

# FRACIONAMENTO DO FÓSFORO INORGÂNICO EM SOLOS DE VÁRZEA DO RIO GRANDE DO SUL

## INORGANIC PHOSPHORUS FRACTIONS IN LOWLAND SOILS OF RIO GRANDE DO SUL STATE

Sidnei Küster Ranno<sup>1</sup>; Leandro Souza da Silva<sup>2\*</sup>; Fábio Joel Kochem Mallmann<sup>3</sup>

### RESUMO

Os solos apresentam variações na distribuição das formas de fósforo (P) inorgânico, as quais são influenciadas pelo alagamento do solo, provocando efeitos sobre a disponibilidade deste nutriente ao arroz irrigado por inundação. O objetivo deste trabalho foi avaliar as frações de fósforo inorgânico em amostras de solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul (RS) e a influência do alagamento do solo nestas frações. Foram coletadas amostras da camada superficial de solos de várzea em 16 locais do RS, as quais foram secas ao ar, moídas, peneiradas e incubadas com calcário de modo a atingir pH 5,5. Após incubadas, uma alíquota de cada amostra recebeu P baseado na sua capacidade máxima de adsorção obtida através de isotermas. Para simular condições de alagamento, uma alíquota de cada amostra sem e com adição de P foi colocada em potes plásticos onde permaneceram alagadas por 30 dias. Foi realizado o fracionamento do P inorgânico nas amostras sem e com P antes e após o alagamento do solo. Os teores de P total e a distribuição das formas de P inorgânico foram bastante variáveis nos solos de várzea do RS, mas os teores foram considerados baixos na grande maioria das amostras. A principal forma de P inorgânico em solos de várzea foi o Fe-P, a qual aumentou de proporção com o alagamento do solo.

Palavras-chave: arroz, solos alagados, formas de fósforo.

### ABSTRACT

Soils present variations in inorganic phosphorus (P) fractions, which are affected by flooding, and in turn, affect P availability to irrigated rice. The objective of this work was to evaluate the inorganic P fractions in lowland soils samples from Rio Grande do Sul (RS) state and study the influence of soil flooding on these fractions. Soils samples from the surface layer were collected at 16 sites around the state, air-dried, crushed, sieved and incubated with lime to reach pH 5.5. After incubation, each sample received P based on its maximum P adsorption capacity. To simulate flooding conditions, each sample with and without P addition was set in plastic pots and flooded for 30 days. The inorganic P fraction was analyzed in soils with and without P and before and after flooding. There were differences in total P and inorganic P fractions among lowland soils from RS, but they showed lower total P contents for most of samples. The main inorganic P fraction in lowland soils was Fe-P, which increased with flooding.

Key words: rice, flooded soil, phosphorus fractions.

### INTRODUÇÃO

O fósforo total do solo encontra-se em formas orgânicas e inorgânicas. O fósforo (P) orgânico, embora possa servir como nutriente às plantas após a mineralização até formas

inorgânicas, parece apresentar pouca importância prática (GATIBONI, 2003), principalmente em solos alagados, tendo em vista a menor taxa de mineralização que ocorre em condições anaeróbicas (PATRICK JUNIOR & MAHAPATRA, 1968). CHANG & JACKSON (1957) propuseram uma metodologia capaz de fracionar o fósforo inorgânico do solo em quatro grupos principais: fosfato de cálcio (Ca-P), fosfato de alumínio (Al-P), fosfato de ferro (Fe-P) e P-ocluído. Na seqüência do fracionamento proposto, a primeira extração remove o P solúvel e fracamente adsorvido. Na etapa seguinte, utiliza-se a habilidade complexadora do F<sup>-</sup> contido no NH<sub>4</sub>F para separar as formas Al-P e Fe-P, seguida da remoção do Fe-P com NaOH e do P-ocluído por DCB. Já o Ca-P, o qual é insolúvel em DCB, é extraído com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Essas formas de P ocorrem em todos os solos; no entanto, existe uma variação na proporção entre as formas de P em função das características dos solos. Em solos ácidos normalmente predominam as formas Al-P, Fe-P e P-ocluído, enquanto solos neutros e levemente ácidos usualmente contêm as quatro frações em quantidades semelhantes e solos alcalinos e calcários são freqüentemente dominantes em Ca-P. De um modo geral, Ca-P e Al-P são consideradas as formas de maior probabilidade de ocorrência em solos antes que o intemperismo químico atue severamente. Em um avançado estágio de intemperismo, o Fe-P aumenta as custas do Al-P e Ca-P, com posterior oclusão de parte do Al-P e Fe-P pelo revestimento com óxidos de ferro (PATRICK JUNIOR & MAHAPATRA, 1968). Os minerais mais estáveis formados entre Al-P, Fe-P e Ca-P são a variscita, strenguita e a apatita, respectivamente (SAH & MIKKELSEN, 1986).

Com o alagamento do solo durante o cultivo do arroz, o ambiente químico e biológico é profundamente alterado em relação ao anteriormente oxidado. Nessa condição, após o consumo do oxigênio molecular, microrganismos anaeróbios passam a utilizar compostos oxidados do solo como receptores de elétrons. A partir destas reações de oxirredução, modificam-se os valores do pH e aumenta a disponibilidade de vários elementos (PONNAMPERUMA, 1972). O Fe<sup>3+</sup> e Mn<sup>4+</sup> da superfície dos óxidos passam para forma de Fe<sup>+2</sup> e Mn<sup>+2</sup>, respectivamente, aumentando sua concentração na solução do solo (VAHL, 1991). O fósforo, em função da adsorção específica na superfície dos óxidos, tem sua dinâmica bastante alterada, podendo ser liberado para a solução do solo na medida que há redução do Fe da sua estrutura (VAHL, 1999).

Informações acerca da distribuição do P nas diferentes

Parte da dissertação de mestrado do primeiro autor apresentada junto ao PPGCS da UFSM.

<sup>1</sup> Eng., Agr., M.Sc., Pesquisador da Fundação MS. Caixa Postal 105, CEP 79150-000 Maracaju (MS). E-mail: sidneiranno@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Eng., Agr., Dr., Professor Adjunto, Departamento de Solos, CCR, UFSM, 97105-900, Santa Maria, RS. leandro@smail.ufsm.br \*autor para correspondência

<sup>3</sup> Acadêmico do curso de Mestrado em Ciência do Solo, PPGCS, UFSM. E-mail: fabiojkmallmann@yahoo.com.br

(Recebido para Publicação em 04/02/2005, Aprovado em 19/01/2007)

frações em solos de várzea do RS, que controlam quantitativamente e qualitativamente a disponibilidade de P com o alagamento, ainda são limitadas. Como implicação prática existem problemas na avaliação da disponibilidade de P e recomendação da adubação fosfatada para o arroz irrigado. Vários métodos de extração química de fósforo, que podem ser utilizados para avaliar sua disponibilidade e recomendar adubação fosfatada para culturas de sequeiro, geralmente apresentam baixa eficiência em solos de várzea (PATRICK JUNIOR & MAHAPATRA, 1968; CHANG, 1978). Neste contexto, ainda devemos considerar a grande diversidade de solos onde se cultiva o arroz, dentre os quais têm-se solos originados de diferentes materiais de origem, em diferentes graus de intemperismo e submetidos a diversos processos de formação do solo. A distribuição dos materiais de origem dos solos hidromórficos do Estado do Rio Grande do Sul determinou a localização dos solos mais ricos em ferro na Fronteira Oeste e a diminuição da concentração do ferro na região do Litoral Sul, onde ocorrem os solos derivados do granito (SOUSA et al., 2004).

Assim, é provável que existam grandes variações na distribuição das formas de P para estes solos, o que possivelmente determina uma dinâmica diferente para o P no solo, tanto em condição de solo seco quanto após o alagamento durante o ciclo do arroz. O objetivo deste trabalho foi avaliar a modificação da distribuição do P nas frações em função do alagamento em amostras de solos de várzea do Estado do Rio Grande do Sul.

## MATERIAL E MÉTODOS

Foram coletadas 16 amostras de solos de várzea representativas da lavoura orizícola do RS e significativas para a produção de arroz, com ampla faixa de variação de características químicas e físicas, as quais incluem amostras de 14 municípios (Tabela 1). Tendo em vista a semelhança na classificação entre algumas amostras, na discussão do presente trabalho foi utilizado a denominação dos solos pelo município onde foram coletados.

Tabela 1 - Associação entre os locais de coleta dos solos de várzea do RS e as unidades de mapeamento e classificação brasileira correspondentes.

Município	Unidade de Mapeamento BRASIL (1973)	Classificação Brasileira STRECK et al. (2002)
Camaquã	Itapeva	Gleissolo Melânico
Torres	Colégio	Gleissolo Melânico
Dom Pedrito	Banhado	Gleissolo Háplico
Uruguaiana 1	Escobar	Vertissolo Ebânico
Uruguaiana 2	Uruguaiana	Chernossolo Ebânico
Caçapava do Sul	São Gabriel	Planossolo Háplico
Santo Antônio da Patrulha	Vacacaí	Planossolo Hidromórfico
Santa Maria	Vacacaí	Planossolo Hidromórfico
São Gabriel	São Gabriel	Planossolo Háplico
Cachoeirinha	Banhado	Gleissolo Háplico
Restinga Seca	Vacacaí	Planossolo Hidromórfico
Cachoeira do Sul 1	Vacacaí	Planossolo Hidromórfico
Cachoeira do Sul 2	Vacacaí	Planossolo Hidromórfico
Santa Vitória do Palmar	Pelotas	Planossolo Hidromórfico
Rosário do Sul	São Gabriel	Planossolo Háplico
Paraíso do Sul	Vacacaí	Planossolo Hidromórfico

As amostras foram coletadas na camada superficial (0-20 cm) em cada ponto de coleta, secas ao ar, moídas e peneiradas a 2 mm, sendo que as características químicas e física encontram-se em RANNO (2004). Separou-se uma alíquota de cada solo para determinação da capacidade máxima de adsorção de P (CMAP), baseado em isotermas de adsorção, conforme procedimento descrito em RANNO (2004). Baseado nos resultados do índice SMP, as amostras foram incubadas com calcário (PRNT 75%) na quantidade equivalente para elevar o pH a 5,5. Após a incubação, uma alíquota de cada amostra recebeu adição de P na forma de fosfato de potássio monobásico ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ) calculado para atingir 0,2 mg de  $\text{P L}^{-1}$  na solução do solo em função da CMAP, sendo denominadas de  $\text{P}_0$  (sem aplicação de P) e  $\text{P}_2$  (0,2 mg  $\text{L}^{-1}$  de P na solução do solo) para cada um dos 16 solos.

Inicialmente foi realizado o fracionamento químico do P inorgânico do solo nas amostras de solo corrigidas com calcário, secas, moídas e peneiradas a 1 mm. Seguiu-se a metodologia descrita por KUO (1996) com algumas adaptações. Amostras de 0,2g de solo sofreram extração, seqüencialmente, com  $\text{NH}_4\text{Cl}$  1 mol  $\text{L}^{-1}$ ;  $\text{NH}_4\text{F}$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  pH 8,2;  $\text{NaOH}$  0,1 mol  $\text{L}^{-1}$ ; DCB a 85°C e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,25 mol  $\text{L}^{-1}$ . O P inorgânico dos extratos alcalinos de  $\text{NaOH}$  foi determinado pelo método de DICK & TABATABAI (1977) e o P dos demais extratos foi determinado segundo a metodologia de MURPHY & RILEY (1962).

Para simular as condições de alagamento do solo, uma alíquota de 200 g de cada solo com e sem adição de P foi acondicionada em potes plásticos com capacidade de 0,5 L e adicionou-se água destilada (~300 mL) até a obtenção de uma lâmina de aproximadamente 4 cm no intuito de manter o

ambiente anaeróbico. Estas amostras permaneceram alagadas durante 30 dias em temperatura constante de 30°C ±2°C. Os tratamentos ficaram estruturados em um fatorial 16x2 (16 solos, 2 níveis de P) e os potes dispostos em um delineamento inteiramente casualizado com três repetições por tratamento, totalizando 96 unidades experimentais. Aos 30 dias após o alagamento, drenou-se a água com o auxílio de um sifão e coletou-se, em cada pote, um cilindro de solo através de um dispositivo que se constituiu de uma seringa plástica descartável com a extremidade cortada. Estes cilindros de solo saturado foram pesados e secos em estufa a 105°C até peso constante. Então, conhecendo-se a umidade de cada solo, coletou-se outro conjunto de cilindros de solo conforme metodologia acima e pesou-se uma quantidade de solo úmido correspondente a 0,2 g de solo seco em tubos de centrífuga com capacidade para 15 mL, a fim de se proceder o fracionamento seqüencial conforme descrito para as amostras de solo seco.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de fósforo total, formas de fósforo inorgânico e a sua participação em relação ao fósforo total para os solos sem aplicação de P, antes e após 30 dias de alagamento, estão apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente. Os valores de P total foram variáveis entre os solos estudados, os quais estão na faixa de 69 a 596 mg kg<sup>-1</sup>, sendo que o teor médio de fósforo total para o conjunto de solos estudado foi de 163 mg kg<sup>-1</sup>. MACHADO et al. (1993) estabeleceram uma classificação arbitrária para solos do RS quanto ao teor de fósforo total, considerando-se aqueles que se situam no intervalo de 0 a 500 mg L<sup>-1</sup> como baixos ou pobres; de 500 a 1.000 mg L<sup>-1</sup> como médios; e, acima de 1.000 mg L<sup>-1</sup>, como solos com alto conteúdo de P total. Baseado nesta classificação, apenas o solo coletado no município Camaquã entraria na classe de teores médios de fósforo total, o solo de Torres está muito próximo a esta faixa, e os demais seriam considerados como solos pobres em fósforo total. Estes dados concordam com aqueles obtidos por MACHADO et al. (1993), que estudando as formas de fósforo na camada arável de solos do RS, observaram baixos teores de fósforo total em solos da metade Sul do Estado.

Tabela 2 - Formas de fósforo inorgânico nas amostras de solo seco sem a aplicação de fósforo.

Solo	P Total	Formas de P inorgânico com solo seco				Σ P lábil	% do P Total
		Al-P	Fe-P	Ca-P			
-----mg kg <sup>-1</sup> -----							
Camaquã	596	nd	88	19	107	18	
Torres	449	nd	47	14	61	14	
Dom Pedrito	184	nd	99	5	104	57	
Uruguaiana - 1	189	nd	29	19	48	25	
Uruguaiana - 2	110	nd	67	3	70	64	
Caçapava do Sul	141	nd	19	29	48	34	
Santo Antônio da Patrulha	99	nd	29	5	34	34	
Santa Maria	125	nd	35	5	40	32	
São Gabriel	99	nd	24	4	28	28	
Cachoeirinha	100	nd	19	3	22	22	
Restinga Seca	69	nd	17	7	24	35	
Cachoeira do Sul -1	86	nd	26	4	30	35	
Cachoeira do Sul -2	82	nd	20	2	22	27	
Santa Vitória do Palmar	80	nd	11	2	13	16	
Rosário do Sul	99	nd	18	1	19	19	
Paraíso do Sul	97	nd	23	5	28	29	
MÉDIA	163	nd	36	8	44	31	

nd = não detectado

O conteúdo de fósforo total de cada solo deve estar relacionado a fatores como o material de origem e ao grau de desenvolvimento deste solo (FASSBENDER, 1980). Existe uma variedade muito grande de rochas que deram origem aos solos do Estado do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1973). Na metade Sul, onde tradicionalmente se cultiva o arroz, os solos são originados, principalmente, de basalto e sedimentos de basalto na região da Fronteira Oeste; de arenitos, de siltitos, de argilitos e de folhelhos na Campanha e Depressão Central; e de sedimentos de granito, na região Litoral Sul (SOUSA et

al., 2004). Assim, como o basalto é o material dos solos do RS mais rico em P, espera-se que solos originados desta rocha ou de seus sedimentos apresentem um conteúdo maior de fósforo total. Para os solos originados dos demais materiais, espera-se o desenvolvimento de solos com menores conteúdos de fósforo total, como é o caso da maioria dos solos de várzea do RS.

Em relação ao fracionamento das amostras, não foram detectadas concentrações de fósforo solúvel e fracamente ligado dentro da sensibilidade do método empregado.

Tabela 3 - Formas de P inorgânico nas amostras após 30 dias de alagamento sem a aplicação de P.

Solo	P Total	Formas de P inorgânico				Σ P lábil	% do P Total
		Al-P	Fe-P	Ca-P			
-----mg kg <sup>-1</sup> -----							
Camaquã	596	nd	196	16	212	36	
Torres	449	nd	84	15	99	22	
Dom Pedrito	184	nd	98	6	104	57	
Uruguaiana - 1	189	nd	48	22	70	37	
Uruguaiana - 2	110	nd	48	12	60	55	
Caçapava do Sul	141	nd	54	37	91	65	
Santo Antônio da Patrulha	99	nd	69	4	73	74	
Santa Maria	125	nd	69	6	75	60	
São Gabriel	99	nd	39	6	45	45	
Cachoeirinha	100	nd	55	4	59	59	
Restinga Seca	69	nd	30	9	39	57	
Cachoeira do Sul -1	86	nd	45	5	50	58	
Cachoeira do Sul -2	82	nd	42	2	44	54	
Santa Vitória do Palmar	80	nd	23	2	25	31	
Rosário do Sul	99	nd	23	1	24	24	
Paraíso do Sul	97	nd	51	4	55	57	
MÉDIA	163	nd	61	9	70	49	

nd = não detectado

Resultado semelhante foi encontrado por WILLIAMS et al. (1967), os quais verificaram que esta fração foi insignificante para a maioria dos solos em estudo. Na determinação do P ligado ao Al também não se obteve concentrações de P detectáveis tanto pelo método de MURPHY & RILEY (1962) quanto pelo método de DICK & TABATABAI (1977). FIFE (1962) sugere que a extração com NH<sub>4</sub>F durante 24h ao invés de 1h, como proposto por CHANG & JACKSON (1957), permitiria uma remoção mais apropriada do fósforo ligado ao Al. No entanto, mesmo com esta modificação, este autor afirma que há dificuldades na determinação do Al-P através do NH<sub>4</sub>F, pois os compostos férricos do solo sorvem parte do fósforo solubilizado durante a extração. SMITH (1965) propôs um procedimento para superar esta dificuldade, o qual também não se mostrou inteiramente adequado para obtenção desta fração (WILLIAMS et al., 1967). Como neste trabalho utilizou-se o procedimento original de CHANG & JACKSON (1957), esta seria uma das hipóteses que explica a não extração e quantificação do P-Al nos solos estudados (Tabelas 2 e 3). A outra hipótese seria a maior contribuição relativa das formas de P com os demais componentes do solo (Fe, Ca), diminuindo a importância relativa das formas de P com Al em solos de várzea.

Considerando as formas inorgânicas Fe-P + Ca-P como as mais importantes para a nutrição das plantas em relação ao fósforo total, estas, representam, em média 31% do conteúdo de P total dos solos em estudo antes do alagamento (Tabela 2). Os demais 69% correspondem ao fósforo orgânico e ao fósforo ocluso, os quais são conceitualmente considerados como formas não lábeis de fósforo. Estes dados se assemelham aos obtidos por MACHADO et al. (1993),

onde, da totalidade do fósforo nos solos da região Sul do Estado, as formas inorgânicas ativas ou lábeis constituíam 30%, em média. Este percentual de formas lábeis de P pode privilegiar a nutrição do arroz cultivado nesses solos, comparativamente às espécies cultivadas em solos do planalto do RS, onde esses autores verificaram que apenas 13% do fósforo total foi constituído pelas formas lábeis. A forma Fe-P foi a forma de P inorgânico mais abundante entre as formas ativas antes do alagamento, com uma contribuição média de 82% para o P lábil, seguido do Ca-P, que, em média, contribuiu com 18% do P lábil dos solos (Tabela 2). Isto reforça o fato de que os minerais de Fe sejam os principais controladores da dinâmica do P em ambientes sazonalmente alagados, como os solos de várzea (PATRICK JUNIOR & MAHAPATRA, 1968).

Após o período de 30 dias de alagamento (Tabela 3), observou-se um percentual médio ainda maior das formas inorgânicas ativas ou lábeis em relação ao fósforo total (49%). Provavelmente, este aumento na proporção de formas ativas é resultante da liberação de P anteriormente ocluso pelo revestimento das partículas de argila e silte por óxidos férricos hidratados (PATRICK JUNIOR & MAHAPATRA, 1968), os quais são parcial ou totalmente dissolvidos pela redução do ferro devido ao alagamento e passam a ser acessadas pelo procedimento de fracionamento. Outro fator a ser considerado para explicar o aumento da forma Fe-P com o alagamento é a formação de precipitados de fosfatos de ferro a medida que o curso da redução do solo ocorre, aumentando a participação desta forma de P com o posterior fracionamento. Independentemente da origem, este comportamento pode contribuir para a obtenção de respostas consideravelmente menores à adubação fosfatada em solos

alagados comparativamente a culturas cultivadas no mesmo solo em condição de sequeiro. Com esta modificação na natureza e distribuição das formas de P em função do alagamento, o arroz pode ter acesso a outras formas de P não disponíveis em condições aeróbias.

Após o alagamento, o Fe-P foi novamente a forma de maior contribuição ao P lábil, com um aumento médio de cinco pontos percentuais na sua contribuição em relação ao solo seco, representando 87% nestas condições. Todas estas modificações no ambiente onde se desenvolve o arroz fazem com que vários métodos de extração química de fósforo, os quais podem ser utilizados para avaliar sua disponibilidade em solos e recomendar adubação fosfatada para culturas de sequeiro, geralmente apresentam baixa eficiência na estimativa da disponibilidade de P ao arroz (PATRICK JUNIOR & MAHAPATRA, 1968). Este pode ser o caso da metodologia atualmente empregada para avaliar a disponibilidade de fósforo para as culturas no RS e SC, o extrator Mehlich-1, que além de extrair o P em valores de pH muito baixo, diferente da condição de absorção de nutrientes pelas raízes das plantas, dissolve predominantemente fósforo ligado ao cálcio e alumínio, enquanto que a liberação do fósforo ligado ao ferro é o processo que predominaria com o alagamento do solo (PATRICK JUNIOR & MAHAPATRA, 1968). Assim, parece ser indispensável a avaliação da disponibilidade de P através de uma metodologia que considere a relevância desta forma de P para a nutrição do arroz e sua dinâmica em função do alagamento.

Na seqüência das extrações, buscou-se quantificar o P solúvel em agentes redutores ou P-ocluído, possivelmente relevante na nutrição do arroz em solos alagados (PATRICK JUNIOR & MAHAPATRA, 1968). No entanto, a extração com DCB a 85°C não detectou esta forma de P, pois não se constataram concentrações de fósforo dentro da sensibilidade do método empregado. Isto pode estar relacionado a uma possível incapacidade do DCB em extrair esta forma ou a problemas posteriores a extração, como a readsorção ao solo ou interferências na leitura tanto por MURPHY & RILEY (1962) como por DICK & TABATABAI (1977). Embora relativamente de simples execução, diversos problemas do esquema proposto inicialmente por CHANG & JACKSON (1957) conduziram ao desenvolvimento de novos esquemas de fracionamento. No esquema de fracionamento de HEDLEY et al. (1982), a extração do P inorgânico química e fisicamente protegido nas superfícies internas dos microagregados é realizada com a utilização de ultrasonificação mais NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> ou, na ausência de ultra-som, CONDRON et al. (1985) propôs a substituição desta etapa simplesmente por extração com NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>.

NOVAIS & SMITH (1999) comentam que o P-ocluído é uma forma de grande estabilidade e, por ser de mais difícil extração que as outras, freqüentemente não é determinado em diversos trabalhos. Além disso, estes autores afirmam que, de um modo geral, o P-ocluído não contribui, em curto prazo, para o fornecimento de P às plantas e que é pouco variável em função de alterações no pH do solo ou adições de fertilizantes em curtos períodos. MACHADO et al. (1993), usando o método de CHANG & JACKSON em solos do RS, relatam que os solos da região Sul do Estado, os quais são pouco intemperizados, possuem mais fósforo inorgânico ativo (Al-P, Ca-P e Fe-P) que os solos da região do Planalto, os quais apresentam mais fósforo em formas oclusas, de pouca participação na disponibilidade às plantas. Possivelmente, este fato também contribui para a não detecção do P-ocluído

nas amostras de solos de várzea do RS.

Considerando as amostras de solo sem e com aplicação de P e antes e após o alagamento, as quantidades de Fe-P foram bastante variáveis entre os solos (Tabela 4), com amplitude de 11 a 105 mg kg<sup>-1</sup> no solo seco e de 21 a 222 mg kg<sup>-1</sup> após o alagamento por 30 dias. Em todos os solos, exceto naqueles coletados em Dom Pedrito e Uruguaiana-02, houve aumentos expressivos na quantidade de Fe-P em função do alagamento, cujo aumento médio da fração foi próximo a 100%. SAH & MIKKELSEN (1986) também verificaram aumento na fração Fe-P durante o alagamento. A magnitude do incremento na fração foi bastante variável em função dos solos, sendo que o maior aumento ocorreu no 1º mês com tendência posterior de estabilização. Estes autores atribuem os aumentos nesta fração com o alagamento a possível transformação da variscita e strengita em vivianita [Fe<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>.8H<sub>2</sub>O], o qual se torna o mineral mais estável com o decréscimo do potencial redox durante o alagamento. Também haveria a possibilidade de liberação de P ocluído com a dissolução dos óxidos de Fe e Al que revestem a argila em função do aumento de pH resultante do alagamento.

Na Tabela 5 encontra-se a mudança na forma Ca-P, a qual é insolúvel em DCB e foi extraída com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, finalizando o esquema de fracionamento. Observa-se que, analogamente à forma Fe-P mas com uma menor amplitude, houve uma variação quando comparamos os diferentes solos de várzea. Antes do alagamento, os teores extraídos variaram de 1,2 a 30,5 mg kg<sup>-1</sup> e, após o período de 30 dias de alagamento, a amplitude foi de 1,3 a 37,9 mg kg<sup>-1</sup> para os solos estudados. Para a grande maioria dos solos, houve um aumento da forma Ca-P após 30 dias de alagamento, sendo que para estes solos os aumentos médios foram de aproximadamente 36%. Embora os aumentos percentuais tenham sido elevados para alguns solos, as mudanças quantitativas foram pequenas se considerarmos as magnitudes dos compartimentos Ca-P e Fe-P nos solos, evidenciando uma pequena contribuição da forma Ca-P com o alagamento. SAH & MIKKELSEN (1986) comentam que em função do grande acréscimo na pressão de CO<sub>2</sub> no solo alagado, aumenta a solubilidade do CaCO<sub>3</sub> e outros sais de Ca, levando a um acréscimo da atividade do Ca<sup>+2</sup>. Como a concentração de fosfato na solução também aumenta com o alagamento, haveria a possibilidade de precipitação de Ca<sup>+2</sup> e fosfato, proporcionando um acréscimo na fração Ca-P em alguns solos.

Mesmo antes do alagamento, alguns solos apresentaram quantidades consideráveis de P na forma P-Ca.

Isto pode estar relacionado ao grau de intemperismo destes solos. Conforme NOVAIS & SMITH (1999), solos menos intemperizados, ricos em Ca trocável e de pH elevado, deverão ser mais ricos em P-Ca e pobres em P-Fe e P-Al. Um outro aspecto a considerar, segundo estes autores, é a realização de calagem. Para os solos em estudo houve a correção da acidez buscando a elevação do pH a 5,5 e, desta maneira, é possível que parte do P-Ca extraído com H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> teve influência da adição de calcário, em função do acréscimo da atividade de Ca<sup>+2</sup> e possibilidade de precipitação com o fosfato.

O principal motivo para a baixa eficiência dos métodos de análise empregado para avaliar a disponibilidade de fósforo para o arroz irrigado, como o método Mehlich-1, é o fato que a extração do P em amostras de solo seco não prevê as alterações na quantidade de fósforo disponível com os processos de redução do solo proporcionada pelo alagamento, cuja intensidade varia de solo para solo.

Tabela 4 - Modificações na fração Fe-P decorrentes do alagamento durante 30 dias dos solos em amostras sem e com aplicação de P.

Solo	Nível de P aplicado	Fração Fe-P		Variação em função do alagamento
		Antes do alagamento	Após o alagamento	
		-----mg kg <sup>-1</sup> -----		%
Camaquã	P <sub>0</sub>	88,1	196,1	+123
	P <sub>2</sub>	98,4	222,3	+126
Torres	P <sub>0</sub>	46,9	83,8	+79
	P <sub>2</sub>	59,7	135,3	+126
Dom Pedrito	P <sub>0</sub>	99,4	98,1	-1
	P <sub>2</sub>	105,4	101,4	-4
Uruguaiana – 1	P <sub>0</sub>	29,0	48,2	+66
	P <sub>2</sub>	31,2	52,6	+68
Uruguaiana – 2	P <sub>0</sub>	67,4	47,8	-29
	P <sub>2</sub>	67,6	50,6	-25
Caçapava do Sul	P <sub>0</sub>	19,4	54,1	+180
	P <sub>2</sub>	22,6	72,3	+220
Santo Antônio da Patrulha	P <sub>0</sub>	29,0	68,8	+137
	P <sub>2</sub>	34,3	74,9	+118
Santa Maria	P <sub>0</sub>	34,5	68,8	+99
	P <sub>2</sub>	39,3	77,8	+98
São Gabriel	P <sub>0</sub>	24,2	39,1	+62
	P <sub>2</sub>	44,0	44,8	+2
Cachoeirinha	P <sub>0</sub>	19,3	54,7	+182
	P <sub>2</sub>	24,9	57,2	+130
Restinga Seca	P <sub>0</sub>	16,7	30,2	+80
	P <sub>2</sub>	23,3	41,9	+80
Cachoeira do Sul -1	P <sub>0</sub>	26,4	45,1	+71
	P <sub>2</sub>	28,9	44,5	+54
Cachoeira do Sul -2	P <sub>0</sub>	19,8	41,6	+110
	P <sub>2</sub>	22,3	43,5	+96
Santa Vitória do Palmar	P <sub>0</sub>	11,5	22,8	+99
	P <sub>2</sub>	12,2	21,5	+75
Rosário do Sul	P <sub>0</sub>	17,8	22,6	+27
	P <sub>2</sub>	17,8	22,4	+26
Paraíso do Sul	P <sub>0</sub>	23,0	51,4	+124
	P <sub>2</sub>	26,1	48,0	+84

P<sub>0</sub> = sem aplicação de P; e P<sub>2</sub> = P adicionado para atingir 0,2 mg L<sup>-1</sup> de P na solução do solo.

Segundo GRANDE et al. (1986), o método Mehlich-1 realiza a extração em valores de pH muito baixo (aproximadamente 2,5), ambiente desfavorável para estimar as frações de fósforo disponibilizadas com o alagamento do solo. Este comportamento também estaria relacionado ao fato de que os extratores ácidos dissolvem predominantemente P-Ca e P-Al e a liberação do fósforo ligado ao ferro (P-Fe) seria o processo que predominaria com o alagamento do solo (PATRICK JUNIOR & MAHAPATRA, 1968). A estimativa da disponibilidade de P em solos de várzea provavelmente seria melhorada com o desenvolvimento de metodologia que

considerasse as características dos solos que determinam a intensidade dos processos que ocorrem com o fósforo. O conhecimento das formas de P inorgânico predominantes nos solos de várzea do RS também seria uma importante ferramenta para o desenvolvimento de metodologias de extração de P que são disponíveis ao arroz após o alagamento. Possivelmente, a utilização desses princípios na escolha do método (princípio de extração) e/ou inclusão de novas variáveis na interpretação dos teores extraídos podem fornecer bons resultados para o aperfeiçoamento da recomendação de adubação fosfatada para o arroz irrigado.

Tabela 5 - Modificações na fração Ca-P decorrentes do alagamento durante 30 dias dos solos em amostras sem e com aplicação de P.

Solo	Nível de P aplicado	Fração Ca-P		Variação em função do alagamento
		Antes do alagamento	Após o alagamento	
		-----mg kg <sup>-1</sup> -----		
Camaquã	P <sub>0</sub>	18,8	16,1	-14
	P <sub>2</sub>	19,3	16,5	-14
Torres	P <sub>0</sub>	13,5	14,8	+9
	P <sub>2</sub>	16,9	16,9	0
Dom Pedrito	P <sub>0</sub>	5,3	6,1	+15
	P <sub>2</sub>	5,1	6,0	+17
Uruguaiana – 1	P <sub>0</sub>	19,3	21,9	+13
	P <sub>2</sub>	18,4	22,6	+23
Uruguaiana – 2	P <sub>0</sub>	2,7	11,6	+325
	P <sub>2</sub>	4,0	18,2	+349
Caçapava do Sul	P <sub>0</sub>	29,0	37,1	+28
	P <sub>2</sub>	30,5	37,9	+24
Santo Antônio da Patrulha	P <sub>0</sub>	4,9	4,5	-8
	P <sub>2</sub>	4,0	4,3	+8
Santa Maria	P <sub>0</sub>	4,8	6,0	+25
	P <sub>2</sub>	5,5	5,9	+8
São Gabriel	P <sub>0</sub>	3,9	5,7	+45
	P <sub>2</sub>	4,0	6,0	+47
Cachoeirinha	P <sub>0</sub>	2,9	3,7	+29
	P <sub>2</sub>	3,0	3,2	+5
Restinga Seca	P <sub>0</sub>	7,0	8,6	+23
	P <sub>2</sub>	6,2	8,9	+43
Cachoeira do Sul -1	P <sub>0</sub>	3,8	5,5	+44
	P <sub>2</sub>	3,9	4,9	+24
Cachoeira do Sul -2	P <sub>0</sub>	2,0	2,3	+18
	P <sub>2</sub>	1,9	2,5	+33
Santa Vitória do Palmar	P <sub>0</sub>	1,8	1,9	+4
	P <sub>2</sub>	1,8	2,4	+37
Rosário do Sul	P <sub>0</sub>	1,3	1,3	0
	P <sub>2</sub>	1,2	1,7	+43
Paraíso do Sul	P <sub>0</sub>	4,7	4,3	-8
	P <sub>2</sub>	5,5	4,6	-16

P<sub>0</sub> = sem aplicação de P; e P<sub>2</sub> = P adicionado para atingir 0,2 mg L<sup>-1</sup> de P na solução do solo.

#### CONCLUSÕES

Há uma grande variação nos teores de P total e na distribuição das formas de P inorgânico dos solos de várzea do RS, os quais apresentam, em sua grande maioria, baixos teores de P total.

A forma Fe-P é a principal forma de P inorgânico em solos de várzea, a qual aumenta sua proporção com o alagamento do solo.

#### REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul**. Recife: Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica, 1973. 431 p. (Boletim Técnico, 30)
- CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Oxford, v.84, p. 133-144, 1957.
- CHANG, S.C. **Evaluation of the fertility of rice soils**. Los Banos: International Research Institute, 1978. p. 521-541.

- CONDRON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by  $^{31}\text{P}$  nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.36, n.1, p.199-207, 1985.
- DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.6, n.1, p. 82-85, 1977.
- FASSBENDER, H.W. **Química de suelos**. San José: Instituto Interamericano de Ciências Agrícolas, 1980. 398p.
- FIFE, C.V. An evaluation of ammonium fluoride as a selective extractant for aluminum-bound soil phosphate. **Soil Science**, Oxford, v. 93, p.113-123, 1962.
- GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. Santa Maria, 2003. 231f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria.
- GRANDE, M.A.; CURI, N.; QUAGGIO, J.A. Disponibilidade de fósforo pelos extratores de Mehlich e Resina, em solos cultivados com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, n.1, p.45-50, 1986.
- HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, n.4, p. 970-976, 1982.
- KUO, S. Phosphorus. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A. et al. (Eds.) **Methods of Soil Analysis: Chemical Methods**. Madison: SSSA, 1996. p. 869-920.
- MACHADO, M. I. C. S.; BRAUNER, J. L.; VIANNA, A. C. T. Formas de fósforo na camada arável de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.3, p. 331-336, 1993.
- MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Oxford, v.27, p.31-36, 1962.
- NOVAIS, R. F.; SMITH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Editora da UFV, 1999. 399p.
- PATRICK JUNIOR, W.H.; MAHAPATRA, I.C. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.20, p.323-359, 1968.
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemical of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.24, p.29-96, 1972.
- RANNO, S.K. **Estimativa da disponibilidade de fósforo para a cultura do arroz irrigado em solos do RS**. Santa Maria, 2004. 139f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria.
- SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S. Transformations of inorganic phosphorus during the flooding and draining cycles of soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.50, p. 62-67, 1986.
- SMITH, A.N. Distinction between iron and aluminum phosphate in Chang and Jackson's procedure for fractionating inorganic soil phosphorus. **Agrochimica**, Bolzano, v.9, p.162-168, 1965.
- SOUSA, R.O.; GOMES, A.S.; VAHL, L.C. Toxidez por ferro em arroz irrigado. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. (Eds.) **Arroz irrigado no sul do Brasil**. 1.ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004. p.305-337.
- STRECK, E. V.; KAMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Departamento de Solos-UFRGS/EMATER, 2002. 107p.
- WILLIAMS, J.D.H.; SYERS, J.K.; WALKER, T.W. Fractionation of soil inorganic phosphate by a modified Chang & Jackson's procedure. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.31, p.736-739, 1967.
- VAHL, L.C. **Toxidez de ferro em genótipos de arroz irrigado por alagamento**. Porto Alegre, 1991. 173f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- VAHL, L.C. Fertilidade de solos de várzea. In: GOMES, A.S.; PAULETTO, E.A. (Eds.) **Manejo do solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p.119-162.