALLÖWS, C.L. Some comments on Cp. *Technometrics, Alexandria*, 15:661-675, 1973.

MANHÃES, M.S.; AZEREDO, D.F.; ROBAINA, A.A. & VIEIRA, J.R. Calibração de fósforo disponível para cana-de-açúcar em solos dos Estados do Rio de Janeiro, Espírito Santo e Minas Gerais (Zona da Mata). *Brasil Açúcar, Rio de Janeiro*, 97(2):50-56, 1981.

MENON, R.G.; CHIEN, S.H. & HAMMOND, L.L. The Pi soil phosphorus test: a new approach to testing for soil phosphorus. Alabama, International Fertilizer Development Center, Muscle Shoals, 1989. 10p.

MENON, R.G.; CHIEN, S.H.; HAMMOND L.L. & SISSING, H.H. A determination of plant-available phosphorus by the iron hydroxide-impregnated filter paper (Pi) soil test. *Soil Sci. Soc. Am. J., Madison*, 52(1):110-115, 1988.

NELSON, W.L.; MEHLICH, A. & WINTERS, E. The development, evaluation and use of soil tests for phosphorus availability. In: PIERRE, W.H. & NORMAN, A.G., eds. Soil fertilizer phosphorus. New York, Academic Press, 1953. p.153-188. (Agronomy, 14)

- OLSEN, S.R.; COLE, C.V.; WATENABE, F.S. & DEAN, L.A. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Washington, USDA, 1954. (USDA Circular, 939)
- ORLANDO F^o, J. Absorção dos macronutrientes pela cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) variedade CB41-76, em três grandes grupos de solos no Estado de São Paulo. Piracicaba, ESALQ/USP, 1978. 154p. (Tese de Doutorado)
- RAIJ, B. van. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. R. bras. Ci. Solo, Campinas, 2(1):1-9, 1978.
- RAIJ, B. van; FEITOSA, C.T. & SILVA, N.M. da. Comparação de quatro extratores de fósforo de solos. Bragantia, Campinas, 43(1):17-29, 1984.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S. & BATAGLIA, O.C. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas, Fundação Cargill, 1987. 170p.
- RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. & SILVA, N.M. da. Extraction of phosphorus, potassium, calcium, and magnesium from soils by an ion-exchange resin procedure. Commun. Soil Sci. Plant Anal., New York, 17(5):547-566, 1986.
- RAIJ, B. van; SILVA, N.M. da; BATAGLIA, O.C.; QUAGGIO, J.A.; HIROCE, R.; CANTARELLA, H.; BELLINAZZI JUNIOR, R.; DECHEN, A.R. & TRANI, P.E. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas, IAC, 1985. 107p. (Boletim técnico, 100)
- RAIJ, B. van & ZULLO, M.A.T. Métodos de análise de solo. Campinas, Instituto Agronômico, 1977. 16p. (Circular, 63)
- SARRUGE, J.R. & HAAG, H.P. Análises químicas em plantas. Piracicaba, ESALQ/USP, 1974. 57p.
- SIBBESEN, E. Simple ion-exchange resin procedure for extracting plant-available element from soil. Plant Soil, The Hague, 46(3):665-669, 1977.
- SILVA, F.C. da. Avaliação da disponibilidade de fósforo, por diversos extratores, em solos cultivados com cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). Piracicaba, ESALQ/USP, 1991. 165p. (Dissertação de Mestrado)
- VETTORI, L. Métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 1969. 24p. (Boletim Técnico, 7)
- ZUNINO, H.; AGUILERA, M. & PEIRANO, P. A modified resin exchange method for measurement of available phosphate in soils derivad from vulcanic ash. Soil Sci., Baltimore, 114:403-405, 1972.