

DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO E RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO AVALIADAS POR MEIO DE EXTRATORES QUÍMICOS E DO CRESCIMENTO DE SOJA EM AMOSTRAS DE SOLO COM DIFERENTES VALORES DO FATOR CAPACIDADE^{1/}

Antônio Saraiva Muniz^{2/}
Roberto Ferreira de Novais^{3/}
Francisco Morel Freire^{4/}
Júlio César Lima Neves^{3/}
Nairam Félix de Barros^{3/}

1. INTRODUÇÃO

Estudos sobre a disponibilidade de fósforo, avaliada por meio de extratores químicos, têm sido exaustivamente conduzidos. No entanto, o simples conhecimento do teor de fósforo disponível ou extraível (P-disponível) não tem sido suficiente para que se possa fazer, com segurança, recomendação de adubação fosfatada. Mattingly (1965), citado por NOVAIS (35), observou que uma simples medida em laboratório não é suficiente para predizer, com segurança, a quantidade de fósforo que um solo é capaz de proporcionar à planta. HOLFORD (20) considera dois problemas fundamentais envolvidos na avaliação do P-disponível: a difícil-

^{1/} Parte do trabalho de tese do primeiro autor, para a obtenção do título de M.S., na Universidade Federal de Viçosa.

Aceito para publicação em 14-10-1986.

^{2/} Departamento de Ciências Agrárias. 87.100 Maringá, PR.

^{3/} Departamento de Solos da UFV. 36570 Viçosa, MG.

^{4/} EPAMIG. 35700 Sete Lagoas, MG.

dade de medir, com um extrator químico, todo o fósforo disponível para as plantas e a impossibilidade de medir, com um extrator químico, a capacidade-tampão do solo, ou seja, o extrator não indica a capacidade do solo para manter o fósforo na solução durante o período de crescimento do vegetal.

Uma adequada avaliação da disponibilidade de fósforo para as plantas deve abranger, pelo menos, informações de dois dos seguintes fatores: quantidade, capacidade e intensidade (29). O P-disponível obtido por um extrator fornece uma estimativa do fator quantidade (2, 3, 47). São várias as metodologias utilizadas e propostas para avaliar esses fatores (3, 6, 11, 13, 19, 27, 30, 31, 35, 36, 37, 38). A significância da correlação entre características do solo e medidas da capacidade-tampão de fosfato ou parâmetros que refletem o fator capacidade tem sido demonstrada. Entre essas características foram observadas correlações da capacidade-tampão de fosfato com o teor de argila (3, 32, 36, 38), matéria orgânica (3, 32), capacidade de campo, superfície específica do solo, declividade ΔP -disponível/ ΔP -adicionado e P-concentração de equilíbrio (37, 38). Assim, NOVAIS e KAMPRATH (37, 38) apontaram a necessidade de serem conhecidos aspectos relativos ao fator capacidade do solo, além do fósforo com o uso de extratores químicos, como critério para a recomendação de adubação fosfatada, o que permitiria a extrapolação de níveis críticos com algum fundamento teórico. Assim, características do solo que refletem o fator capacidade seriam adequadas para estimar esses níveis, bem como para estabelecer recomendação de adubação, como o fizeram FREIRE *et alii* (18). Esses autores, ao estudarem o efeito da adubação fosfatada na cultura da soja, em quatro solos do Triângulo Mineiro, verificaram que os níveis críticos de fósforo, para o extrator Mehlich-1, variaram de 9,9 ppm, em um solo com 74,8% de argila, a 24,7 ppm, em outro com 18,8%. Foi observada correlação significativa entre os níveis críticos de fósforo e o fator capacidade, expresso pela textura.

VIDOR e FREIRE (48), ao estudarem a resposta da soja à adubação fosfatada, verificaram que a fração disponível do fósforo aplicado foi dependente da textura, variando os níveis críticos, para o extrator Mehlich-1, de 8 a 10 ppm, nos solos argilosos, e de 20 a 25, no solo franco-argiloso. MARTENS *et alii* (33) observaram correlação inversa entre os teores de fósforo, para o extrator Bray-1, e o conteúdo de argila dos solos. Ao estudar a relação entre os teores de fósforo no solo e a produção da soja, verificações semelhantes foram feitas por SANTOS (41).

As variações de P-disponível, calculado por meio de diferentes extratores químicos, num mesmo solo, decorrem da composição desses extratores e dos diferentes modos de extração das formas de fósforo (4, 5, 8, 9, 28, 35, 43, 44, 50). Essas diferenças são responsáveis pela maior ou menor sensibilidade do extrator ao fator capacidade (2, 21, 22, 25, 34). BAHIA FILHO (2) observou que, quanto maior a sensibilidade do extrator à capacidade-tampão, maiores as variações de nível crítico entre solos que apresentem diferenças na capacidade-tampão. HOLFORD (22) verificou que o extrator mais sensível ao tamponamento apresentou menor variação de nível crítico de fósforo. Entretanto, considerando a sensibilidade do extrator, em consequência do processo de sua exaustão, pela natureza da argila ou de outros componentes do solo, é de esperar maior variação de nível crítico entre os extratores mais sensíveis.

Para HOLFORD e MATTINGLY (25), a facilidade de absorção, pelas plantas, do fósforo da reserva lábil é negativamente relacionada com a energia de ligação de fosfato e com a capacidade-tampão do solo. O extrator, como o sistema radicular da planta, extrairia uma quantidade de fosfato que dependeria diretamente da quantidade de fosfato lábil e inversamente da capacidade-tampão do solo. Assim, em uma análise de solo, aumentando-se a capacidade-tampão, diminuir-se-ia a ex-

tração de P-lábil, do mesmo modo que seria reduzida sua absorção pelas plantas.

Pode-se concluir, portanto, que a disponibilidade de fósforo, no solo, para as plantas envolve múltiplos aspectos, sendo necessário conhecer e delimitar outros fatores que influenciam a absorção do elemento pelo vegetal, além dos teores obtidos pelos extratores.

Constituiu objetivo deste trabalho determinar os níveis críticos de fósforo para a cultura da soja, em diferentes solos, pelos extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2, e avaliar a influência de parâmetros do solo que refletem o fator capacidade sobre os valores desses níveis, bem como chegar a um modelo de recomendação de adubação fosfatada para diferentes solos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Amostras da camada superficial de 10 latossolos do Estado de Minas Gerais, com textura variável, foram coletadas, preparadas e submetidas a análises físicas e químicas (Quadros 1 e 2).

Foi medida, para cada uma, a capacidade máxima de adsorção de fósforo, proposta por OLSEN e WATANABE (39), segundo a metodologia utilizada por NOVAIS e KAMPRATH (37). A isoterma de Langmuir, ajustada aos dados, forneceu os valores de adsorção máxima de fósforo dos solos e de energia de adsorção, e a de Freudlich possibilitou fosse estimado o valor da constante (empírica) K . Para cada amostra, foi ainda determinado o potencial de fosfato monocálcico, proposto por SCHOFIELD (42), segundo a metodologia utilizada por NOVAIS e KAMPRATH (36). Tomando também por base a metodologia utilizada por esses autores, estimou-se a capacidade-tampão de fosfato de cada solo, considerada como parâmetro de fósforo no solo representativo de seu fator capacidade (Quadro 2). Foi também considerado como medida do fator capacidade de fósforo no solo o teor desse elemento na concentração de equilíbrio, após o contato, por uma e 24 horas, com concentrações variáveis desse elemento, em CaCl_2 0,01 M, na relação solo: solução de 1:10.

As determinações físicas, adicionais à textural, referiram-se ao equivalente de umidade, água retida a diferentes tensões (14) e capacidade de campo, segundo o método da coluna transparente, utilizado por FERNANDES (16) (Quadro 1).

De cada amostra, foram tomados 55 kg de solo, que receberam calagem, segundo o critério recomendado pela COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS (10). Como corretivo foi usada uma mistura de CaCO_3 e MgCO_3 , na relação estequiométrica de 4:1. A mistura foi homogeneizada com o solo e a incubação feita em saco plástico, com a umidade elevada à «capacidade de campo». Depois da estabilização dos valores de pH de cada amostra, todas foram passadas em peneira de 2 mm, novamente homogeneizadas e divididas, cada uma, em seis partes iguais. Cada parte recebeu, então, uma das seis doses de fósforo testadas: 0, 10, 30, 90, 270 e 540 pp2m de P (peso/peso). A fonte de fósforo foi o $\text{NaH}_2\text{P}_0_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, aplicado na forma de solução. Trabalhou-se com a unidade pp2m (partes por dois milhões), dada sua equivalência com kg/ha (1 ha com 2.000 t de solo) e maior facilidade de entender as recomendações nessa unidade, como sugeridas no final deste trabalho.

A concentração de potássio, determinada em cada amostra de solo (Quadro 2), foi elevada para 200 ppm, utilizando-se KCl em solução, aplicado sobre a superfície e homogeneizado com todo o volume de solo de cada vaso. Os demais nutrientes, com exceção do N, que não foi aplicado, foram adicionados em solução, segundo WAUGH e FITTS (49).

QUADRO 1 - Resultados das análises físicas das amostras dos solos

Solo			Características											
Identificação	Classificação	Areia grossa fina	Silte	Argila	Argila 7 ^a aproximação de campo	Capacidade Equivalente de campo	Teor de unidade em relação ao potencial matricial (bar)							
							-1/10	-1/5	-1	-3	-5	-15		
SJ-1	LV	35	42	7	16	16	17,0	10,7	15,2	9,5	8,1	7,2	6,8	5,9
SJ-2	LV	32	37	14	17	19	17,6	13,2	17,3	12,5	10,9	9,2	8,6	7,7
SJ-3	LV	43	30	9	18	18	15,1	11,3	14,3	10,4	8,8	7,7	7,1	6,5
SJ-4	LRd	12	26	30	32	47	26,8	23,9	26,2	23,7	21,8	20,4	19,7	18,9
SJ-5	LVA	13	19	32	36	44	27,7	24,1	29,5	23,1	21,8	19,6	18,8	17,5
SJ-6	LEa	21	25	11	43	43	25,5	21,3	25,6	21,3	19,0	16,5	15,7	14,4
SJ-7	LEa	20	33	2	45	45	24,0	19,8	22,9	19,0	18,0	16,5	15,8	14,5
SJ-8	LEa	12	16	22	50	51	29,9	25,9	26,7	26,4	23,5	22,4	21,6	20,5
SJ-9	LEa	5	13	20	62	62	30,5	26,1	29,1	27,7	25,0	24,1	23,3	21,3
SJ-10	LV	5	10	19	66	66	34,1	29,0	30,5	30,1	27,3	26,5	25,4	23,2

1/ USDA (46).

2/ Método da coluna transparente (12).

QUADRO 2 - Resultados das análises químicas das amostras dos solos

Solo		Características																		
Identi- ficação	Classi- ficação	pH	Al ⁺ 3a	Ca ⁺ 2a	Mg ⁺ 2a	p ^b	K ^b	M.O. ^c	OMF ^d	I ^e	PTF ^f	Energia de ad- sorção ^g	K-Freun- dlich	P _{caq} ^h (10)	P _{caq} ^h (20)	P _{caq} ^h (30)	P _{caq} ⁱ (50)	P _{caq} ⁱ (80)	P _{caq} ⁱ (100)	
		ppm			- ppm-			ppm												
SJ-1	LV	4,6	0,60	0,20	0,20	1	40	2,5	0,367	6,85	180	0,293	0,135	1,297	8,901	16,880	21,407	45,219	63,581	
SJ-2	LV	5,7	0,00	0,40	0,70	2	80	3,3	0,719	7,56	323	1,495	0,318	0,156	1,264	4,214	2,930	13,370	38,523	
SJ-3	LV	4,6	0,50	0,10	0,30	1	34	2,4	0,436	6,57	269	0,394	0,147	1,488	6,325	13,028	16,152	37,800	57,326	
SJ-4	Lkd	5,4	0,05	0,20	0,10	1	44	3,9	0,976	7,62	530	8,801	0,796	0,059	0,264	0,579	0,219	1,231	2,556	
SJ-5	LVa	4,9	0,10	0,60	0,60	1	75	3,9	0,944	7,41	464	3,875	0,578	0,113	0,561	1,515	0,428	2,388	7,228	
SJ-6	LEa	4,2	1,00	0,10	0,30	1	52	3,1	0,770	7,16	361	2,481	0,299	0,302	1,829	4,871	2,736	12,034	23,666	
SJ-7	LE	5,0	1,10	0,20	0,40	2	28	2,7	0,694	7,10	373	0,718	0,264	0,339	1,670	5,081	5,415	16,870	31,386	
SJ-8	LEa	4,6	0,70	0,20	0,10	2	34	4,5	0,907	7,19	470	2,964	0,492	0,168	0,786	2,167	0,750	3,624	10,491	
SJ-9	LEa	5,0	0,80	0,10	0,30	1	80	5,0	0,918	7,24	472	1,500	0,445	0,161	0,715	1,876	1,077	4,975	11,714	
SJ-10	LV	4,6	0,70	0,20	0,20	2	40	4,0	0,972	7,34	508	3,880	0,627	0,107	0,528	1,206	0,433	2,045	4,753	

a - Extrator KCl 1N (46).

b - Extrator Mehlich-1 (46).

c - Método Walkley e Black.

d - Capacidade máxima de adsorção de fósforo, expressa em mgP/g solo.

e - Intensidade - Fator intensidade, expresso em $\text{PH}_2\text{PO}_4 + 1/2 \text{ pCa}$, potencial de fosfato monocálcico.f - Poder-tampão de fósforo, expresso em moles de $\text{P} \cdot 10^{-8}/\text{g}$ solo/unidade de potencial de fosfato.g - Expressa em $(\mu\text{gP/g solo})^{-1}$.

h - Concentração de fósforo em solução após agitação de 10, 20 e 30 ppm de fósforo, por 1 hora, com as amostras de solo, na relação solo: solução de 1:10.

i - Concentração de fósforo em solução após agitação de 50, 80 e 100 ppm de fósforo, por 24 horas, com as amostras de solo, na relação solo: solução de 1:10.

As amostras foram então colocadas em vasos de plástico, cada um com 2,2 kg de solo. Cada vaso recebeu nove sementes de soja (*Glycine max* (L.) Merrill), variedade UFV-1, previamente inoculadas com *Rhizobium japonicum*, estirpe 547. Cinco dias depois da emergência, foi efetuado um desbaste, deixando-se quatro plantas em cada vaso.

Diariamente, os vasos eram irrigados com água desmineralizada, em quantidade suficiente para manter a umidade do solo próxima à capacidade de campo.

O experimento foi organizado segundo o esquema fatorial 10 x 6 (10 solos e 6 doses), com quatro repetições, distribuídas em blocos ao acaso.

Com 45 dias de idade, as partes aéreas das plantas foram cortadas rente ao solo e secas, a 70°C, em estufa, até peso constante.

Com duas repetições para cada tratamento, determinou-se o fósforo disponível, pelos extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2, na relação solo: solução de 1:10 (44), alterando-se o tempo de agitação, para os extratores Bray-1 e Bray-2, para 5 minutos. Depois da agitação, a suspensão foi centrifugada e filtrada e o fósforo em solução foi determinado.

Os dados de produção de matéria seca foram ajustados como variável dependente das doses de P testadas para cada solo. Nos solos em que foram obtidas equações de regressão quadráticas, estimaram-se as doses de fósforo necessárias para a obtenção de 90% da produção máxima. Os valores assim estimados foram substituídos nas equações que relacionaram P adicionado e P recuperado, obtendo-se os níveis críticos de fósforo para cada solo e extrator, conforme a metodologia usada por FONTES (17) e FREIRE *et alii* (18).

Diferentes características das amostras dos solos, as quais, supostamente, refletiriam o fator capacidade de fósforo do solo, tiveram avaliados seus efeitos sobre as variações dos níveis críticos de fósforo do solo e sobre a quantidade de fósforo a ser recomendada como fertilização de recuperação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Fósforo pelos Extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2

A capacidade de extração de fósforo, em todos os solos (Quadro 3), foi crescente, na seguinte ordem: Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2. Vários trabalhos têm demonstrado a maior capacidade de extração dos extratores de Bray, quando comparados com o extrator Mehlich-1 (1, 2, 3, 9, 12, 18).

A presença de íons de hidrogênio nos extratores estudados confere-lhes uma extensa ação solubilizadora sobre a forma P-Ca, do mesmo modo que atuam sobre as formas P-Al e P-Fe, embora com menor intensidade, o que torna mais eficiente a ação do extrator Mehlich-1 sobre a forma P-Ca. No entanto, o íon fluoreto, presente nos extratores de Bray, ao ocasionar a complexação dos íons de Fe e Al, torna mais eficiente sua ação sobre as formas P-Fe e P-Al (44). Assim, os maiores teores de fósforo recuperados pelos extratores Bray-1 e Bray-2 devem indicar grande ocorrência da forma P-Al nesses solos, de acordo com sugestão de NEVES (34), considerando que essa forma, juntamente com a forma P-Fe, geralmente predomina nos latossolos (4, 7, 15) e, ainda, que em solos recém-fertilizados, como é o caso, ocorre um aumento da forma P-Al (9, 40).

O maior grau de acidez do extrator Bray-2 confere-lhe maior ação solubilizadora sobre a forma P-Ca do que a obtida com o Bray-1. Assim, nos solos em que ocorre maior proporção de P-Ca, os teores extraídos pelo Bray-2 seriam maiores. Foram obtidos, nos solos SJ-1, SJ-3, SJ-4, SJ-7, SJ-9 e SJ-10, maiores teores de

QUADRO 3 - Fósforo recuperado pelos extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2, para as diferentes doses de fósforo aplicadas nas amostras de solo

Doses de P, em pp2m (kg/ha)	Solo									
	SJ-1	SJ-2	SJ-3	SJ-4	SJ-5	SJ-6	SJ-7	SJ-8	SJ-9	SJ-10
	LV	LV	LV	LRd	LVa	LEa	LE	LEa	LEa	LV
Mehlich-1										
	ppm									
0	2,1	0,9	0,6	0,8	0,8	0,9	1,2	0,8	0,9	0,7
10	1,9	1,0	1,0	0,6	1,1	0,9	1,5	1,2	0,9	1,1
30	2,9	1,5	1,6	1,0	1,0	1,9	2,8	1,3	1,7	1,4
90	6,0	2,8	3,9	2,6	1,9	3,3	7,9	3,1	3,2	2,5
270	17,5	9,1	13,1	6,5	6,0	12,0	24,5	8,9	10,8	8,6
540	49,4	23,3	33,3	16,6	13,4	25,2	54,2	18,1	23,7	20,6
Bray-1										
	ppm									
0	3,1	0,9	2,7	1,2	1,9	2,1	2,1	2,0	2,7	2,8
10	3,1	1,0	3,1	0,9	2,3	2,0	2,4	2,6	3,4	3,3
30	5,8	1,9	5,4	2,4	2,0	4,0	4,7	4,2	5,0	3,1
90	13,4	3,7	11,8	4,6	4,9	6,7	11,3	8,7	11,8	7,5
270	48,3	16,7	39,4	15,7	12,3	34,9	43,7	25,7	34,6	22,1
540	109,0	42,9	84,5	39,8	46,8	82,3	106,7	53,7	70,2	50,3
Bray-2										
	ppm									
0	4,7	1,1	3,0	1,3	2,1	2,5	2,9	2,5	2,9	3,0
10	4,9	1,1	3,9	1,6	2,3	2,5	3,4	2,9	3,7	3,7
30	8,6	2,3	6,6	2,6	2,7	4,5	5,7	4,6	5,7	3,7
90	18,5	4,6	13,6	5,4	5,7	7,5	13,4	9,4	12,3	8,0
270	56,0	17,1	50,3	18,3	21,3	35,5	46,5	30,8	36,5	24,7
540	144,8	42,3	102,4	55,2	51,9	83,9	116,3	58,9	82,2	62,0

fósforo com o extrator Bray-2, em relação ao Bray-1, ao passo que nos solos SJ-2 e SJ-6 os teores obtidos por ambos os extratores foram semelhantes. Isso faz supor, como sugerido por NEVES (34), que, além das formas P-Al e P-Fe, geralmente predominantes, esses solos devem apresentar maiores teores de P-Ca do que os dos solos SJ-2 e SJ-6. Verifica-se, portanto, que a composição química dos extratores condicionou diferenças nos teores de fósforo recuperados, como resultado da diferença na eficiência em extrair as diferentes formas de fósforo do solo. Entretanto, o valor do fósforo disponível, para um mesmo extrator e dose de fósforo, foi variável entre solos (Quadro 3), refletindo a influência de características dos solos na ação dos extratores. Ao se relacionarem os coeficientes ΔP recuperado/ ΔP aplicado (Quadro 4) com outras características do solo que refletem o fator capacidade, verificaram-se correlações significativas (Quadro 5). A um aumento da capacidade-tampão, avaliada por diferentes parâmetros, correspondeu uma diminuição dos valores de ΔP aplicado, indicando que, à medida que esses valores aumentaram, para uma mesma dose de fósforo aplicada, o fósforo recuperado pelos extratores diminuiu. Como consequência, foi observada correlação positiva com o fósforo remanescente das concentrações de 80 ppm e 30 ppm, usadas nas determinações da capacidade máxima de adsorção de fosfato e poder-tampão de fosfato, respectivamente.

A significância da correlação entre as declividades ΔP recuperado/ ΔP aplicado e a energia de adsorção da isoterma de Langmuir sugere que o fósforo recuperado pelos extratores depende do equilíbrio entre adsorção e dessorção, ou seja, para maiores valores dessa constante, é maior a afinidade de P pelos sítios de adsorção e maior a dificuldade de recuperação do fósforo pelo extrator. As correlações observadas confirmam as proposições de HOLFORD e MATTINGLY (25) e HOLFORD (22), segundo os quais o extrator, de modo semelhante ao sistema radicular da planta, extrairia uma quantidade de fósforo que seria diretamente dependente da quantidade de fósforo lábil, mas inversamente dependente da capacidade-tampão.

3.2. Níveis Críticos de Fósforo no Solo

A produção de matéria seca da parte aérea das plantas, em cada solo, aumentou com a adição de fósforo (Quadro 6). Foram então ajustadas equações de regressão, relacionando matéria seca produzida como variável dependente de doses de fósforo, para cada solo. Foram obtidas equações de regressão quadráticas, com exceção do solo SJ-6, para o qual o melhor modelo foi o linear (Quadro 7). Para os solos em que foram obtidas equações de regressão quadráticas, a partir dos dados dos Quadros 4 e 8, foram estimados os valores dos níveis críticos para a obtenção de 90% da produção máxima estimada, para todos os extratores estudados.

Os níveis críticos nas amostras de solos estudadas foram variáveis, segundo uma ordem crescente de valores, para os extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2 (Quadro 9). Tal sequência, como já abordado, reflete o maior poder de extração dos extratores Bray, graças à possível abundância de formas de fósforo ligadas a alumínio e ferro nesses solos. No entanto, esses valores diferiram entre os solos, variando os níveis críticos de 6 ppm a 25,2 ppm, para o extrator Mehlich-1, de 19,1 ppm a 64,2 ppm, para o Bray-1, e de 22,0 a 78,5 ppm, para o Bray-2. Essas variações nos valores de nível crítico mostram a influência de características dos solos que refletem a capacidade-tampão de fósforo. A análise dos valores dos coeficientes de variação dos níveis críticos (Quadro 9), 44,8%, 39,4% e 41,6%, para os extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2, respectivamente, indica que os extratores foram

QUADRO 4 - Equações de regressão ajustadas entre as concentrações de fósforo disponível nos solos, em ppm, pelos extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2, como variável dependente das doses de fósforo aplicadas, em ppm

Identificação	Solo		Extrator	Equação	R ² (1)
	Classificação				
SJ-1	LV		Mehlich-1 Bray-1 Bray-2	Y = -0.2473 + 0.0865X Y = -0.4955 + 0.1975X Y = -0.6051 + 0.2566X	0.971 0.993 0.982
SJ-2	LV		Mehlich-1 Bray-1 Bray-2	Y = +0.0624 + 0.0411X Y = -0.9602 + 0.0777X Y = -0.9686 + 0.0844X	0.982 0.983 0.976
SJ-3	LV		Mehlich-1 Bray-1 Bray-2	Y = -0.4086 + 0.0598X Y = +0.5988 + 0.1524X Y = +0.7642 + 0.1863X	0.986 0.996 0.997
SJ-4	LRd		Mehlich-1 Bray-1 Bray-2	Y = +0.1640 + 0.0290X Y = -0.3361 + 0.0710X Y = -1.2267 + 0.0976X	0.982 0.984 0.966
SJ-5	LVa		Mehlich-1 Bray-1 Bray-2	Y = +0.4144 + 0.0234X Y = -0.5002 + 0.0821X Y = -0.1263 + 0.0925X	0.989 0.968 0.984
SJ-6	LEa		Mehlich-1 Bray-1 Bray-2	Y = +0.4045 + 0.0452X Y = -1.4766 + 0.1499X Y = -1.0646 + 0.1519X	0.997 0.986 0.986
SJ-7	LE		Mehlich-1 Bray-1 Bray-2	Y = -0.0371 + 0.0984X Y = -1.8136 + 0.1931X Y = -1.3508 + 0.2090X	0.996 0.988 0.986
SJ-8	LEa		Mehlich-1 Bray-1 Bray-2	Y = +0.5850 + 0.0321X Y = +1.1348 + 0.0958X Y = +1.5837 + 0.1053X	0.998 0.998 0.998
SJ-9	LEa		Mehlich-1 Bray-1 Bray-2	Y = +0.2605 + 0.0422X Y = +1.5870 + 0.1258X Y = +0.9765 + 0.1462X	0.994 0.999 0.997
SJ-10	LV		Mehlich-1 Bray-1 Bray-2	Y = +0.1641 + 0.0365X Y = +1.0284 + 0.0883X Y = +0.4999 + 0.1085X	0.986 0.990 0.991

(1) Todos os valores são significativos, ao nível de 1% de probabilidade.

QUADRO 5 - Coeficientes de correlação linear simples entre ΔP recuperado e ΔP aplicado para os extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2 e características do solo

Características do solo	ΔP recuperado/ ΔP aplicado		
	Mehlich-1	Bray-1	Bray-2
C.M.A.F. (1)	-0,740*	-0,767**	-0,806**
PTF(2)	-0,697*	-0,705**	-0,738*
K Freundlich	-0,760**	-0,791**	-0,758**
Energia de Adsorção (3)	-0,646*	-0,702*	-0,627*
P-Ceq. 30 (4)	0,681*	0,755**	0,830**
P-Ceq. 80 (5)	0,721*	0,775**	0,837**

1 - Capacidade máxima de adsorção de fósforo, expressa em $\mu\text{gP/g}$ solo.

2 - Poder-tampão de fósforo, expresso em moles de $\text{P} \cdot 10^{-8}/\text{g}$ solo/unidade potencial de fosfato.

3 - Expressa em $(\mu\text{gP/g solo})^{-1}$.

4 - Concentração de fósforo em solução, em ppm, após agitação de 30 ppm de P, na relação solo: solução de 1:10, por 1 hora, com as amostras de solo.

5 - Concentração de fósforo em solução, em ppm, após agitação de 80 ppm de P, na relação solo: solução de 1:10, por 24 horas, com as amostras de solo.

* Significativo, ao nível de 5% de probabilidade.

** Significativo, ao nível de 1% de probabilidade.

(15)

semelhantes na sensibilidade à capacidade-tampão. Da mesma forma, diferenças de nível crítico entre solos, decorrentes do efeito da capacidade-tampão, foram também verificadas por BAHIA FILHO (2) e NEVES (34), que observaram que, quanto maior a sensibilidade do extrator à capacidade-tampão, maior a variação de níveis críticos, ao contrário do verificado por HOLFORD (22).

Para avaliar a capacidade-tampão de fósforo do solo, várias medidas foram propostas: PBC — «phosphate buffering capacity» (7) DPBC — *differential phosphate buffering capacity* (28) e CTM — capacidade-tampão máxima (11, 24). Correlações significativas entre algumas características do solo, como teor de argila (3, 38), equivalente de umidade, capacidade de campo e coeficiente ΔP recuperado/ ΔP adicionado, e valores de PBC indicam serem esses parâmetros bons índices desse fator (38).

Com o objetivo de verificar o relacionamento entre os níveis críticos de fósforo, pelos extratores utilizados, e várias características, de natureza física e química, do solo que, supostamente, refletem o fator capacidade, foram ajustadas equações de regressão, relacionando os valores de níveis críticos, como variável dependente desses parâmetros, e determinados os coeficientes de correlação (Quadro 10). Com exceção do teor de argila, as demais características físicas e químicas consideradas correlacionaram-se significativamente com os níveis crí-

QUADRO 6 - Produção de matéria seca da parte aérea de plantas de soja nos diferentes solos e doses de fósforo aplicadas

Solo		Doses de P, em pp2m (kg/ha)					
Identificação	Classificação	0	10	30	90	270	540
Produção de matéria seca							
		g/vaso					
SJ-1	LV	5,38	6,36	8,13	11,45	17,06	18,89
SJ-2	LV	3,31	3,54	5,00	7,81	11,78	16,77
SJ-3	LV	2,89	4,13	6,00	8,05	13,55	18,77
SJ-4	LRd	3,32	3,62	5,67	7,69	11,59	14,67
SJ-5	LVa	4,07	5,67	8,94	14,45	17,12	17,94
SJ-6	LEa	2,43	2,65	3,16	4,59	12,36	22,57
SJ-7	LE	2,96	4,37	6,73	10,05	13,56	14,67
SJ-8	LEa	3,35	5,00	6,17	7,87	11,31	14,87
SJ-9	LEa	3,85	4,94	6,79	10,79	15,54	19,85
SJ-10	LV	3,87	5,05	8,75	12,54	15,34	17,89

QUADRO 7 - Equações de regressão ajustadas entre produção de matéria seca da parte aérea de plantas de soja, em g/vaso, como variável dependente das doses de fósforo aplicadas, em pp^2m (kg/ha) de P

Solo		Equações	R ²
Identificação	Classificação		
SJ-1	LV	Y = 5,91 + 0,0616X - 0,0000699X ²	0,994**
SJ-2	LV	Y = 3,58 + 0,0402X - 0,0000295X ²	0,991**
SJ-3	LV	Y = 3,73 + 0,0477X - 0,0000370X ²	0,990**
SJ-4	LRd	Y = 3,74 + 0,0412X - 0,0000391X ²	0,986**
SJ-5	LVa	Y = 5,73 + 0,0750X - 0,0000982X ²	0,915**
SJ-6	LEa	Y = 2,02 + 0,0379X	0,997**
SJ-7	LE	Y = 4,15 + 0,0573X - 0,0000706X ²	0,957**
SJ-8	LEa	Y = 4,43 + 0,0351X - 0,0000296X ²	0,976**
SJ-9	LEa	Y = 4,65 + 0,0587X - 0,0000571X ²	0,983**
SJ-10	LV	Y = 5,43 + 0,0616X - 0,0000724X ²	0,921**

** Significativo, ao nível de 1% de probabilidade. Todos os coeficientes lineares e quadráticos das equações são significativos, ao nível de 5% de probabilidade.

QUADRO 8 - Doses de fósforo estimadas para proporcionar 90% da produção máxima de matéria seca da parte aérea de soja

Solo		Matéria seca g/vaso	Dose de fósforo pp ² m (kg/ha) de P
Identificação	Classificação		
SJ-1	LV	17,52	274
SJ-2	LV	15,54	439
SJ-3	LV	17,18	417
SJ-4	LRd	13,14	334
SJ-5	LVa	18,05	239
SJ-6	LEa	(1)	(1)
SJ-7	LE	14,20	256
SJ-8	LE	13,37	370
SJ-9	LEa	17,77	328
SJ-10	LV	16,68	265

(1) O modelo quadrático não se ajustou significativamente aos dados.

ticos de fósforo no solo, pelos extratores estudados. Apesar de significativa, a correlação verificada entre percentagem de argila e capacidade máxima de adsorção de fósforo e poder-tampão de fósforo (Quadro 11), não foi significativa, em relação aos valores de nível crítico. Esse resultado indica que, nesse relacionamento, os parâmetros que refletem também a qualidade da argila são mais importantes. Tal idéia concorda com a observação, de HOLFORD (20), de que, embora possa haver amplo relacionamento entre capacidade de adsorção e textura, variando amplamente em suas características, a mais importante propriedade do solo é a natureza e extensão da superfície de adsorção do mineral dominante. Nesse mesmo contexto, BAHIA FILHO (2) verificou que a goethita foi o principal componente da fração argila responsável pelas variações observadas na capacidade-tampão máxima e na adsorção máxima de fósforo.

A correlação significativa observada entre os valores de níveis críticos estimados, para os extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2, e a percentagem de argila, estimada por meio da 7.^a Aproximação (45), que considera a superfície adsorvente refletida pela água retida à tensão de 15 bares, constitui mais um indicativo de que é importante considerar a qualidade da fração argila. Da mesma forma, constituem evidências desse fato as correlações significativas com parâmetros de retenção de água no solo, como capacidade de campo, equivalente de umidade e água retida a diferentes tensões, parâmetros que refletem a superfície de adsorção disponível (2). As altamente significativas correlações observadas quando as características de natureza físico-química que refletem a capacidade-tampão (Quadro 10) foram utilizadas indicam a importância desse fator para a compreensão dos mecanismos de disponibilidade de fósforo, avaliada por meio de extratores químicos,

QUADRO 9 - Níveis críticos de fósforo nas amostras dos solos, pelos extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2, para a obtenção de 90% da produção máxima estimada, e respectivos coeficientes de variação dos níveis críticos, para cada extrator

Solo		Extrator		
Identificação	Classificação	Mehlich-1,	Bray-1	Bray-2
		ppm P		
SJ-1	LV	23,5	53,5	69,6
SJ-2	LV	18,1	33,2	36,1
SJ-3	LV	24,5	64,2	78,5
SJ-4	LRd	9,9	23,4	31,4
SJ-5	LVa	6,0	19,1	22,0
SJ-6	LEa	*	*	*
SJ-7	LE	25,2	47,7	52,3
SJ-8	LEa	12,4	36,5	40,5
SJ-9	LEa	14,2	42,9	49,0
SJ-10	LV	9,8	24,5	29,3
CV (%)		44,8	39,4	41,6

* O modelo quadrático não se ajustou significativamente aos dados.

fato também observado em outros estudos (2, 13, 18, 20, 21, 22, 24, 34, 36). A significância da correlação entre os níveis críticos e a energia de adsorção da isoterma de Langmuir, que representa a constante de equilíbrio adsorção/dessorção da superfície das partículas do solo (23, 26), e a correlação com a constante K de Freundlich sugerem que a ação dos extratores foi influenciada pela natureza da superfície de adsorção. Assim, tem-se que, com o aumento da capacidade-tampão, houve uma tendência de diminuição dos teores de fósforo recuperados pelos extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2, o que demonstra que são sensíveis à capacidade-tampão. BAHIA FILHO (2), ao explicar a sensibilidade dos extratores Mehlich-1 e Bray-1 à capacidade-tampão de fósforo do solo, propôs que ela seria devida à exaustão dos extratores químicos pela goethita, componente responsável pelas variações observadas na capacidade-tampão dos solos por ele estudados. Essa sensibilidade seria consequência do desgaste ou consumo dos extratores, em razão da redução da sua concentração ácida pela protonação da superfície de óxidos hidratados de ferro e alumínio, que podem adsorver os ânions SO_4^{2-} e F^- ou mesmo readsorver o fósforo extraído. Esse mesmo autor observou ainda que o extrator Mehlich-1 foi mais sensível do que o extrator Bray-1. Maiores quantidades de P-não lábil foram extraídas pelo Bray-1, caracterizando sua menor sensibilidade, quando comparado com o Mehlich-1.

Assim, por meio das equações que relacionam os níveis críticos com as carac-

QUADRO 10 - Equações de regressão ajustadas entre os níveis críticos, em ppm, de P, pelos extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2, como variável dependente de características físicas e químicas das amostras dos solos

Características	Extrator	Equação	Coefficiente de correlação - r
Argila (%)	Mehlich-1	$\hat{Y} = 22,7025 - 0,177553X$	-0,474 ^{n.s}
	Bray-1	$\hat{Y} = 49,3934 - 0,291055X$	-0,368 ^{n.s}
	Bray-2	$\hat{Y} = 61,8090 - 0,428307X$	-0,435 ^{n.s}
Argila (%) (⁷ a aproximação)	Mehlich-1	$\hat{Y} = 25,7727 - 0,240095X$	-0,835*
	Bray-1	$\hat{Y} = 56,0206 - 0,432570X$	-0,542 ^{n.s}
	Bray-2	$\hat{Y} = 69,1893 - 0,578545X$	-0,582*
Capacidade de campo (%)	Mehlich-1	$\hat{Y} = 35,6905 - 0,797550X$	-0,753**
	Bray-1	$\hat{Y} = 74,7839 - 1,473079X$	-0,659*
	Bray-2	$\hat{Y} = 92,7379 - 1,908490X$	-0,686*
Equivalente de unidade (%)	Mehlich-1	$\hat{Y} = 32,2628 - 0,797637X$	-0,780**
	Bray-1	$\hat{Y} = 68,4796 - 1,474548X$	-0,684*
	Bray-2	$\hat{Y} = 84,6664 - 1,914120X$	-0,713*
Água retida -1/10 bar (%)	Mehlich-1	$\hat{Y} = 32,6199 - 0,920020X$	-0,822**
	Bray-1	$\hat{Y} = 79,4697 - 1,748835X$	-0,740*
	Bray-2	$\hat{Y} = 98,5557 - 2,254143X$	-0,765**
Água retida -1/3 bar (%)	Mehlich-1	$\hat{Y} = 30,1036 - 0,698090X$	-0,760*
	Bray-1	$\hat{Y} = 63,8287 - 1,257997X$	-0,694*
	Bray-2	$\hat{Y} = 78,8182 - 1,642350X$	-0,680*
Água retida -15 bars (%)	Mehlich-1	$\hat{Y} = 27,9399 - 0,793061X$	-0,751**
	Bray-1	$\hat{Y} = 59,9903 - 1,433484X$	-0,643*
	Bray-2	$\hat{Y} = 73,6195 - 1,858648X$	-0,670*
CMAF (1)	Mehlich-1	$\hat{Y} = 36,5604 - 26,747913X$	-0,873**
	Bray-1	$\hat{Y} = 80,6753 - 54,965753X$	-0,851**
	Bray-2	$\hat{Y} = 100,1997 - 70,964653X$	-0,882**
Energia de adsorção (2)	Mehlich-1	$\hat{Y} = 21,1587 - 1,957690X$	-0,737*
	Bray-1	$\hat{Y} = 49,5423 - 4,217426X$	-0,752**
	Bray-2	$\hat{Y} = 57,8093 - 4,618899X$	-0,662*
PTF (3)	Mehlich-1	$\hat{Y} = 35,5850 - 0,049224X$	-0,825**
	Bray-1	$\hat{Y} = 76,6627 - 0,096117X$	-0,764**
	Bray-2	$\hat{Y} = 94,5387 - 0,123889X$	-0,784**
K Freundlich	Mehlich-1	$\hat{Y} = 28,0084 - 28,531150X$	-0,898**
	Bray-1	$\hat{Y} = 63,1908 - 58,842092X$	-0,828**
	Bray-2	$\hat{Y} = 74,9236 - 69,571963X$	-0,833**

continua...

Continuação

Características	Extrator	Equação	Coefficiente de correlação-r
P-concentração de equilíbrio-50 ⁽⁴⁾	Mehlich-1	$\hat{Y} = 11,0166 + 0,954976X$	0,775**
	Bray-1	$\hat{Y} = 27,4249 + 2,109211X$	0,812**
	Bray-2	$\hat{Y} = 30,9045 + 2,828580X$	0,874**
P-concentração de equilíbrio-80 ⁽⁵⁾	Mehlich-1	$\hat{Y} = 10,8624 + 0,359434X$	0,829**
	Bray-1	$\hat{Y} = 27,4356 + 0,769223X$	0,841**
	Bray-2	$\hat{Y} = 31,1256 + 1,016793X$	0,893**
P-concentração de equilíbrio-100 ⁽⁵⁾	Mehlich-1	$\hat{Y} = 9,3884 + 0,272167X$	0,874**
	Bray-1	$\hat{Y} = 24,6871 + 0,56552X$	0,861**
	Bray-2	$\hat{Y} = 27,7045 + 0,753850X$	0,892**
ΔP recuperado/ ΔP aplicado (kg/ha)	Mehlich-1	$\hat{Y} = 3,9243 + 240,999511X$	0,888**
	Bray-1	$\hat{Y} = 8,3951 + 248,633230X$	0,817**
	Bray-2	$\hat{Y} = 8,5056 + 258,425440X$	0,839**

1 - Capacidade máxima de adsorção de fósforo, expressa em mgP/g solo.

2 - Expressa em (µgP/g solo)⁻¹.3 - Poder-tampão de fósforo, expresso em moles de $P \cdot 10^{-8}$ /g solo/unidade potencial de fosfato.

4 - Concentração de fósforo em solução, em ppm, após agitação de 30 ppm de P, na relação solo: solução de 1:10, por 1 hora, com as amostras de solo.

5 - Concentração de fósforo em solução, em ppm, após agitação de 80 e 100 ppm de P, na relação solo: solução de 1:10, por 24 horas, com as amostras de solo.

* Significativo, ao nível de 5% de probabilidade.

** Significativo, ao nível de 1% de probabilidade.

n.s. Valor não-significativo.

QUADRO 11 - Coeficientes de correlação linear simples⁽¹⁾ entre a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAF), o poder-tampão de fósforo (PTF) e características do solo que refletem o fator capacidade

	CMAF ⁽²⁾	PTF ⁽³⁾
Energia de adsorção ⁽⁴⁾	0,698*	0,738*
K Freundlich	0,911**	0,921**
P-concentração de equilíbrio-30 ⁽⁵⁾	-0,974**	-0,940**
Concentração de equilíbrio-80 ⁽⁶⁾	-0,990**	-0,953**
Concentração de equilíbrio-100 ⁽⁶⁾	-0,999**	-0,974**
Argila (%)	0,710*	0,741*
Argila-7ª aproximação (%)	0,844**	0,881**
Capacidade de campo (%)	0,884**	0,893**
Equivalente de umidade (%)	0,922**	0,941**
Água retida 1/10 bar (%)	0,927**	0,922**
Água retida -1/3 bar (%)	0,911**	0,931**

1 - Foram correlacionadas características somente para os solos em que foram obtidos os níveis críticos.

2 - Expressa em mgP/g solo.

3 - Expresso em moles de $P \cdot 10^{-8}$ /g solo/unidade potencial de fósforo.

4 - Expressa em $(\mu\text{gP/g solo})^{-1}$.

5 - Concentração de fósforo em solução, em ppm, após agitação de 30 ppm de P, na relação solo: solução de 1:10, por 1 hora, com as amostras de solo.

6 - Concentração de fósforo em solução, em ppm, após agitação de 80 e 100 ppm de P, na relação solo: solução de 1:10, por 24 horas, com as amostras de solo.

* Significativo, ao nível de 5% de probabilidade.

** Significativo, ao nível de 1% de probabilidade.

terísticas físicas e químicas dos solos (Quadro 10), foram estimados os valores de níveis críticos de fósforo no solo, considerando diferentes valores para algumas dessas características (Quadro 12).

3.3. Recomendação de Adubação. Uso de Parâmetros do «Fator Capacidade» e do «Nível de Fósforo» do Solo

A sensibilidade dos extratores ao fator capacidade indica a necessidade de se conhecerem parâmetros relativos a este fator, além do fósforo disponível, uma estimativa do fator quantidade, como critério de recomendação de adubação fosfatada (36).

Por meio do relacionamento entre os níveis críticos e as características do solo que refletem o fator capacidade e do conhecimento do nível de fósforo no solo, pode-se estimar a necessidade de fertilizante solúvel de um solo para o crescimento de determinada cultura.

QUADRO 12 - Níveis críticos de fósforo no solo, em ppm, estimados em função da variação dos valores de características das amostras de solo para a obtenção de 90% da produção máxima de matéria seca da parte aérea de plantas de soja, pelos extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2

Extrator	Características						
	Equivalente unidade (%)						
	35	30	25	20	15	10	5
Mehlich-1	4,3	8,3	12,3	16,3	20,3	24,3	28,3
Bray-1	16,9	24,2	31,9	39,0	46,4	53,7	61,1
Bray-2	17,7	27,2	36,8	46,4	55,9	65,5	75,1
	Água retida a -1/10 bar (%)						
	30	26	22	18	14	10	8
Mehlich-1	5,0	8,7	12,4	17,4	19,7	23,4	25,2
Bray-1	27,0	34,0	41,0	48,0	55,0	62,0	65,5
Bray-2	30,9	40,0	49,0	58,0	67,0	76,0	80,5
	P-concentração de equilíbrio-30 ⁽¹⁾ (ppm)						
	0,5	2,0	5,0	9,0	13,0	15,0	17,0
Mehlich-1	11,5	13,0	15,8	19,6	23,4	25,3	27,3
Bray-1	28,5	31,6	38,0	46,4	54,8	59,1	63,3
Bray-2	32,3	36,6	45,0	56,4	67,7	73,3	79,0
	P-concentração de equilíbrio-100 ⁽²⁾ (ppm)						
	2,0	11,0	14,0	26,0	40,0	54,0	66,0
Mehlich-1	9,9	11,0	13,2	16,5	20,3	24,1	27,4
Bray-1	25,8	28,1	32,6	39,3	47,2	55,1	61,8
Bray-2	29,4	32,3	38,2	46,9	57,1	67,3	76,0
	Adsorção máxima de P (mg/g solo)						
	1,00	0,90	0,75	0,60	0,45	0,30	0,15
Mehlich-1	9,8	12,5	16,5	20,5	24,5	28,5	32,5
Bray-1	25,7	31,2	39,5	47,7	55,9	64,2	72,4
Bray-2	29,2	36,3	47,0	57,6	68,3	78,9	89,6

1 - Concentração de fósforo em solução, em ppm, após agitação de 30 ppm de P, na relação solo: solução de 1:10, por 1 hora, com as amostras dos solos.

2 - Concentração de fósforo em solução, em ppm, após agitação de 100 ppm de P, na relação solo: solução de 1:10, por 24 horas, com as amostras dos solos.

QUADRO 13 - Equações de regressão ajustadas entre os coeficientes angulares das equações ajustadas entre fósforo adicionado às amostras de solo, em pp2m (kg/ha) e fósforo recuperado (ppm), pelo extrator Mehlich-1, P-concentração de equilíbrio-30 e 100

Concentração	Extrator	Equação	r
P-concentração de equilíbrio 30 (1)	Mehlich-1	$\hat{Y} = 0,0339 + 0,003092x$	0,681*
	Bray-1	$\hat{Y} = 0,0871 + 0,006444x$	0,755**
	Bray-2	$\hat{Y} = 0,0978 + 0,008721x$	0,830**
P-concentração de equilíbrio 100 (2)	Mehlich-1	$\hat{Y} = 0,0294 + 0,000850x$	0,741*
	Bray-1	$\hat{Y} = 0,0789 + 0,001695x$	0,778**
	Bray-2	$\hat{Y} = 0,0907 + 0,002164x$	0,814**

1 - Concentração de fósforo em solução, em ppm, após agitação de 30 ppm de P, na relação solo: solução de 1:10, por 1 hora, com as amostras dos solos.

2 - Concentração de fósforo em solução, em ppm, após agitação de 100 ppm de P, na relação solo: solução de 1:10, por 24 horas com as amostras dos solos.

* Valor significativo, ao nível de 5% de probabilidade.

** Valor significativo, ao nível de 1% de probabilidade.

A estimativa da quantidade de fertilizante a ser recomendada é obtida mediante a divisão da diferença entre o nível crítico e o P-disponível de um solo pelo coeficiente angular, que expressa a relação entre ΔP recuperado e ΔP aplicado, para cada extrator, estimado a partir das equações de regressão indicadas no Quadro 13. Conhecendo o nível crítico, conforme «P-concentração de equilíbrio 30 e 100» (Quadro 12), e o nível de P-disponível no solo e de posse dos coeficientes lineares estimados (Quadro 14), avaliaram-se as quantidades de fósforo por aplicar para atingir o nível crítico, pelo extrator Mehlich-1 (Quadro 15). Procedimento semelhante foi adotado por FONTES (17), para enxofre, com base no equivalente de unidade; por FREIRE *et alii* (18), BAHIA FILHO (2) e NEVES (34), para fósforo, a partir dos teores de argila, goethita e «P-concentração de equilíbrio-30», respectivamente. Em princípio, todas as características que refletem o fator capacidade, que influencia a estimativa do P-disponível, podem ser utilizadas na estimativa da necessidade de fertilização para outros solos. Entretanto, são mais indicados os parâmetros que melhor expressam a natureza e a extensão da superfície adsorvente e que mais facilmente são determinados e adaptados às condições de laboratório de rotina. O fósforo na concentração de equilíbrio parece constituir um bom parâmetro, haja vista que satisfaz essas condições e foi, segundo NOVAIS (35), DELAZARI (13) e NEVES (34), uma boa medida do fator capacidade.

Considerando os teores de P-disponível no solo, em termos absolutos, verifica-se que, para um mesmo teor inicial, as quantidades recomendadas diferiram entre solos e, naturalmente, entre teores num mesmo solo. Em ambas as situações, essas quantidades foram semelhantes, para os três extratores. Essa situação é

QUADRO 14 - Valores dos coeficientes angulares estimados das equações lineares ajustadas entre fósforo recuperado, em ppm, pelos extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2, e fósforo adicionado às amostras de solo, em ppm (kg/ha) de P, conforme a variação dos valores de concentração de equilíbrio-30 e 100

Extrator	Característica							
	P-concentração de equilíbrio-30 (1) (ppm)							
	0,5	2,0	5,0	9,0	13,0	15,0	17,0	
Mehlich-1	0,035446	0,040084	0,049360	0,061728	0,074096	0,080280	0,086460	
Bray-1	0,090322	0,099988	0,119320	0,145096	0,170872	0,183760	0,196648	
Bray-2	0,102161	0,115242	0,141405	0,176289	0,211173	0,228615	0,246037	
	P-concentração de equilíbrio-100 (2) (ppm)							
	2,0	6,0	14,0	26,0	40,0	54,0	66,0	
Mehlich-1	0,031100	0,034500	0,041300	0,051500	0,063400	0,075300	0,085500	
Bray-1	0,082290	0,089070	0,102630	0,122970	0,146700	0,170430	0,190770	
Bray-2	0,095028	0,103684	0,120996	0,146964	0,177260	0,207556	0,235524	

1 - Concentração de fósforo em solução, em ppm, após agitação de 30 ppm de P, na relação solo: solução de 1:10, por 1 hora, com as amostras dos solos.

2 - Concentração de fósforo em solução, em ppm, após agitação de 100 ppm de P, na relação solo: solução de 1:10, por 24 horas, com as amostras dos solos.

QUADRO 15 - Quantidade necessária de fósforo para que seja atingido o nível crítico desse elemento no solo (90% da produção máxima de matéria seca da parte aérea de soja), pelo extrator Mehlich-1, conforme "p-concentração de equilíbrio-30" e a relação percentual entre o teor de fósforo disponível no solo e o nível crítico desse elemento

"P-concentração de equilíbrio- 30"(l)	Nível crítico	Fósforo "disponível"/nível crítico (%)							
		0	5	10	15	20	40	60	90
— ppm —		pp2m (kg/ha) de P —							
0,5	11,5	324	308	291	276	260	195	130	65
2,0	13,0	324	308	292	276	259	195	130	65
5,0	15,8	320	304	288	272	256	192	128	64
9,0	19,6	318	302	286	270	254	191	127	64
13,0	23,4	316	300	284	268	253	189	126	63
15,0	25,3	315	299	284	268	252	189	126	63
17,0	27,3	316	300	284	268	253	189	126	63

1 - Concentração de fósforo em solução, em ppm, após agitação de 30 ppm de P, na relação solo: solução de 1:10, por 1 hora, com as amostras de solo.

exemplificada para o Mehlich-1 (Quadro 16). Para um mesmo valor de capacidade-tampão, a um aumento do P-disponível no solo correspondeu uma diminuição das quantidades recomendadas. Entretanto, considerando diferentes solos, com capacidade-tampão variável, têm-se duas situações. Para teores de P-disponível próximos de 1 ppm, as quantidades a serem recomendadas foram semelhantes e para maiores teores variaram inversamente à capacidade-tampão. FREIRE *et alii* (18) observaram que há dois fatores de efeitos opostos sobre as quantidades de fertilizante recomendadas: com o aumento da capacidade-tampão, decresce o nível crítico e aumenta a quantidade de P requerida para elevar em 1 ppm o P recuperado pelo extrator. Essas quantidades seriam muito maiores nos solos com maior capacidade-tampão. Entretanto, para teores iguais de P-disponível, o fator quantidade é maior no solo com maior capacidade-tampão. Ainda, se se considerar um único nível a ser atingido em dois ou mais solos com diferença na capacidade-tampão, a partir do teor inicial, as quantidades recomendadas seriam diretamente proporcionais à capacidade-tampão.

No entanto, utilizando um parâmetro relativo à percentagem de P-disponível, em relação ao nível crítico, verifica-se que as quantidades de P recomendadas foram semelhantes, na mesma relação, nos diferentes solos (Quadro 15). BAHIA FILHO (2), utilizando esse mesmo parâmetro relativo de P-disponível no solo e as quantidades de fósforo absorvido necessárias para a exaustão de todo o fósforo disponível, observou que, para uma mesma percentagem de fósforo disponível, em relação ao nível crítico, as quantidades recomendadas aumentaram de acordo com o fator capacidade, avaliado pelo teor de goethita. Entretanto, esse autor observou a ocorrência de histerese entre as quantidades de fósforo adicionadas e fósforo absorvido, histerese que foi considerada no cálculo das quantidades de fósforo recomendadas. Tal fato, como argumenta NEVES (34), explica as diferenças observadas tanto no seu como neste trabalho, em relação ao de BAHIA FILHO (2).

4. RESUMO E CONCLUSÕES

Constituiu objetivo deste trabalho determinar os níveis críticos de fósforo para a cultura da soja, em diferentes solos, mediante o uso dos extratores Mehlich-1, Bray-1 e Bray-2, e avaliar a influência de parâmetros do solo sobre os valores desses níveis e sobre a recomendação de adubação fosfatada. Amostras de 10 latossolos foram submetidas a análises físicas e químicas. Feita a calagem, receberam seis doses de fósforo, na forma de $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, correspondentes a 0, 10, 30, 90, 270 e 540 pp2m de fósforo. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, cultivando-se, durante 45 dias, quatro plantas de soja em cada vaso. Para cada solo em que houve resposta quadrática dos dados de produção de matéria seca às doses de fósforo adicionadas, estimaram-se os níveis críticos de fósforo, por meio dos extratores testados. Os teores de fósforo recuperados e os níveis críticos estimados variaram conforme os solos e extratores, sendo maiores para o extrator Bray-2, seguido de Bray-1 e Mehlich-1. Os níveis críticos de fósforo no solo obtidos com o uso de cada extrator diminuíram com o aumento do fator capacidade, avaliado com base nas características físicas e químicas das amostras dos solos estudados. É apresentada uma tabela de recomendação de adubação.

QUADRO 16 - Quantidade necessária de fósforo para que seja atingido o nível crítico desse elemento no solo (90% da produção máxima de matéria seca da parte aérea de soja), pelo extrator Mehlich-1, "P-concentração de equilíbrio-30", e os teores de fósforo disponível, expressos pela análise de solo

"P-concentração de equilíbrio-30" (l/crítico)	P-disponível (ppm)										pp2m (kg/ha) de P							
	0	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28		
0,5	324	296	268	213	155	99	41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2,0	324	299	274	225	175	125	75	25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5,0	320	300	280	239	199	158	118	77	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9,0	318	301	285	253	220	188	156	123	91	58	26	-	-	-	-	-	-	-
13,0	316	302	289	260	235	208	181	154	127	100	73	46	19	-	-	-	-	-
15,0	315	308	290	265	240	215	191	166	141	116	91	66	41	16	5	-	-	-
17,0	316	304	293	269	246	223	200	177	154	131	108	84	61	38	15	-	-	-

1 - Concentração de fósforo em solução, em ppm, após agitação de 30 ppm de P, na relação solo: solução de 1:10, por 1 hora, com as anostas de solo.

5. SUMMARY

(PHOSPHORUS AVAILABILITY AND FERTILIZER RECOMMENDATION EVALUATED BY EXTRACTANT SOLUTIONS AND BY THE GROWTH OF SOYBEAN IN SOIL SAMPLES WITH DIFFERENT VALUES OF THE CAPACITY FACTOR)

The aim of this study was to determine critical levels of soil phosphorus for the growth of soybean through the use of Mehlich-1, Bray-1, and Bray-2 extracts, and to evaluate the effect of soil parameters on the values of these levels and on the phosphorus fertilization recommendation. Samples of ten Latosolos were submitted to chemical and physical analysis. After liming, they received six doses of phosphorus in the form of $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, corresponding to 0, 10, 30, 90, 270, and 540 pp^2m of P. The experiment was carried out under greenhouse conditions, for 45 days, with four plants in each pot. For those soils with quadratic response of the dry matter yield to the doses of phosphorus applied, the critical levels of phosphorus were determined by means of the extracts tested. The indications of soil phosphorus content and the estimated critical levels varied according to the soils and extracts, and were higher for the Bray-2 extract, followed by Bray-1 and Mehlich-2. The soil phosphorus critical level obtained through the use of each extract decreased with the increase of the capacity factor, the evaluation of which was based on physical and chemical characteristics of the soil samples studied. A table of phosphorus fertilizer recommendation is presented with this study.

6. LITERATURA CITADA

1. ASSIS, V.L.G. & RAMOS, M. *Relação entre a extração de fósforo do solo pelo trigo (Triticum aestivum, L.) e a extração por quatro métodos químicos, em Latossolo Vermelho-Escuro da região de Campos Gerais, no Paraná.* EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Trigo, Passo Fundo, 1973. (Bol. téc. 02).
2. BAHIA FILHO, A.F.C. *Índices de disponibilidade de fósforo em Latossolos do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas.* Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1982. 178p. (Tese D.S.).
3. BAHIA FILHO, A.F.C. & BRAGA, J.M. Fósforo em Latossolos do Estado de Minas Gerais. I. Intensidade e capacidade-tampão de fósforo. *Experientiae*, 19: 18-32. 1975.
4. BAHIA FILHO, A.F.C. & BRAGA, J.M. Fósforo em Latossolos do Estado de Minas Gerais. II. Quantidade de fósforo «disponível». *Rev. Ceres*, 22:50-61. 1975.
5. BALERDI, F.; MULLER, L. & FASSBENDER, H.W. Estudio del fósforo en suelos de América Central. III. Comparación de cinco métodos de análisis de fósforo disponible. *Turrialba*, 18:348-360, 1968.
6. BECKETT, P.H.T. & WHITE, R.E. Studies on phosphate potentials of soils. Part III. The pool of labile inorganic phosphate. *Plant and Soil*, 21:253-282, 1964.

7. BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Relação entre formas de fósforo inorgânico, fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação de cerrado: I. Trabalhos de laboratório. *Rev. Ceres*, 19:124-136, 1972.
8. BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Relação entre formas de fósforo inorgânico, fósforo disponível e material vegetal em solos sob vegetação de cerrado: II. Trabalhos em estufa. *Rev. Ceres*, 19:248-260, 1972.
9. CHANG, S.C. & JUO, S.R. Available phosphorus in relation to forms of phosphate in soils. *Soil Science*, 95:91-96, 1963.
10. COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 3.ª aproximação*. Belo Horizonte, EPAMIG, 1978. 80p.
11. DALAL, R.C. & HALLSWORTH, E.G. Evaluation of the parameters of soil phosphorus availability factors in predicting yield response and phosphorus uptake. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40:541-546, 1976.
12. DELAZARI, P.C.; BRAGA, J.M.; NOVAIS, R.F. & THIÉBAUT, J.T.L. Disponibilidade de fósforo em solos do Estado do Espírito Santo. *R. Bras. Ci. Solo*, 4: 149-153, 1980.
13. DELAZARI, P.C. *Disponibilidade de fósforo em solos do Estado do Espírito Santo*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1979. 42p. (Tese M.S.).
14. EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Manual de métodos de análises de solo*. Rio de Janeiro, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1979. (s.n.p.).
15. FARIA, C.M.B.; BRAGA, J.M. & PINTO, O.C.B. Sorção de fósforo em cinco solos de Minas Gerais: influência de alguns fatores. *Rev. Ceres*, 23:166-179, 1976.
16. FERNANDES, B. *Retenção e movimento de água no solo*. Viçosa. Universidade Federal de Viçosa, 1967. 48 p. (Tese M.S.).
17. FONTES, M.P.F. *Disponibilidade do enxofre em diferentes extratores químicos em alguns Latossolos do Estado de Minas Gerais*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. 1979. 63p. (Tese M.S.).
18. FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F.; BRAGA, J.M.; FRANÇA, G.E.; 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*, 3:105-111, 1979.
19. GUNARY, D. & SUTTON, G.D. Soil factors affecting plant uptake of phosphate. *J. Soil Sci.*, 18:167-173, 1967.
20. HOLFORD, I.C.R. Effects of phosphate buffer capacity of soil on the phosphate requirements of plants. *Plant and Soil*, 45:433-444, 1976.

21. HOLFORD, I.C.R. Greenhouse evaluation of four phosphorus soils tests in relation to phosphate buffering and labile phosphate in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:555-559, 1980.
22. HOLFORD, I.C.R. Effects of phosphate buffer capacity on critical levels and relationships between soil tests and labile phosphate in wheat-growing soils. *Aust. J. Soil. Res.*, 18:405-414, 1980.
23. HOLFORD, I.C.R. & MATTINGLY, G.E.G. A model for the behaviour of labile phosphate in soil. *Plant and soil*, 44:219-229, 1975.
24. HOLFORD, I.C.R. & MATTINGLY, G.E.G. Phosphate adsorption and plant availability of phosphate. *Plant and Soil*, 44:377-389, 1976.
25. HOLFORD, I.C.R. & MATTINGLY, G.E.G. Effects of phosphate buffering on the extraction of labile by plants and by soils tests. *Austr. J. Soil Res.* 17:511-514, 1979.
26. HOLFORD, I.C.R.; WEDDWEBURN, R.W.M. & MATTINGLY, G.E.G. A Langmuir two surface equation as model for phosphate adsorption by soils. *J. Soil Sci.*, 25:242-255, 1974.
27. JENSEN, H.E. Phosphate potencial and phosphate capacity of soils. *Plant and Soil*, 33:17-29, 1970.
28. KAMPRATH, E.J. & WATSON, M.E. Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C. & KAMPRATH, E.J. *The Role of Phosphorus in Agriculture*. Madison, American Society of Agronomy, 1980. p. 433-469.
29. KHASAWNEH, F.E. Solution ion activity and plant growth. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35:426-436, 1971.
30. LARSEN, S. Soil phosphorus. *Adv. Agron.*, 19:151-211, 1967.
31. LEE, Y.S. & BARTLEY, R.J. Assessing phosphorus fertilizer needs on intensity — capacity relationships. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41:710-712, 1977.
32. LOPES, A.S. & COX, F.R. Relação de características físicas e mineralógicas com fixação de fósforo em solos sob cerrados. *R. Bras. Ci.Solo*, 3:82-88, 1979.
33. MARTENS, D.C.; LUTZ, J.A. & JONES, G.D. Form and availability of P in selected Virginia soils as rested to available P tests. *Agron. J.*, 61:616-621, 1969.
34. NEVES, J.C.L. *Aspectos nutricionais em mudas de Eucalyptus spp. — tolerância ao alumínio e níveis críticos de fósforo no solo*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1983. 87p. (Tese M.S.).
35. NOVAIS, R.F. *Phosphorus supplying capacity of proviously heavily fertilized soils*. Raleigh, North Carolina State University, 1977. 153 p. (Ph.D. Thesis).

36. NOVAIS, R.F. & KAMPRATH, E.J. Phosphorus supplying capacities of previously heavily fertilized soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 42:931-935. 1978.
37. NOVAIS, R.F. KAMPRATH, E.J. Parâmetros das isotermas de adsorção de fósforo como critério de recomendação de adubação fosfatada. *R. Bras. Ci. Solo*, 3:37-41. 1979.
38. NOVAIS, R.F. & KAMPRATH, E.J. Fósforo recuperado em três extratores químicos como função do fósforo aplicado no solo e do «fator capacidade». *R. Bras. Ci. Solo*, 3:41-46, 1979.
39. OLSEN, S.R. WATANABE, F.S. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 21:144-149, 1957.
40. RODRIGUES, S.J.; ROJAS, W.C.; URZÚA, S.H. & SUAREZ, D.D. Correlaciones entre formas de P inorgánico, P disponible y absorción de P por plantas de ballica en suelos de la zona central. *Agricultura Técnica*, 34:98-103, 1974.
41. SANTOS, P.R.R.S. *Relação entre os teores de fósforo disponível e produção da cultura da soja em três solos sob vegetação de cerrado — um estudo de calibração*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1978. 68p. (Tese M.S.).
42. SCHOFIELD, R.K. Can a precise meaning be given to «available» soil phosphorus? *Soil and Fertilizers*, 18:373-375, 1955.
43. TANDON, U.L.S. Fluoride — extractable aluminum in soils: I. Its relation to fluoride — extractable phosphorus. *Soil Science*, 108:397-401, 1969.
44. THOMAS, G.W. & PEASLE, D.E. Testing soils for phosphorus In: WALSH, L.M. & BEATON, J.D. *Soil Testing and Plant Analysis*. Madison, Soil Science Society of America, 1973, p. 115-129.
45. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. *Soil classification; a comprehensive system*. 7th. approximation. Washington, Soil Survey Staff, 1967. 207p. Supplement.
46. VETORI, L. *Métodos de análises de solos*. EPE, Rio de Janeiro, 1969. 24 p. (Bol. téc., 7).
47. VAN RAIJ, B. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 2:1-9, 1978.
48. VIDOR, C. & FREIRE, J.R.J. Calibração de análises do solo para a cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill). *Agron. Sulriograndense*, 7:63-72. 1971.
49. WAUGH, D.L. & FITTS, J.M. *Soil test interpretation studies: laboratory and potted plant*. North Caroline State University, 1966. 33p. (Bul. no. 3).
50. ZUBRISKI, J.C. Relationships between forms of soil phosphorus, some indexes of phosphorus availability and growth of sudangrass in greenhouse trials. *Agron. J.* 63:421-425. 1971.