

## ESPÉCIES DE FÓSFORO NA SOLUÇÃO DE SOLOS CULTIVADOS COM ARROZ IRRIGADO POR ALAGAMENTO NO RIO GRANDE DO SUL <sup>(1)</sup>

### *SPECIES OF PHOSPHORUS IN THE SOLUTION IN CULTIVATED SOILS WITH FLOODED RICE IN THE RIO GRANDE DO SUL STATE, BRAZIL <sup>(1)</sup>*

GUSTAVO KRÜGER GONÇALVES<sup>1\*</sup>; EGON JOSÉ MEURER<sup>2</sup>.

#### RESUMO

Solos originados de diferentes materiais de origem, com características mineralógicas, químicas e físicas diferenciadas, podem afetar as espécies de fósforo presentes na solução do solo. Este estudo foi realizado com o objetivo de verificar as espécies de fósforo presentes da solução dos solos Planossolo (derivado de granito), Luvisso, Vertissolo e Chernossolo (derivados de sedimentos de basalto) com a utilização do modelo de especiação MinteqA2. Os solos foram cultivados com plantas de arroz em recipientes de vidro e receberam, previamente à semeadura duas doses de fósforo 0 e 39,30 mg kg<sup>-1</sup> de P. Nos quatro solos a espécie de fósforo predominante aos 14 e 28 dias após o alagamento foi a H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, enquanto que em menores proporções ocorreram às espécies HPO<sub>4</sub>, FeHPO<sub>4</sub> e FeH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>.

**Palavras-chave:** especiação, MinteqA2, ferro, fósforo, solos reduzidos.

#### ABSTRACT

Soils originated of origin different materials, with distinct mineralogical, chemical and physical characteristics can affect the present phosphorus species in the soil solution. The objective of this work was to verify the phosphorus species present in the soil solution with the speciation model utilization MinteqA2. The soils were cultivated with rice plants and received, previously to the sowing two phosphorus rates 0 e 39,30 mg of P kg<sup>-1</sup>. In four soils the phosphorus species predominant at 14 and 28 days after the flooding was H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> while in smaller proportions would be present the species HPO<sub>4</sub>, FeHPO<sub>4</sub> and FeH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>.

**Terms of indexation:** speciation, MinteqA2, iron, phosphorus, reduced soils.

#### INTRODUÇÃO

A cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul ocorre em solos oriundos de sedimento de arenito, siltito, granito e basalto, os quais apresentam diferentes características mineralógicas que, provavelmente proporcionam variações nas características eletroquímicas e químicas da solução.

Em ambiente anaeróbio as primeiras alterações químicas que ocorrem na solução é a mudança na dinâmica do nitrogênio. O nitrato é o primeiro composto oxidado do solo a ser utilizado pelos microorganismos anaeróbios, após o desaparecimento do oxigênio, sendo rapidamente reduzido às formas voláteis N<sub>2</sub>O e N<sub>2</sub> (PONNAMPERUMA, 1978). Posteriormente, a redução dos óxidos mangânicos a óxidos manganosos, ocorre à redução dos óxidos férricos (Fe<sup>3+</sup>) a óxidos ferrosos (Fe<sup>2+</sup>) realizada pelas bactérias redutoras de ferro, proporcionando aumento na solubilidade desse elemento. A concentração de ferro na solução depende do pH, do teor e tipo de matéria orgânica e dos teores e da reatividade dos óxidos de ferro. PATRICK & REDDY (1978) observaram maiores concentrações de ferro solúvel em pH 5,0 quando comparados a valores mais altos de pH. Isso se deve à precipitação de ferro em formas de hidróxidos com a elevação do pH. As concentrações de ferro solúvel são mais altas em solos ácidos, com altos teores de matéria orgânica e óxidos férricos podendo atingir valores superiores a 300 mg L<sup>-1</sup> (PONNAMPERUMA, 1978). Segundo MUNCH & OTTOW (1980) os óxidos de ferro de baixa cristalinidade (ferrihidrita e lepidocrocita) são mais rapidamente reduzidos do que os óxidos de ferro cristalino (goethita e hematita) em condições anaeróbias.

Segundo PONNAMPERUNA (1972), o fósforo não está diretamente envolvido nas reações de oxirredução, mas devido à sua reatividade com elementos redox, principalmente o ferro, seu comportamento é

<sup>1</sup> Parte da Tese de Doutorado em Ciência do Solo do primeiro autor, apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) em maio de 2007.

<sup>1\*</sup> Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo –UFRGS. Bolsista CAPES. E-mail: gutosolos@ibest.com.br

<sup>2</sup> Professor Associado do Departamento de Solos da UFRGS. E-mail: egon.meurer@ufrgs.br

(Recebido para Publicação em 10/12/2008, Aprovado em 18/04/2011)

afetado pela redução do solo.

Quando os solos são reduzidos, a disponibilidade de fósforo em solos ácidos poderá ser resultante dos seguintes fatores: redução do  $\text{Fe}^{+3}$  a  $\text{Fe}^{+2}$ , redução do  $\text{Mn}^{+4}$  a  $\text{Mn}^{+2}$ , adsorção de fósforo, dissolução dos fosfatos minerais secundários, acréscimo no fator difusibilidade, mineralização do fósforo orgânico e complexação de cátions.

A redução do  $\text{Fe}^{+3}$  a  $\text{Fe}^{+2}$  é considerado por inúmeros pesquisadores como fator principal para o aumento da disponibilidade de fósforo em solos reduzidos. A redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos está diretamente envolvida com a liberação do fósforo adsorvido na solução. Além disso, esta reação também envolve o consumo de íons hidrogênios, aumentando o pH da solução. O efeito deste na dessorção de ânions é resultado de mudanças nas cargas líquidas nas superfícies das partículas do solo. Quando o pH do solo for maior que o ponto de carga zero (PCZ), existe aumento das cargas negativas e maior competição de íons  $\text{OH}^-$  e ácidos orgânicos pelos sítios de sorção ocorrendo uma repulsão dos fosfatos, aumentando a concentração dos íons  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e  $\text{HPO}_4^{2-}$  na solução (SPOSITO, 1989).

A importância da redução dos óxidos mangânicos ( $\text{Mn}^{+4}$ ) a óxidos manganosos ( $\text{Mn}^{+2}$ ) no aumento da disponibilidade de fósforo é encontrada em poucos trabalhos. SHAHANDEH et al. (2003) avaliaram a influência dos óxidos de manganês na disponibilidade de fósforo em vários períodos de alagamento. A contribuição da redução dos óxidos de manganês na disponibilidade de fósforo foi importante nos estágios iniciais de redução dos solos somente naqueles que apresentavam predominância de óxidos de manganês de baixa cristalinidade. WILLET (1989) estudou o efeito da redução dos óxidos mangânicos a manganosos na liberação de fósforo em 18 solos dos Estados Unidos. Foi observado que a redução dos óxidos mangânicos a óxidos manganosos estava altamente correlacionada com a liberação de fósforo somente em um dos solos, o qual apresentava elevados teores de óxidos de manganês de baixa cristalinidade.

O mecanismo de sorção de fósforo em solos reduzidos está relacionado com os teores e morfologia dos óxidos de ferro, tempo de ocorrência da redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos e o pH da solução do solo. A sorção de fósforo provavelmente ocorre em solos alagados nas seguintes situações: a) anteriormente ao processo de redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos; b) durante o processo de redução dos óxidos férricos a óxidos ferrosos, devido à precipitação de fosfatos ferrosos, pois estes compostos têm a solubilidade diminuída com aumento do pH (PATRICK et al., 1973). O aumento do pH provoca, também, a precipitação de óxidos de ferro de baixa cristalinidade, de alta área superficial específica, proporcionando elevada capacidade de sorção de fósforo (KHALID et al., 1977; SAH et al., 1989). HOLFORD & PATRICK JR

(1979), estudando os efeitos da redução do solo e mudanças de pH na sorção de fósforo em solos reduzidos, observaram um aumento na precipitação de hidróxidos de ferro  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  e subsequente sorção de ortofosfato ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) com a elevação do pH de 5 a 6,5. ZHANG et al., (1999) avaliaram o efeito de placas (ferro precipitado) na absorção de fósforo pela cultura de arroz em solução nutritiva. Foram utilizadas diferentes concentrações de  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  na solução nutritiva equivalentes de 0 até  $50 \text{ mg L}^{-1}$  Fe. Os autores observaram que valores acima de  $30 \text{ mg L}^{-1}$  proporcionaram aumento na adsorção de fósforo.

HUGUENIN-ELIE et al. (2003) observaram que as plantas de arroz crescendo em solo reduzido foram capazes de solubilizar o fósforo devido a uma indução da acidificação na rizosfera, provocada pela alta absorção de cátions, fazendo com que o pH da solução do solo não proporcionasse a precipitação de óxidos de ferro de baixa cristalinidade.

Desta forma, os fatores principais na disponibilidade de fósforo são atribuídos aos teores e formas dos óxidos de ferro, às mudanças no potencial redox e pH durante a redução do solo explicando o porquê da obtenção de resultados contraditórios em relação à dessorção de fósforo em solos reduzidos, seja pelo aumento (PONNAMPERUMA, 1972; KRAIRAPANOND & PATRICK JR. 1993) ou pela diminuição (WILLET & HIGGINS, 1978; PHILLIPS & GREENWAY, 1998). A diminuição do potencial redox causa a redução do  $\text{Fe}^{3+}$ , enquanto o pH controla a dissolução e subsequente reprecipitação dos compostos reduzidos, afetando a disponibilidade de fósforo às plantas.

No Rio Grande do Sul, observou-se que as diferentes características mineralógicas influenciaram nos valores de pH e nas concentrações de cátions e ânions na solução durante o período de alagamento. SOUSA (2001) observou que num Plintossolo, oriundo de sedimento de basalto, que a redução do manganês e do ferro foi mais lenta do que num Planossolo. Resultados semelhantes foram observados por GONÇALVES et al. (2008) que constatou que num Cambissolo, oriundo de sedimento de basalto, também ocorreu valores de pH na solução e solubilização diferenciada do cálcio e fósforo em relação a um Planossolo.

Recentemente, pesquisadores têm utilizado a especiação iônica, através de programas de equilíbrio termodinâmico GEOCHEM (MATTIGOD & SPOSITO, 1979) e o MINTEQA2 (ALLISON et al. 1991), objetivando prever a dissolução e a precipitação de formas iônicas, possibilitando diagnosticar a composição da solução do solo. Em função do exposto, o objetivo deste trabalho foi determinar as espécies de fósforo na solução dos solos Planossolo (derivado de sedimentos de granito), Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo (derivados de sedimentos de basalto) utilizando o modelo de especiação MinteqA2.

## MATERIAL E MÉTODOS

Conduziu-se um experimento em recipiente de vidro, na casa de vegetação do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS, no período de dezembro de 2005 a fevereiro de 2006 utilizando-se amostras dos seguintes solos coletados no estado do Rio Grande do Sul: a) Planossolo háplico eutrófico solódico; b) Luvisolo crômico pálico abruptico; c) Vertissolo ebânico órtico típico; d) Chernossolo ebânico carbonático vértico. Atributos selecionados destes solos são apresentados na Tabela 1. O experimento se constituiu por um fatorial 4x2, delineado em blocos ao acaso, com 3 repetições, onde foram estudados os fatores e níveis especificados a seguir: a) Solos: Planossolo, Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo; b) Superfosfato triplo: ausência e presença (39,30 mg kg<sup>-1</sup> de P).

Amostras da camada superficial dos solos (0-20 cm) foram expostas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras de 2 mm de malha, sendo posteriormente, colocadas em recipientes de vidro de 2,5 dm<sup>3</sup> (unidade experimental) na quantidade de 2,2 kg de solo seco. A fonte de fósforo utilizada foi moída e passada em peneira de 0,297 mm para uniformizar o tamanho das partículas. À medida que as amostras do solo foram homogeneizadas, com ou sem superfosfato triplo, nas unidades experimentais, acomodou-se os sistemas de coleta de solução desenvolvidos por SILVA et al. (2002), de modo que ficassem a uma profundidade de 10 cm. Posteriormente, foram retiradas 50 g de solo das unidades experimentais para determinação dos teores de óxidos de ferro e de manganês (oxalato de amônio pH 6,0 e 3,0 e ditonito bicarbonato de sódio). A determinação das formas dos óxidos de ferro e de manganês foram feitas segundo metodologia de ME

HRA & JACKSON (1960) e SCHWERTMANN (1964).

Após a aplicação dos tratamentos, os solos receberam 8 sementes da cultivar IRGA 417 e foram mantidos com umidade gravimétrica em torno de 18%, pela adição de água destilada até o estágio V3 (COUNCE et al., 2000). Neste estágio, foi realizado primeiramente o desbaste, deixando-se 3 plantas por unidade experimental e posteriormente foi realizada a aplicação de nitrogênio na dose de 20 kg ha<sup>-1</sup>, na forma de uréia. Após, as unidades experimentais foram alagadas com água destilada, mantendo-se uma lâmina de água de 5 cm de altura durante 35 dias de alagamento.

Aos 14 e 28 dias de alagamento, posteriormente a coleta de solução por sucção, as análises de Eh e pH da solução dos solos foram realizadas através de eletrodos específicos, ligados a um potenciômetro e previamente instalados em um recipiente de vidro, semelhante ao que foi utilizado por BOHNEN et al. (2005). Após as determinações das características eletroquímicas na solução do solo, aproximadamente 20 mL de solução foram filtrados diretamente para frascos de vidro, onde havia sido colocado 2 mL de HCl 1,1 mol L<sup>-1</sup>, para que a concentração final de HCl da amostra ficasse em torno de 0,1 mol L<sup>-1</sup>, possibilitando desta maneira a análise em laboratório das concentrações de manganês, ferro, cálcio e magnésio, por espectroscopia de absorção atômica (Perkin Elmer, 403), potássio por fotometria de chama (Digimed, NK-2000), sulfato e fósforo por fotocolorímetro (Varian series 634). O carbono orgânico dissolvido foi obtido em analisador automático de carbono ("TOC analyzer" Shimadzu). Posteriormente, nos períodos de alagamento já mencionados, foram preditas as espécies iônicas presentes na solução pela utilização do software Min-*teq* A2.

Tabela 1. Atributos das amostras dos solos Planossolo, Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo

	Planossolo	Luvisolo	Vertissolo	Chernossolo
Material de origem	granito	basalto	basalto	Basalto
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	200	230	320	280
M.O. (g kg <sup>-1</sup> )	22	17	43	26
pH H <sub>2</sub> O	4,7	4,3	5,5	4,9
K (mg kg <sup>-1</sup> )	61	80	102	114
P (mg kg <sup>-1</sup> )	3,0	2,5	2,9	2,7
m (%)	8,9	2,5	2,9	2,7
FeO <sub>6</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	0,37	0,92	1,35	1,45
Fed (g kg <sup>-1</sup> )	5,50	8,00	10,70	10,80
MnO <sub>6</sub> (g kg <sup>-1</sup> )	0,12	0,36	0,49	0,70
Mnd (g kg <sup>-1</sup> )	1,65	2,20	2,20	2,60

FeO<sub>6</sub>: ferro extraído com oxalato de amônio a pH 6,0

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A especiação de fósforo realizada aos 14 dias de alagamento indicou a predominância da espécie H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> na ausência e presença de superfosfato triplo em todos os solos (Figuras 1 a 4). Isso se deve aos

valores de pH atingidos neste período em todos os solos (Tabela 2), os quais favoreceram a presença da espécie H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> em relação a espécie HPO<sub>4</sub>. A espécie H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> ocorre predominantemente na faixa de pH 4 a 7,2, sendo que a espécie HPO<sub>4</sub> começa a aparecer com o pH próximo a 6,0 (LINDSAY, 1979).

Tabela 2. Valores de pH na solução dos solos Planossolo, Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo aos 14 e 28 dias de alagamento.

Solos	Superfosfato triplo	
	sem	Com
aos 14 dias de alagamento		
Planossolo	5,48	5,32
Luvisolo	5,25	5,07
Vertissolo	5,04	4,85
Chernossolo	4,93	4,79
aos 28 dias de alagamento		
Planossolo	6,13	5,94
Luvisolo	5,96	5,74
Vertissolo	5,52	5,22
Chernossolo	5,53	5,35

Além das espécies livres, observou-se a formação das espécies  $\text{Fe}_2\text{HPO}_4$  e  $\text{FeHPO}_4$  na ausência e presença de superfosfato triplo em todos os solos. Esses pares iônicos formados são atribuídos à redução dos óxidos férricos a ferrosos, de maior solubilidade e afinidade com o fósforo na solução.

Na ausência e presença de superfosfato triplo, a menor intensidade de formação das espécies  $\text{CaH}_2\text{PO}_4$  e  $\text{CaHPO}_4$  em relação às espécies  $\text{FeH}_2\text{PO}_4$  e  $\text{FeHPO}_4$  podem ser atribuídas em parte à formação dos pares iônicos  $\text{CaSO}_4$  e  $\text{CaCOD}$  e também pela

maior concentração relativa do ferro em relação aos demais cátions ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ ), observadas pela fração molar de ferro, principalmente no solo Planossolo e Luvisolo (Tabela 3). Segundo WOLT (1994), a tendência de formação de complexos de esfera externa, intermediário ou interna, se deve à atuação do ortofosfato como base dura de Lewis, (doador de elétrons), e/ou à atuação dos metais como ácidos duros ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ), intermediários ( $\text{Fe}^{+2}$ ) ou moles de Lewis (Cu, Pb), já que apresentam orbitais vagos para a recepção de elétrons.

Tabela 3. Fração molar de ferro na solução dos solos Planossolo, Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo aos 14 e 28 dias de alagamento na ausência e presença de superfosfato triplo

Solos	Superfosfato triplo	
	sem	com
	----- % -----	
	aos 14 dias de alagamento	
Planossolo	64,7	52,6
Luvisolo	44,8	33,9
Vertissolo	13,6	7,7
Chernossolo	11,3	7,8
	aos 28 dias de alagamento	
Planossolo	58,6	47,5
Luvisolo	59,1	45,5
Vertissolo	29,6	19,6
Chernossolo	37,1	29,3

\* Fração molar de ferro= concentração relativa do ferro em relação à soma das concentrações dos cátions divalentes ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Mn}^{+2}$ ,  $\text{K}^+$ )

As maiores concentrações de sulfato neste período em relação ao fósforo (Tabela 4) proporcionaram a formação dos pares iônicos  $\text{FeSO}_4$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgSO}_4$  e  $\text{MnSO}_4$ , as quais provavelmente diminuiram a formação dos pares iônicos  $\text{FeH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{FeHPO}_4$ ,  $\text{CaH}_2\text{PO}_4$  e  $\text{CaHPO}_4$ ,  $\text{MgHPO}_4$  e  $\text{MnHPO}_4$ . Em condições de se-

melhantes concentrações de sulfato e fósforo na solução, espera-se que o fósforo tenha preferência pela formação de pares iônicos, devido à sua maior afinidade com os cátions, originada pela maior carga efetiva negativa, em relação ao sulfato (MCBRIDE, 1994).

Tabela 4. Concentração de fósforo na solução do Planossolo, Luvissolo, Vertissolo e Chernossolo aos 14 e 28 dias de alagamento.

Solos	Superfosfato triplo	
	sem	com
----- mg L <sup>-1</sup> -----		
aos 14 dias de alagamento		
Planossolo	0,13 (6,9x)	0,35 (3,0x)
Luvissolo	0,06 (13,3x)	0,22 (3,4x)
Vertissolo	0,03 (56,7x)	0,16 (11,6x)
Chernossolo	0,03 (51,3x)	0,14 (11,6x)
aos 28 dias de alagamento		
Planossolo	0,10 (8,0x)	0,41 (2,6x)
Luvissolo	0,11 (6,7x)	0,36 (2,1x)
Vertissolo	0,05 (33,0x)	0,28 (6,4x)
Chernossolo	0,06 (24,3x)	0,32 (5,0x)

Os números entre parênteses representam quantas vezes a concentração de sulfato foi maior do que a concentração de fósforo.

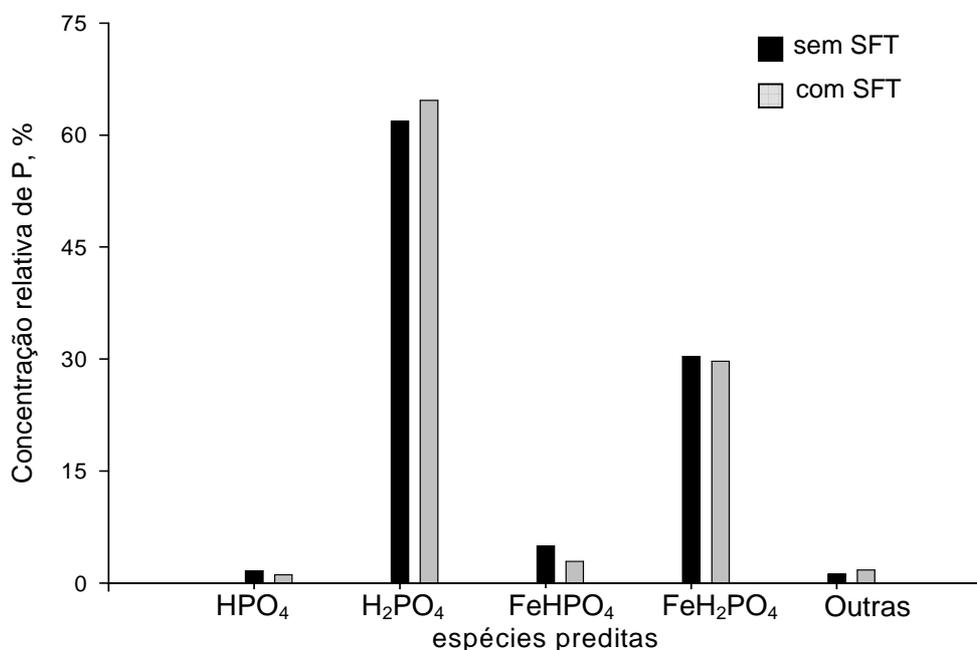


Figura 1. Concentração das espécies previstas de fósforo na solução do Planossolo em função da ausência e presença de SFT aos 14 dias de alagamento.

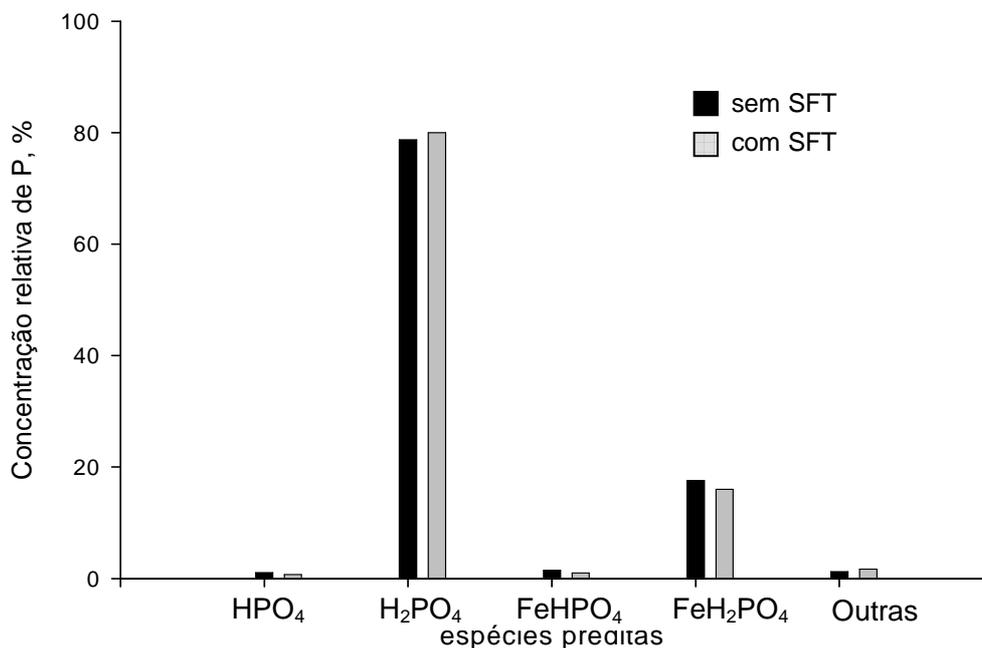


Figura 2. Concentração das espécies previstas de fósforo na solução do Luvissole em função da ausência e presença de SFT aos 14 dias de alagamento.

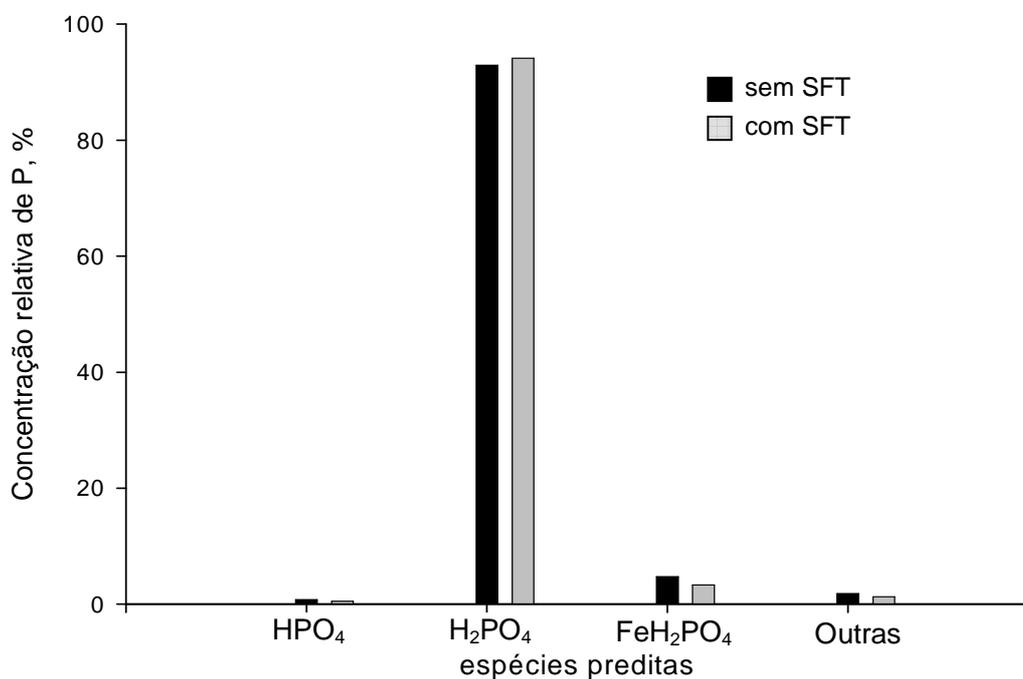


Figura 3. Concentração das espécies previstas de fósforo na solução do Vertissolo em função da ausência e presença de SFT aos 14 dias de alagamento.

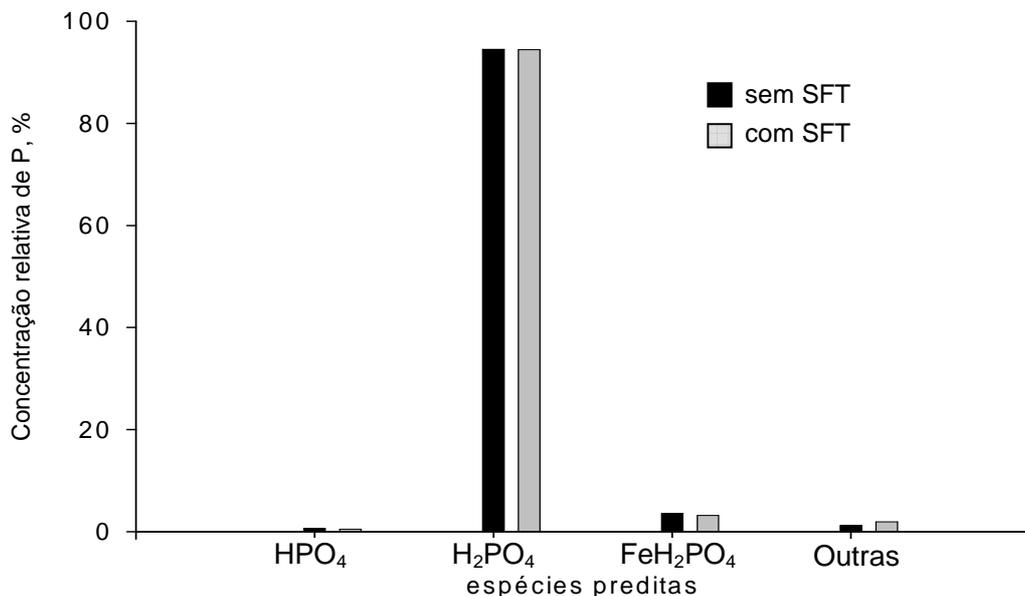
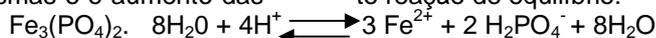


Figura 4. Concentração das espécies previstas de fósforo na solução do Chernossolo em função da ausência e presença de SFT aos 14 dias de alagamento.

A especiação de fósforo realizada aos 28 dias de alagamento indicou a predominância das espécies H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> e FeH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> na ausência e presença de superfosfato triplo (Figuras 5 a 8). Entretanto, quando comparados aos 14 dias de alagamento (Figuras 1 a 4), observou-se diminuição das mesmas e o aumento das



Na ausência e presença de superfosfato triplo em todos os solos, observou-se maior formação dos pares iônicos CaHPO<sub>4</sub> e CaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> (Figuras 5 a 8) quando comparados aos 14 dias de alagamento (Figuras 1 a 4). Isso se deve aos valores de pH atingidos (Tabela 4) e também pela maior redução dos solos observada nesse período em relação aos 14 dias de alagamento, favorecendo o deslocamento de cálcio dos sítios de troca pelo ferro para a solução do solo. Isso pode ser corroborado pela alta concentração relativa de ferro

espécies HPO<sub>4</sub> e FeHPO<sub>4</sub>. Isso se deve aos valores de pH atingidos aos 28 dias de alagamento (Tabela 2), favorecendo a formação dessas espécies. Nos solos Planossolo e Luvisolo, foram também previstas a formação do mineral vivianita, a qual apresenta a seguinte reação de equilíbrio:

observada nos solos Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo na ausência e presença de superfosfato triplo (Tabela 3).

Em função da maior concentração de cátions na solução e conseqüentemente maior formação de pares iônicos observadas em todos os solos, é de se esperar que a difusão de formas livres de fósforo na solução até as raízes, para a absorção pelas plantas, tenha diminuído quando comparadas aos 14 dias de alagamento.

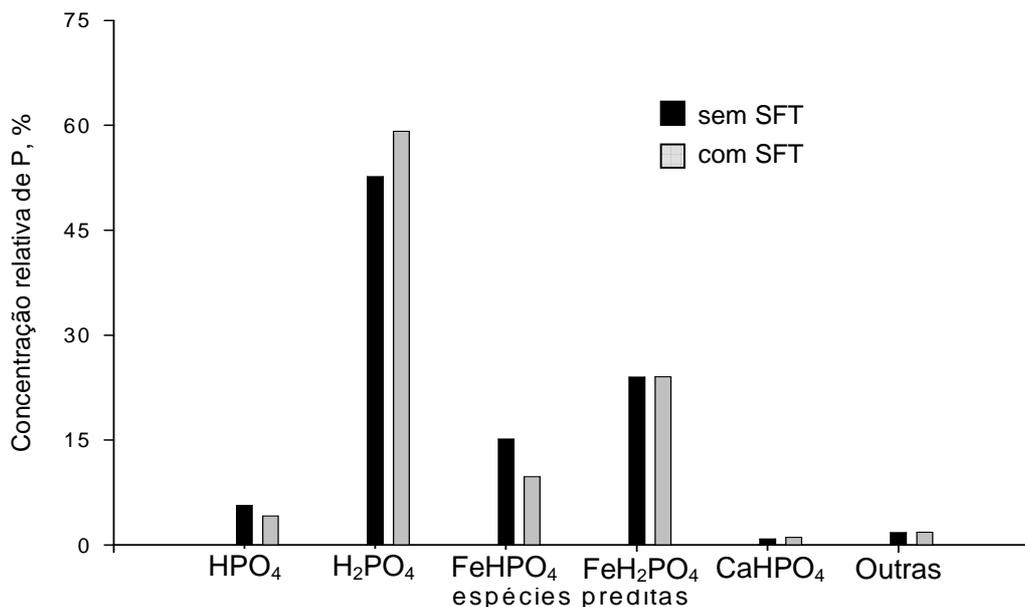


Figura 5. Concentração das espécies previstas de fósforo na solução do Planossolo em função da ausência e presença de SFT aos 14 dias de alagamento.

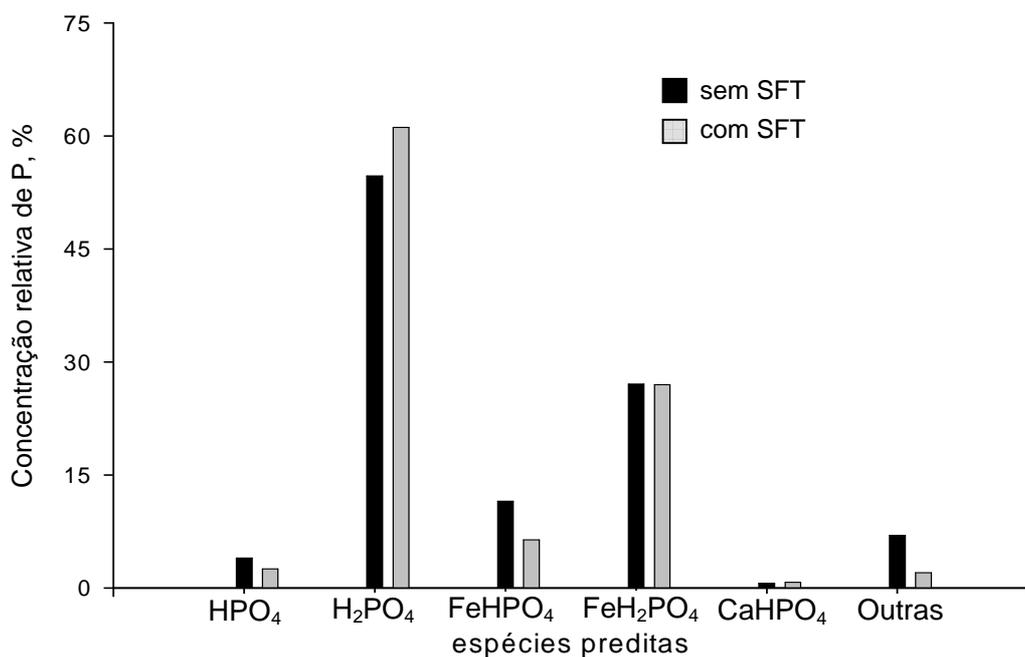


Figura 6. Concentração das espécies previstas de fósforo na solução do Luvissolo em função da ausência e presença de SFT aos 14 dias de alagamento.

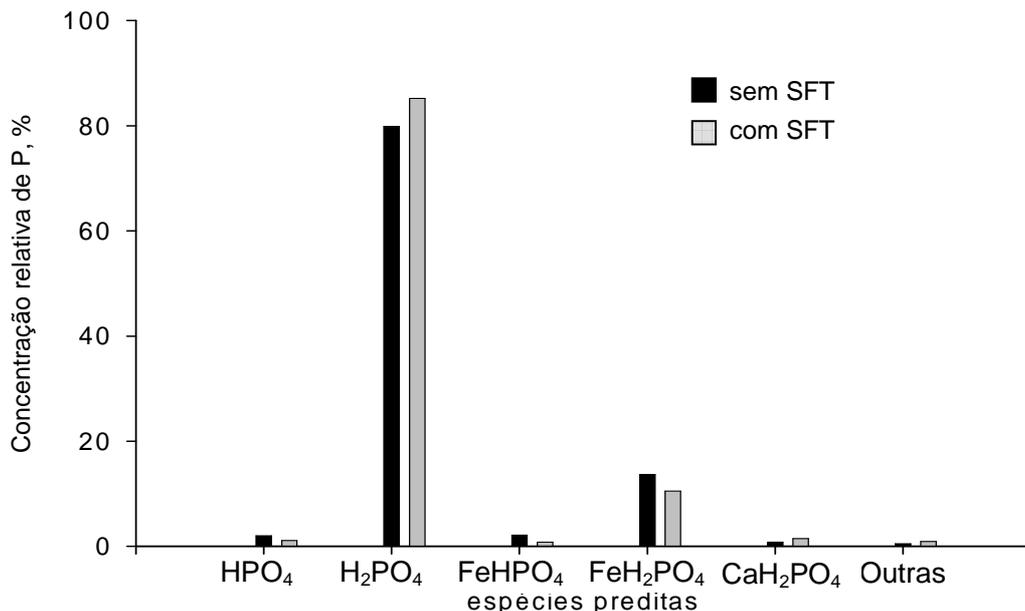


Figura 7. Concentração das espécies previstas de fósforo na solução do Vertissolo em função da ausência e presença de SFT aos 14 dias de alagamento.

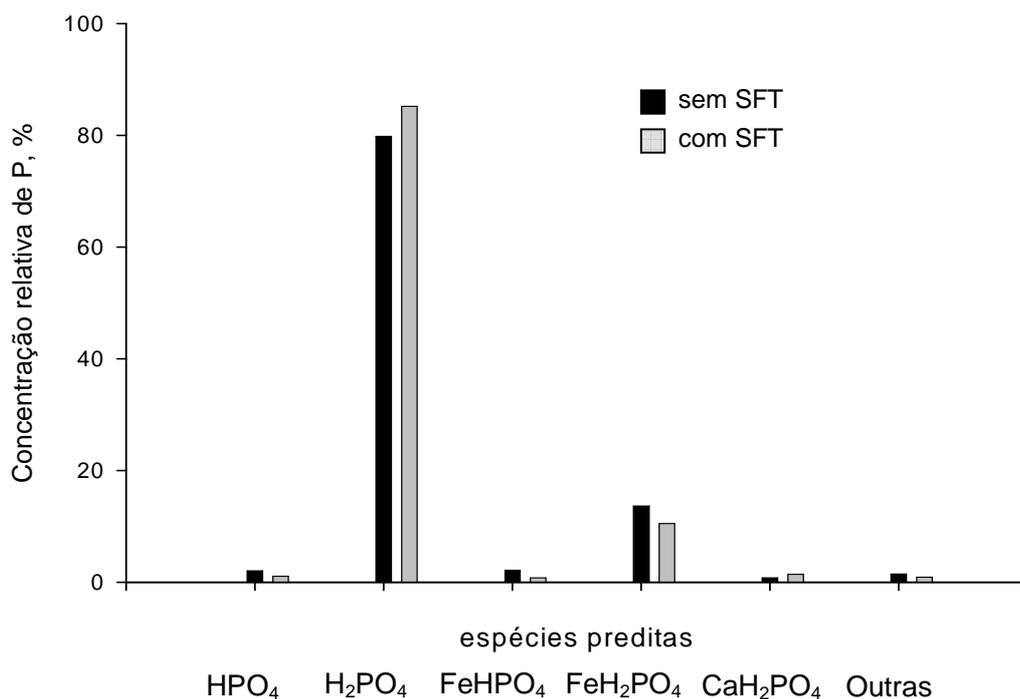


Figura 8. Concentração das espécies previstas de fósforo na solução do Chernossolo em função da ausência e presença de SFT aos 14 dias de alagamento.

## CONCLUSÃO

1. Nos quatro solos a espécie de fósforo predominante aos 14 e 28 dias após o alagamento foi a  $H_2PO_4$ .

2. O Planossolo apresentou maior formação de pares iônicos quando comparado aos solos Luvisolo, Vertissolo e Chernossolo aos 14 dias de alagamento.

3. O Vertissolo e Chernossolo apresentaram maior formação de espécies livres de fósforo quando comparados ao Planossolo e Luvisolo, independentemente do período de alagamento.

4. Dentre os pares iônico formados, o fósforo ligado ao ferro predominaram em todos os solos utilizados, independentemente do período de alagamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLISON, J.D.; BROWN, D.S.; NOVO-GRADAC, K.J. **MINTEQA2 /Prodefa**: A geochemical assessment model for environmental systems. Version 3.0 user's manual. Athens: Environmental Protection Agency, 1991. 107 p. (EPA/600/3-91/021).
- BOHNEN, H.; SILVA, L.S.da.; MACEDO, V.R.M.; MARCOLIN, E. Ácidos orgânicos na solução de um Gleissolo sob diferentes sistemas de cultivo com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 29, p. 475-480, 2005.
- COUNCE, P.A.; KEISLING, T.C.; MITCHELL, A.J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, Madison, v.40, p. 436-443, 2000.
- SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – CQFS RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Porto Alegre: Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004. 394 p.
- GONÇALVES, G.K.; SOUSA, R.O. de.; VAHL, L.C.; BORTOLON, L. **Solubilização de fosfatos naturais Pato de Minas e Arad em dois solos alagados**. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 32, p. 2157-2164, 2008.
- HOLFORD, I.C.R.; PATRICK JR, W.H. Effects of reduction and pH changes on phosphate sorption and mobility in an acid soil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.43, p. 292-297, 1979.
- HUGUENIN-ELIE, O.; KIRK, G.J.D.; FROSSARD, E. Phosphorus uptake by rice from soil that is flooded, drained or flooded then drained. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 54, p. 77-90, 2003.
- KHALID, R.A.; PATRICK JR, W.H.; DELAUNE, R.D. Phosphorus sorption characteristics of flooded soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.41, p. 305-309, 1977.
- KRAIRAPANOND, A.; PATRICK Jr, H. Phosphorus sorption characteristics in acid sulphate soils of Thailand: Effect of uncontrolled and controlled soil redox potential (Eh) and pH. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.157, p. 227-237, 1993.
- LINDSAY, W. **Chemical equilibria in soils**. New York: John Wiley & Sons, 1979. 449p.
- McBRIDE, M.B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1994. 406p.
- MATTIGOD, S.V.; SPOSITO, G. Chemical modeling of trace metal equilibrium in contaminated soil solutions using the computer program GEOCHEM. In: JANNE, E.A. (ed.). **Chemical modeling in aqueous systems**. MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clay by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: **National Conference Clays & clay minerals**, 7., Ottawa, 1960. Proceedings. S.I.S. ed., 1960. p. 317-327.
- MUNCH, J.C.; OTTOW, J.C.G. Preferential reduction of amorphous to crystalline iron oxides by bacterial activity. **Soil Science**, Baltimore, v.129, p.15-21, 1980.
- PATRICK Jr, W.H.; GOTOH, S.; MORAGHAN, J.T. A simple system for controlling redox potential and pH in suspensions. **Soil Science Society of American Proceeding**, Madison, v.37, p. 331-332, 1973.
- PATRICK, JR.; REDDY, C.N. Chemical Changes in rice soils. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Soils and Rice**. Los Baños, 1978. p. 361-380.
- PHILLIPS, I.R.; GREENWAY, M. Changes in water-soluble and exchangeable ions, cation exchange capacity, and phosphorus max in soils under alternating waterlogged and drying conditions. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.29, p. 51-65, 1998.
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.24: p.29-96, 1972.
- PONNAMPERUMA, F.N. Chemical kinetics of wetland rice soils relative to soil fertility. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Wetland Soils: Characterization, Classification, and Utilization**. Los Baños, 1978. p.71-90.

SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S.; HAFEZ, A.A. Phosphorus behavior in flooded-drained soils. I. Effects on phosphorus sorption. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.53, p. 1718-1722, 1989A.

SHAHANDEH, H.; HOSSNER, L.R.; TURNER, F.T. Phosphorus relationships to manganese and iron in rice soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 168, p. 489-500, 2003

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der eisenoxide des bodens durch extraction mit ammoniumoxalat-lösung. Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde, Weinheim, v. 105, p. 194-202, 1964.

SILVA, L.S.da.; BOHNEN, H.; MACEDO, V. R.M.; MARCOLIN, E. Ácidos orgânicos em sistemas de cultivo com arroz irrigado. IV Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo. 2002. Núcleo Regional Sul.

SOUSA, R.O. **Oxirredução em solos alagados afetada por resíduos vegetais**. Porto ALEGRE, 2001. 164p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SOUSA, R.O.; BOHNEN, H.; MEURER, E.J. Composição da solução de um solo alagado conforme a profundidade e o tempo de alagamento, utilizando novo método de coleta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 26, p. 343-348, 2002.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1989. 277p.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. Porto Alegre: Departamento de solos da UFRGS, 1995. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

WILLETT, I.R. Causes and prediction of changes in extractable phosphorus during flooding. **Australian Journal of Soil Research**, Adelaide, v.27, p.45-54. 1989.

WILLETT, I.R.; HIGGINS, M.L. Phosphate sorption by reduced and re-oxidized rice soils. **Australian Journal of Soil Research**, Adelaide, v.16, p. 319-326, 1978.

WOLT, J.D. **Soil solution chemistry**: applications to environmental science and agriculture. New York: Wiley, 1994. 345p.

YOSHIDA, T. Microbial Metabolism of flooded soil. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Soils and Rice**. Los Baños, 1978. p. 445-463.

ZHANG, X.; ZHANG, F.; MAO, D. Effect of iron plaque outside roots on nutrient uptake by rice (*Oryza sativa* L.): phosphorus uptake. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 209, p. 187-192, 1999.

ZONTA, E.P., MACHADO, A.A.; SILVEIRA, J.P. **Sistema de análise estatística para microcomputadores(SANEST)**. Pelotas, Universidade Federal de Pelotas, 1984. 151p. Washington: American Chemical Society, 1979. v.3.