

CALAGEM E ADUBAÇÃO FOSFATADA PARA O ARROZ EM SOLOS INUNDADOS: II. DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO⁽¹⁾

**J. W. V. MELLO⁽²⁾, A. C. RIBEIRO⁽²⁾,
V. H. ALVAREZ V.⁽³⁾ & R. F. NOVAIS⁽³⁾**

RESUMO

A dinâmica do P e sua disponibilidade para as plantas em solos inundados envolve processos complexos que diferem substancialmente daqueles observados em solos bem drenados. Com o objetivo de estudar a disponibilidade de P para o arroz em solos inundados, foi realizado um experimento, em casa de vegetação, com amostras de nove solos de várzea de Minas Gerais. Os tratamentos constaram de combinações de seis doses de P e duas doses de calcário. As plantas foram cultivadas por 60 dias, sendo avaliados a produção de matéria seca e os teores de P na parte aérea. Os resultados revelaram efeitos divergentes da calagem sobre a disponibilidade de P, dependendo das características dos solos: (a) Em solos de baixa capacidade de retenção de P e com óxidos de Fe instáveis frente a condições de inundação, a calagem limitou a disponibilidade de P. (b) Em solos de alta capacidade de retenção de P e com óxidos de Fe mais estáveis, verificou-se o contrário. Além dos fatores quantidade e capacidade tampão, os teores de Fe ativo (extraível por acetato de amônio) nos solos parecem influenciar a disponibilidade de P para o arroz em solos inundados.

Termos de indexação: inundação, solos de várzea, P disponível.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada à Universidade Federal de Viçosa (UFV). Recebido para publicação em abril de 1998 e aprovado em maio de 1999.

⁽²⁾ Professor Adjunto do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa (UFV). CEP 36571-000 Viçosa (MG).

⁽³⁾ Professor Titular do Departamento de Solos, UFV. Bolsista do CNPq.

SUMMARY: LIMING AND PHOSPHATE FERTILIZATION OF WATERLOGGED RICE SOILS: II. PHOSPHORUS AVAILABILITY

Phosphorus dynamics and availability to plants in waterlogged soils involve complex processes which differ substantially from those verified in well drained soils. In order to study P availability to rice growing in waterlogged soils, a greenhouse pot trial was performed with nine lowland rice soil samples from Minas Gerais, Brazil. Six phosphorus rates combined with two liming rates were tested. The plants were grown for 60 days and the above ground dry weight and P concentration were determined after harvesting. The results showed antagonistic effects of liming upon P availability, depending on the soil characteristics: (a) liming decreased P availability in soils with low phosphate buffer capacity (PBC) and with iron oxides that are unstable under waterlogging conditions; (b) the opposite was verified in soils with high PBC and stable iron oxides. In addition to the P quantity factor and the PBC, the active iron contents (ammonium acetate extractable Fe) of the soils also seemed to influence P availability to rice in waterlogged soils.

Index terms: flooding, lowland soils, available P.

INTRODUÇÃO

As respostas do arroz irrigado à adubação fosfatada não são tão consistentes quanto aquelas que se verificam em culturas de sequeiro. Muitas vezes, plantas cultivadas após a drenagem de várzeas respondem a altas doses de fósforo, ao passo que o arroz irrigado por inundação, cultivado nos mesmos solos, não responde à adição de P (Patrick Jr. & Mahapatra, 1968; Brandon & Mikkelsen, 1979). Isso ocorre porque as reações químicas do fósforo em solos inundados diferem substancialmente daquelas observadas em solos bem drenados.

Os efeitos da inundação dos solos sobre a dinâmica do P incluem: alterações na concentração do P em solução (Moraes, 1973; Patrick Jr. & Khalid, 1974; Khalid et al., 1977; Holford & Patrick Jr., 1979), alterações na capacidade de adsorção de P (Patrick Jr. & Khalid, 1974; Khalid et al., 1977; Kuo & Mikkelsen, 1979; Holford & Patrick Jr., 1979; Husin, 1982; Roy & De Datta, 1985), alterações no fator "difusividade" do P (Turner & Gilliam, 1976) e alterações no P lábil (Moraes, 1973; Holford & Patrick Jr., 1979) em função do tempo de inundação. Portanto, evidencia-se que os fatores que controlam a disponibilidade de P nos solos podem sofrer modificações significativas com a inundação e que tais alterações devem-se, principalmente, a reações de oxirredução envolvendo os óxidos de Fe.

A necessidade de considerar o poder tampão de P dos solos nos estudos de disponibilidade e estabelecimento de níveis críticos de P, especialmente para extratores sensíveis ao poder tampão, tem sido demonstrada em inúmeros trabalhos com solos bem drenados. Holford (1976) verificou que o poder tampão de P, juntamente com o fator quantidade (P lábil), é importante na determinação das quantidades necessárias de P para o máximo

rendimento das plantas. No Brasil, vários autores têm demonstrado que tanto os níveis críticos de P no solo quanto as recomendações de adubação dependem do poder tampão dos solos (Freire et al., 1985; Muniz et al., 1985, 1987). Vale lembrar que o poder tampão de P dos solos é dado pela razão entre o P lábil e o fator intensidade (P na solução do solo).

Em solos inundados, esses aspectos não têm sido convenientemente estudados. Em princípio, consideram-se válidas as mesmas recomendações feitas para solos bem drenados. Moura Filho (1990), por exemplo, verificou que os níveis críticos de P no solo, para o arroz irrigado, estavam relacionados com o poder tampão dos solos. Contudo, deve-se ter em mente que, ao contrário do que ocorre em solos bem drenados, o poder tampão de P não é uma característica estável em solos inundados. Pode-se depreender do trabalho de Holford & Patrick Jr. (1979) que a capacidade tampão e o fator quantidade de P no solo variam em função do tempo de inundação. Isso demonstra a necessidade de estudos no sentido de verificar de que modo a absorção de P pelas plantas e os níveis críticos são influenciados pelas alterações que ocorrem no P lábil e poder tampão dos solos com a inundação.

O presente trabalho objetivou verificar os efeitos da calagem e adubação fosfatada sobre a produção de matéria seca e absorção de P por plantas de arroz em solos inundados, bem como relacionar a disponibilidade de P com as características dos solos.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas duas doses de calcário (C0 e C1) e seis doses de fósforo (P0, P1, P2, P3, P4 e P5) combinadas, em fatorial completo, com nove solos

de várzea de Minas Gerais. As doses de calcário foram: C0 = sem corretivo e C1 = $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ para obter saturações de 72% de Ca + Mg, considerando a CTC dos solos a pH 7,0. As doses de P foram diferentes para cada solo, visando obter o máximo rendimento de matéria seca das plantas de arroz dentro do intervalo experimental. Para tanto, foram considerados os resultados obtidos em experimentos prévios com esses mesmos solos (Moura Filho, 1990). As doses de P utilizadas foram de 0, 60, 120, 180, 240 e 300 mg dm^{-3} , para os solos 1 e 7; de 0, 90, 180, 270, 360 e 450 mg dm^{-3} , para os solos 4, 5, 6 e 8; e de 0, 120, 240, 360, 480 e 600 mg dm^{-3} , para os solos 2, 3 e 9. Maiores detalhes acerca dos tratamentos e solos utilizados foram descritos na parte I deste trabalho (Mello et al., 1999).

Após o período de incubação dos solos com as doses de calcário (carbonatos de Ca e Mg) e doses de P, foram plantadas 10 sementes pré-germinadas de arroz, cultivar INCA, e, passados 15 dias, realizou-se um desbaste, deixando cinco plantas por vaso. Os solos foram, então, inundados, mantendo-se uma lâmina de água de 3 cm.

Adubações complementares com K e S foram realizadas por ocasião do plantio (110 mg dm^{-3} de K e 45 mg dm^{-3} de S) e aos 20 dias do plantio (90 mg dm^{-3} de K e 37 mg dm^{-3} de S), na forma de K_2SO_4 , em solução. Foram feitas aplicações parceladas de N em cobertura (50 mg dm^{-3}), na forma de uréia em solução, a cada 10 dias após o plantio, perfazendo um total de 250 mg dm^{-3} de N. O Cu (5 mg dm^{-3}) foi aplicado como $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, em solução, 10 dias após o plantio. Os demais micronutrientes foram aplicados nas formas de ZnCl_2 , $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ e $(\text{NH}_4)_2\text{MO}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, em solução, aos 14, 28 e 42 dias do plantio, perfazendo totais de 20 mg dm^{-3} de Zn; 1,0 mg dm^{-3} de B e 0,15 mg dm^{-3} de Mo.

Trinta e cinco dias após o plantio, foram retiradas duas plantas por vaso e, aos 60 dias, procedeu-se à colheita da parte aérea das três plantas restantes. O material vegetal foi seco em estufa (70°C até peso constante), pesado e moído. No tecido da parte aérea das plantas, foram determinados os teores de P, sendo o material mineralizado por digestão nítrico-perclórica. O P nos extratos foi determinado por colorimetria, segundo Braga & Defelipo (1974).

Foram realizadas análises de P nos solos, logo após o período de incubação, utilizando-se os extratores Mehlich-1, acetato de amônio 1 mol L^{-1} pH 4,8 e oxalato de amônio 0,2 mol L^{-1} pH 3,0. Também, durante o experimento, foram realizadas análises de P com o uso do "papel aniônico", conforme descrito em Mello et al. (1999).

A capacidade de retenção de P dos solos, com e sem calcário, foi avaliada, indiretamente, em amostras de solo secas ao ar. Para tanto, determinou-se o P remanescente na solução de equilíbrio (P_{rem}), após agitação por 60 min, de suspensões de 5 cm^3 de solo e 50 mL de CaCl_2 0,01 mol L^{-1} contendo 60 mg L^{-1} de P.

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com três repetições para cada tratamento. As análises estatísticas constaram de análise de variância, regressão e correlação. As equações de regressão foram utilizadas para testar o efeito das doses de P dentro de cada solo e dentro de cada dose de calcário; ao passo que os efeitos das doses de calcário foram avaliados pelo teste F da análise de variância.

Com as equações de regressão para matéria seca em função das doses de P, foram estimadas as produções máximas e as doses de P necessárias para atingir 90% dessas produções, consideradas como "doses críticas de fósforo" para o arroz. Os níveis críticos de P no solo foram calculados a partir das doses críticas e das equações de regressão para P recuperado, pelos diferentes extratores, em função da dose de P aplicada no solo (Mello et al., 1999).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produção de matéria seca e P acumulado na parte aérea das plantas

As produções de matéria seca da parte aérea das plantas na dose zero de P foram muito baixas, atestando a deficiência de P dos solos (Quadro 1). Os incrementos de matéria seca, da dose P0 para a dose P1, foram bastante elevados e, na maioria dos casos, as produções obtidas para a dose P2 foram próximas às máximas obtidas dentro do intervalo experimental. Em consequência, os modelos de regressão ajustados (dados não apresentados) foram, predominantemente, quadráticos base raiz quadrada ($P < 0,01$). Esses resultados confirmam que a necessidade de adubação fosfatada para o arroz em solos inundados é, geralmente, menor em relação às demais culturas de sequeiro, conforme sugerido por vários autores (Patrick Jr. & Mahapatra, 1968; Goswami & Banerjee, 1978; Brandon & Mikkelsen, 1979) e em relação ao arroz cultivado sem inundação (Moura Filho, 1990).

De modo geral, podem-se observar menores produções de matéria seca para os tratamentos com calagem que não receberam fósforo. Uma hipótese para explicar esses decréscimos seria a limitação na disponibilidade do P nativo associado a óxidos de Fe de baixa estabilidade nos solos. Ao estabilizar esses óxidos, a calagem também limitaria a mobilização do P, conforme sugeriram Mello et al. (1999), para explicar as menores taxas de P recuperado pelo papel aniônico, nos tratamentos sem fósforo e com calagem. Resultados semelhantes foram obtidos por Pereira (1985), que verificou decréscimos na absorção de P e na produção de matéria seca de plantas de arroz com a calagem em solos inundados.

Considerando apenas os tratamentos que não receberam fósforo (P0), verificam-se, na maioria dos

Quadro 1. Produção de matéria seca na parte aérea das plantas para as diferentes doses de fósforo e calcário

Solo	Dose de calcário ⁽¹⁾	Dose de fósforo ⁽²⁾					
		P0	P1	P2	P3	P4	P5
g vaso ⁻¹							
1	C0	4,01	16,41	17,16	17,33	19,72	17,17
	C1	2,72	15,63	16,38	16,31	18,01	17,60
2	C0	4,60	20,90	25,22	27,18	26,86	28,33
	C1	3,57	18,59	23,23	23,66	26,03	23,75
3	C0	0,23	7,97	13,46	15,49	16,84	18,33
	C1	0,17	12,70	16,60	18,68	14,83	16,83
4	C0	3,71	17,04	22,42	21,47	23,86	23,04
	C1	2,36	18,20	20,30	22,71	21,27	20,74
5	C0	1,40	16,74	21,42	21,59	21,71	25,30
	C1	1,15	17,52	21,48	21,63	21,71	21,95
6	C0	2,36	14,96	18,53	22,99	20,36	21,03
	C1	1,74	14,19	17,40	21,59	19,77	22,23
7	C0	0,34	7,24	15,02	15,98	17,36	17,87
	C1	0,38	8,31	13,53	14,40	16,05	16,06
8	C0	3,29	17,86	21,69	26,01	27,48	25,74
	C1	2,91	17,21	21,34	24,66	23,39	25,45
9	C0	1,53	17,04	20,60	20,75	20,96	23,25
	C1	0,52	18,18	19,73	20,21	19,13	21,40

⁽¹⁾ C0: Sem corretivo; C1: CaCO₃ + MgCO₃ para saturações de 72% de Ca + Mg. ⁽²⁾ P0 a P5 = 0, 60, 120, 180, 240 e 300 mg dm⁻³ de P, para os solos 1 e 7; 0, 90, 180, 270, 360 e 450 mg dm⁻³ de P, para os solos 4, 5, 6 e 8; 0, 120, 240, 360, 480 e 600 mg dm⁻³ de P, para os solos 2, 3 e 9.

casos, menores quantidades de P acumulado nos tecidos das plantas para os tratamentos com calagem (Quadro 2). Esses resultados corroboram a hipótese de que o decréscimo no rendimento das plantas foi devido à diminuição na disponibilidade do P nativo nos solos, imposta pela calagem.

Nos solos 1 e 2, as quantidades de P acumulado nos tecidos das plantas foram menores ($P < 0,05$) para os tratamentos com calagem em todos as doses de P (Quadro 2). Também, nesses solos, as produções de matéria seca (Quadro 1) foram ligeiramente inferiores com a calagem. Além disso, o solo 1 foi o que apresentou maiores teores de Fe ativo, óxidos de Fe menos estáveis e menor capacidade de retenção de P (Quadro 3). Isso permite sugerir que, em solos de baixa capacidade de retenção de P e com altos teores de Fe extraível em acetato de amônio, a disponibilidade de P, para o arroz inundado, depende, fundamentalmente, da mobilização do Fe e, nessas circunstâncias, a calagem pode limitar a disponibilidade de P via estabilização dos óxidos de Fe.

No solo 3, as produções de matéria seca (Quadro 1) e o P acumulado no tecido das plantas (Quadro 2) foram maiores para os tratamentos com calagem ($P < 0,001$); ou seja, o efeito da calagem nesse solo foi exatamente oposto àquele verificado para o solo 1. Deve-se ter em mente que as

características do solo 3, como capacidade de retenção de P, teor de Fe ativo (Quadro 3) e estabilidade dos óxidos de Fe (Mello et al., 1992a,b; 1999), contrastaram com aquelas observadas para o solo 1, constituindo mais uma evidência de que a calagem pode limitar a disponibilidade de P somente nos solos onde predominam matrizes de adsorção pouco estáveis frente à inundação; ou seja, solos de baixa capacidade de retenção de P e com óxidos de Fe facilmente redutíveis. Nos demais solos, o efeito da calagem pode ser interpretado como uma resultante desses dois fenômenos distintos: um no sentido de limitar a mobilização do P associado a óxidos pouco estáveis e outro no sentido de aumentar a disponibilidade do P.

Doses críticas e níveis críticos de P nos solos

Quando se consideram solos pobres em fósforo, com quantidades semelhantes de P lábil, espera-se que as doses recomendáveis de P para as plantas sejam tanto maiores quanto maior for a capacidade de retenção de P dos solos (menor P_{rem}). De modo geral, isto foi observado no presente trabalho. No entanto, algumas exceções foram detectadas ao se compararem os resultados obtidos para os solos 2, 4 e 8 (Quadro 4). Verificou-se que as doses críticas de P para o solo 4 foram menores do que aquelas obtidas

Quadro 2. Conteúdo de P na parte aérea das plantas para as diferentes doses de fósforo e calcário

Solo	Dose de calcário ⁽¹⁾	Dose de fósforo ⁽²⁾					
		P0	P1	P2	P3	P4	P5
mg vaso ⁻¹							
1	C0	4,72	35,63	44,10	51,30	52,95	55,53
	C1	2,08	31,08	40,69	46,10	50,11	52,77
2	C0	3,98	23,69	44,52	54,20	73,19	75,59
	C1	2,59	21,57	41,54	50,41	55,71	73,05
3	C0	0,08	7,91	12,51	17,41	26,77	41,60
	C1	0,07	9,67	15,96	20,49	26,69	46,17
4	C0	2,72	17,64	32,02	33,02	42,08	49,79
	C1	1,85	17,63	25,73	34,36	39,03	49,58
5	C0	1,12	17,80	32,77	47,51	57,80	71,23
	C1	0,76	19,91	37,92	44,69	55,68	64,43
6	C0	1,51	15,42	30,19	41,20	47,52	58,71
	C1	1,11	16,58	29,02	41,28	42,62	60,83
7	C0	0,14	5,76	16,53	22,89	32,51	40,51
	C1	0,13	7,48	16,69	24,49	28,71	39,63
8	C0	2,39	19,68	33,81	52,02	58,06	62,25
	C1	1,75	21,90	35,46	48,36	49,94	62,82
9	C0	1,01	23,85	43,90	56,48	59,26	81,52
	C1	0,34	23,64	42,13	55,47	63,60	73,43

⁽¹⁾ C0: Sem corretivo; C1: CaCO₃ + MgCO₃ para saturações de 72% de Ca + Mg. ⁽²⁾ P0 a P5 = 0, 60, 120, 180, 240 e 300 mg dm⁻³ de P, para os solos 1 e 7; 0, 90, 180, 270, 360 e 450 mg dm⁻³ de P, para os solos 4, 5, 6 e 8; 0, 120, 240, 360, 480 e 600 mg dm⁻³ de P, para os solos 2, 3 e 9.

para os solos 2 e 8, embora o solo 4 tenha apresentado maior capacidade de retenção de P (Quadro 3). Verificou-se, ainda, que os solos 2 e 8 apresentaram menores teores de Fe ativo comparativamente ao solo 4. Também nos solos 5 e 9, as doses críticas de P foram relativamente altas (Quadro 4), apesar da capacidade de retenção de P relativamente baixa (Quadro 3). Esses resultados indicam que, além da capacidade de retenção de P, avaliada em amostras de solo secas ao ar (por meio do P_{rem}), os teores de Fe ativo (extraível em acetato de amônio) devem ser considerados nas recomendações de adubação fosfatada para o arroz irrigado.

Não foram obtidas correlações significativas entre os níveis críticos de P no solo, para os extratores de Mehlich e oxalato de amônio, e P remanescente, característica relacionada com a capacidade de retenção dos solos (Quadro 5). Por outro lado, os extratores acetato de amônio e papel aniônico permitiram estimativas de níveis críticos correlacionados com o P remanescente. O coeficiente de correlação mais alto foi obtido entre os níveis críticos de P pelo papel aniônico, no dia da inundação, e o P remanescente. Esses resultados indicam que há possibilidade de estabelecer os níveis críticos de P nos solos, para o método do papel aniônico, a partir de análises de P remanescente em amostras de solo oxidadas.

Quadro 3. Características de nove solos de várzea de Minas Gerais, relacionadas com a capacidade de retenção de P e teores de Fe, na presença e ausência de calagem

Solo	Nível de calagem	P _{rem} ⁽¹⁾	mg L ⁻¹ — mg dm ⁻³ —		
			Fea ⁽²⁾	Fem ⁽³⁾	Fea/Fem ⁽⁴⁾
1	C0	48	112	344	0,32
	C1	49	86	336	0,26
2	C0	24	36	165	0,22
	C1	23	28	166	0,17
3	C0	3	0,9	13	0,07
	C1	3	0,6	13	0,05
4	C0	15	60	223	0,27
	C1	16	38	224	0,17
5	C0	28	27	198	0,14
	C1	29	24	187	0,13
6	C0	26	62	367	0,17
	C1	25	53	353	0,15
7	C0	30	60	288	0,21
	C1	30	47	249	0,19
8	C0	28	45	279	0,16
	C1	27	34	292	0,12
9	C0	29	15	94	0,16
	C1	28	10	93	0,11

⁽¹⁾ P remanescente na solução de equilíbrio após agitação por 1 hora de 5 cm³ solo: 50 mL solução com 60 mg L⁻¹ de P em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹. ⁽²⁾ Fe ativo - extraível em acetato de amônio 1 mol L⁻¹ pH 4,8. ⁽³⁾ Fe Mehlich-1. ⁽⁴⁾ Relação Fe ativo/Fe Mehlich-1. C0: Sem calcário; C1: CaCO₃ + MgCO₃ para saturações de 72% de Ca + Mg.

Quadro 4. Produções máximas estimadas (Ymax), doses críticas de fósforo e níveis críticos de fósforo nos solos para os extratores químicos e papel aniônico

Solo	Dose de calcário	Ymax	Dose crítica de P	Nível crítico de P no solo					
				Acetato de amônio	Mehlich	Oxalato de amônio	Papel aniônico		
							Dia 0	Dia 14	Dia 28
g vaso ⁻¹		mg dm ⁻³			mg cm ⁻²				
1	C0	18,44	80	13,1	28,5	79	0,520	0,528	0,795
	C1	17,70	91	16,0	34,2	88	0,681	0,652	0,927
2	C0	27,91	244	8,9	25,3	193	0,406	0,460	0,425
	C1	24,73	218	9,5	26,0	164	0,338	0,628	0,624
3	C0	17,96	366	8,6	38,2	112	0,162	0,463	0,352
	C1	17,04	188	2,5	18,5	54	0,109	0,196	0,288
4	C0	23,30	176	4,2	17,0	167	0,236	0,378	0,464
	C1	21,87	129	3,8	14,7	124	0,142	0,319	0,253
5	C0	23,91	225	9,4	26,6	139	0,506	0,506	0,534
	C1	22,24	147	5,7	19,7	101	0,254	0,367	0,434
6	C0	21,39	188	8,4	22,6	138	0,323	0,457	0,626
	C1	21,89	258	14,6	36,6	196	0,627	0,866	0,874
7	C0	18,11	169	5,4	16,6	95	0,276	0,367	0,368
	C1	16,61	206	8,8	23,3	116	0,412	0,503	0,559
8	C0	27,00	244	12,4	28,7	226	0,534	0,639	0,633
	C1	25,13	227	14,7	30,7	209	0,637	0,671	0,720
9	C0	22,21	239	8,2	39,4	175	0,525	0,453	0,666
	C1	20,94	182	11,7	35,7	128	0,371	0,473	0,416

C0: Sem calcário; C1: CaCO₃ + MgCO₃ para saturações de 72% de Ca + Mg.

Quadro 5. Coeficientes de correlação linear simples (r) entre doses críticas e níveis críticos de P no solo e algumas características de solo relacionadas com a capacidade de retenção de P

Característica do solo	Nível crítico de P no solo						Dose crítica de P
	Acetato de amônio	Mehlich	Oxalato de amônio	Papel aniônico			
				Dia 0	Dia 14	Dia 28	
Todos os tratamentos (n = 18)							
Prem ⁽¹⁾	0,6315**	0,2216	-0,0378	0,7276***	0,4285*	0,7037***	-0,5986**
Fea ⁽²⁾	0,3915	-0,1238	-0,1036	0,4377*	0,3561	0,5897**	-0,6301**
Fem ⁽³⁾	0,4820*	-0,1183	0,1940	0,5565**	0,5614**	0,6448**	-0,4512*
Fea/Fem ⁽⁴⁾	0,2316	-0,1417	0,0053	0,3403	0,2134	0,4290*	-0,5696*
Tratamentos sem calagem (n = 9)							
Prem. ⁽¹⁾	0,5161	-0,1456	-0,2132	0,7413*	0,3081	0,7468*	-0,8173**
Fea ⁽²⁾	0,2415	-0,5348	-0,3827	0,2045	0,0483	0,5195	-0,9260***
Fem ⁽³⁾	0,2042	-0,6560*	0,1629	0,2519	0,1506	0,4832	-0,8148**
Fea/Fem ⁽⁴⁾	0,0453	-0,5052	0,1901	0,2182	-0,1344	0,3974	-0,8760***
Tratamentos com calagem (n = 9)							
Prem. ⁽¹⁾	0,7402*	0,5817	0,1237	0,7415*	0,5340	0,7094*	-0,3596
Fea ⁽³⁾	0,6223*	0,3813	0,1512	0,7079*	0,6524*	0,7641**	-0,3094
Fem ⁽⁴⁾	0,6921*	0,4318	0,5393	0,7914**	0,8176**	0,7884**	0,2433
Fea/Fem ⁽⁵⁾	0,4927	0,2607	0,1074	0,5198	0,5112	0,5821	-0,4037

⁽¹⁾ P remanescente na solução de equilíbrio. ⁽²⁾ Fe ativo - extraível em acetato de amônio 1 mol L⁻¹ pH 4,8. ⁽³⁾ Fe Mehlich-1. ⁽⁴⁾ Relação Fe ativo/Fe Mehlich-1. *, **, *** significativos a 5, 1 e 0,1%, respectivamente.

Verificou-se, ainda, que as doses críticas de P para o arroz correlacionaram-se significativamente com algumas características dos solos (Quadro 5). Em alguns casos, os coeficientes de correlação assumiram valores particularmente elevados quando se consideraram apenas os dados dos tratamentos sem calagem. Merece destaque a correlação entre doses críticas e teores de Fe ativo (extraível em acetato de amônio) nos solos. Esses resultados evidenciam, novamente, a importância de avaliar a estabilidade dos óxidos de Fe, particularmente o Fe extraível em acetato de amônio, nos estudos de disponibilidade de P para o arroz em solos inundados.

Observou-se que a calagem estabilizou os óxidos, limitando a mobilização do Fe na solução dos solos (Mello et al., 1992a). Nessas circunstâncias, pode-se supor que a disponibilidade de P passa a depender mais da capacidade tampão de P e menos da mobilização do Fe nos solos inundados. Uma evidência disso é que os coeficientes de correlação entre os níveis críticos para o extrator de Mehlich e o P remanescente aumentaram sensivelmente quando considerados apenas os tratamentos com calagem (Quadro 5). Por outro lado, os coeficientes de correlação entre esses níveis críticos (Mehlich) e as características dos solos relacionados com estabilidade dos óxidos de Fe (Fea; Fem; Fea/Fem) diminuíram sensivelmente para os tratamentos com calagem em relação aos tratamentos sem calagem, tendo inclusive mudado de sinal. Os coeficientes negativos para os tratamentos sem calcário mostram que os níveis críticos para o extrator de Mehlich foram tanto menores quanto maiores os teores de Fe redutível no solo, o que não se verificou para os tratamentos com calcário.

CONCLUSÕES

1. Os efeitos da calagem sobre a disponibilidade do P adicionado foram dependentes das características dos solos inundados. Em solos com alta capacidade de retenção de P e com matrizes de adsorção de fosfatos estáveis sob condições redutoras, verificou-se aumento na disponibilidade do P com a calagem. Por outro lado, em solos de baixa capacidade de retenção de P e com óxidos de Fe instáveis sob condições redutoras, a calagem limitou a disponibilidade de P para plantas de arroz.

2. A disponibilidade de P para o arroz em solos inundados foi alterada pelos fatores quantidade e capacidade de retenção de P - avaliados em amostras de solo secas ao ar - e pelos teores de Fe ativo nos solos.

3. Os níveis críticos de P no solo para os extratores Mehlich-1 e oxalato de amônio não se correlacionaram com características dos solos que exprimem a

capacidade de retenção de P. Para os extratores menos agressivos, acetato de amônio e "papel aniônico", tais coeficientes foram mais elevados.

LITERATURA CITADA

- BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. *R. Ceres*, 21:73-89, 1974.
- BRANDON, D.M. & MIKKELSEN, D.S. Phosphorus transformations in alternately flooded California soils. I. Causes of plant phosphorus deficiency in rice rotation crops and correctional methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:989-994, 1979.
- FREIRE, F.M.; NOVAIS, R.F. & NEVES, J.C.L. Níveis críticos de fósforo para o crescimento do estilostantes como função do fator capacidade de fósforo do solo. *R. Ceres*, 32:488-499, 1985.
- GOSWAMI, N.N. & BANERJEE, N.K. Phosphorus, potassium and other macroelements. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. *Soils and rice*. Los Baños, 1978. p.561-580.
- HOLFORD, I.C.R. Effects of phosphate buffer capacity of soil on the phosphate requirements of plants. *Plant Soil*, 45:433-444, 1976.
- HOLFORD, I.C.R. & PATRICK Jr., W.H. Effects of reduction and pH changes on phosphate sorption and mobility in an acid soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 43:292-297, 1979.
- HUSIN, A. Phosphorus sorption pattern under controlled redox potential for crowley silt loam soil. 5:128-133, 1982.
- KHALID, R.A.; PATRICK Jr., W.H. & DE LAUNE, R.D. Phosphorus sorption characteristics of flooded soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 41:305-310, 1977.
- KUO, S. & MIKKELSEN, D.S. Distribution of iron and phosphorus in flooded and unflooded soil profiles and their relation to phosphorus adsorption. *Soil Sci.*, 127:18-25, 1979.
- MELLO, J.W.V.; FONTES, M.P.F.; RIBEIRO, A.C. & ALVAREZ V., V.H. Inundação e calagem em solos de várzea: I. Alterações no pH, Eh e teores de Fe²⁺ e Mn²⁺ em solução. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:309-317, 1992a.
- MELLO, J.W.V.; FONTES, M.P.F.; RIBEIRO, A.C. & NOVAIS, R.F. Inundação e calagem em solos de várzea: II. Adsorção/precipitação de fosfatos. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:319-324, 1992b.
- MELLO, J.W.V.; RIBEIRO, A.C.; NOVAIS, R.F. & ALVAREZ V., V.H. Calagem e adubação fosfatada para o arroz em solos inundados. I. Teores de ferro e fósforo nos solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:847-854, 1999.
- MORAES, J.F.V. Efeitos da inundação do solo. I. Influência sobre o pH, o potencial de óxido-redução e a disponibilidade de fósforo no solo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 8:93-101, 1973.
- MOURA FILHO, G. Disponibilidade de fósforo em amostras de solos de várzea. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1990. 76p. (Tese de Mestrado)
- MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. & NEVES, J.C.L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo no solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 9:237-243, 1985.

- MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; FREIRE, F.M.; NEVES, J.C.L. & BARROS, N.F. Disponibilidade de fósforo e recomendação de adubação avaliada por meio de extratores químicos e do crescimento de soja em amostras de solo com diferentes valores do fator capacidade. R. Ceres, 34:121-151, 1987.
- PATRICK Jr., W.H. & KHALID, R.A. Phosphorus release and sorption by soils and sediments: effects of aerobic and anaerobic conditions. Science, 186:53-55, 1974.
- PATRICK Jr., W.H. & MAHAPATRA, I.C. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. Adv. Agron., 20:323-359, 1968.
- PEREIRA, L.F. Efeito da aplicação de calcário, fósforo e zinco no crescimento e nutrição do trigo (*Triticum aestivum* L.) e arroz (*Oriza sativa* L.) em dois solos de várzea do Estado de Minas Gerais. Lavras, Escola Superior de Agricultura de Lavras, 1985. 135p. (Tese de Mestrado)
- ROY, A.C. & DE DATTA, S.K. Phosphorus sorption isotherms for evaluating phosphorus requirements of wetland rice soils. Plant Soil, 86:195-196, 1985.
- TURNER, F.T. & GILLIAM, J.W. Increased P diffusion as an explanation of increased P availability in flooded rice soils. Plant Soil, 43:365-377, 1976.