

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Agronomia
Área de Concentração: Solos



Dissertação

**Adubação fosfatada para o arroz irrigado em solos
com diferentes capacidades de adsorção de fósforo**

Eduardo Flores Cardoso

Pelotas, 2007

EDUARDO FLORES CARDOSO

**ADUBAÇÃO FOSFATADA PARA O ARROZ IRRIGADO EM SOLOS
COM DIFERENTES CAPACIDADES DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (área do conhecimento: Solos).

Orientador: Professor Dr. Rogério Oliveira de Sousa

Co-orientador: Professor Dr. Ledemar Carlos Vahl

Pelotas, 2007

Dados de catalogação na fonte:
(Marlene Cravo Castillo – CRB-10/744)

C268a Cardoso, Eduardo Flores

Adubação fosfatada para o arroz irrigado em solos com diferentes capacidades de adsorção de fósforo / Eduardo Flores Cardoso. - Pelotas, 2007.
83f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Solos. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas. - Pelotas, 2007, Rogério Oliveira de Sousa, Orientador; co-orientador Ledemar Carlos Vahl.

1. Arroz irrigado 2. Adubação fosfatada 3. Adsorção de fósforo 4. Fosfato natural 5. Mehlich 6. Resina I. Sousa, Rogério Oliveira de (orientador) II. Título.

CDD 631.42

EDUARDO FLORES CARDOSO

**ADUBAÇÃO FOSFATADA PARA O ARROZ IRRIGADO EM SOLOS
COM DIFERENTES CAPACIDADES DE ADSORÇÃO DE FÓSFORO**

Aprovada em: 19 de Setembro de 2007.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rogério Oliveira de Sousa (Orientador)
Depto. Solos - Faculdade de Agronomia "Eliseu Maciel" – UFPel

Prof. Dr. Leandro Souza da Silva
Centro de Ciências Rurais – UFSM

Pesq. Dra. Walkyria Bueno Scivittaro
EMBRAPA Clima Temperado

Eng. Agr. Dr. Gustavo Krüger Gonçalves
Autônomo

Dedico:

À minha filha Júlia, o maior e melhor
presente que ganhei em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Rogério Oliveira de Sousa, pela orientação, amizade, confiança e pelo exemplo de dedicação ao ensino superior e a pesquisa.

Ao professor Ledemar Carlos Vahl, pela co-orientação, pelos ensinamentos e apoio.

Aos bolsistas do Departamento de Solos, pela amizade e ajuda na execução dos experimentos.

Aos Colegas de curso, pelas discussões, estudos e companheirismo.

Aos professores do Departamento de Solos da UFPel, pelo convívio e ensinamentos.

Aos Funcionários do Departamento de Solos e do Programa de Pós-graduação em Agronomia

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pela concessão da bolsa.

À Universidade Federal de Pelotas, ao Programa de Pós-graduação em Agronomia e ao Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, pela oportunidade de realização do curso de mestrado e pela estrutura.

À minha família, Isabel e Júlia, pelo carinho, apoio, incentivo.

Aos meus pais, Francisco e Teresinha, e meu irmão Fernando pelo apoio e incentivo.

Aos parentes, demais amigos e a todos que de alguma forma contribuíram para a viabilização deste trabalho, um sincero muito obrigado.

RESUMO

CARDOSO, Eduardo Flores. **Adubação fosfatada para o arroz irrigado em solos com diferentes capacidades de adsorção de fósforo**. 2007. 83f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração: Solos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas - Brasil.

Na cultura do arroz irrigado, os solos de várzea podem suprir as plantas com diferentes quantidades de fósforo devido ao material de origem e aos fenômenos que ocorrem nos diferentes ciclos de oxidação e redução desses solos. Um fator importante do solo que regula a disponibilidade do fósforo para as plantas é a capacidade de adsorção de fósforo. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar a resposta do arroz irrigado adubado com duas fontes de fósforo em solos de várzea com diferentes capacidades de adsorção de fósforo e avaliar a capacidade de predição dos métodos Mehlich-1 e Resina Trocadora de Íons em esfera na disponibilidade de fósforo para o arroz irrigado. Foram coletadas três amostras da camada superficial (0-20 cm) de solos de várzea com diferentes capacidades máximas de adsorção de fósforo (CMAP): Planossolo Háplico (Pelotas), baixa CMAP; Planossolo Háplico (Bagé), média CMAP e Gleissolo Háplico (Banhado), alta CMAP. As unidades experimentais constituíram-se de vasos plásticos contendo 6 kg de solo seco, onde foram aplicadas duas fontes de fósforo (fosfato natural e superfosfato triplo) e seis níveis de fósforo: 0, 10, 20, 40, 80, 160 mg kg⁻¹ P, com três repetições, totalizando cento e oito unidades experimentais. Os vasos ficaram dispostos na casa de vegetação em um delineamento inteiramente casualizado. Cultivou-se o arroz durante quarenta e cinco dias e colheu-se a parte aérea das plantas para quantificar o peso de matéria seca. Foram analisados os teores de fósforo: no solo pelos extratores Mehlich-1 e Resina em esferas; na solução do solo e no tecido vegetal. Os resultados obtidos mostraram que: o Planossolo Háplico (Pelotas) respondeu com aumento de peso de matéria seca da parte aérea do arroz até a dose de 10 mg kg⁻¹ de fósforo aplicado no solo, enquanto que no Gleissolo Háplico (Banhado) a resposta ao fósforo aplicado foi até a dose de 80 mg kg⁻¹. Já no Planossolo Háplico (Bagé) não houve resposta ao fósforo; o solo com maior capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), Gleissolo Háplico (Banhado), necessitou maior quantidade de fósforo aplicado na forma de superfosfato triplo e fosfato natural para atingir a máxima produção de matéria seca da parte aérea; o superfosfato triplo apresentou maior solubilização do que o fosfato natural Daoui durante o alagamento dos solos de várzea utilizados neste experimento; o extrator Mehlich-1 e o método da Resina Trocadora de Íons em esfera equivaleram-se na capacidade de predição da disponibilidade de fósforo para o arroz irrigado nos solos de várzea utilizados neste experimento.

Palavras-chave: arroz irrigado, fósforo, capacidade máxima de adsorção de fósforo, fosfato natural, Mehlich, Resina

ABSTRACT

CARDOSO, Eduardo Flores. **Phosphorus fertilization for irrigated rice in soils with different phosphorus adsorption capacities**. 2007. 83f. Master Dissertation – Post-Graduation in Agronomy, Area of Concentration: Soils. Federal University of Pelotas, Pelotas - Brazil.

In irrigated rice crop, the lowland soils can supply the plants with different phosphorus quantities due to the source material and phenomena that occur in the different oxidation and reduction cycles of these soils. An important soil factor that regulates the phosphorus availability for the plants is the maximum phosphorus adsorption capacity. Therefore, the objectives of this work were to evaluate the response of the irrigated rice fertilized with two sources of phosphorus in lowland soils with different phosphorus adsorption capacity and to evaluate the prediction capacity of the methods Mehlich-1 and Ionic Exchange Resin in Sphere regarding the phosphorus availability for the irrigated rice in these soils. The soil samples were taken from the top 20 cm of three lowland soils with different maximum phosphorus adsorption capacity (MPAC): Typic Albaqualf, low MPAC; Vertic Albaqualf, average MPAC and Typic Endoaqualf, high MPAC. The experimental units were constituted of plastic buckets containing 6 kg of dry soil, where two phosphorus sources (phosphate rock and triple superphosphate) and six levels of phosphorus: 0, 10, 20, 40, 80, 160 mg kg⁻¹ P were applied, with three replications, totaling 128 experimental units. The pots were positioned in the greenhouse in a completely randomized experimental design. The rice was cultivated for 45 days and the dry matter weight was quantified through aerial part of the plants. The phosphorus content was analyzed by extractor Mehlich-1 and Resin methods in the soil, in the soil solution and in the plant. The obtained results showed that: Typic Albaqualf respond with increased dry matter weight of rice plant aerial part up to the level of 10 mg kg⁻¹ of phosphorus applied in the soil, while in the Typic Endoaqualf the response to the applied phosphorus was up to the level of 80 mg kg⁻¹. Vertic Albaqualf did not respond to phosphorus; soil with higher maximum phosphorus adsorption capacity (MPAC), Typic Endoaqualf, required higher phosphorus quantity (phosphate rock and triple superphosphate) to reach maximum dry matter weight of rice plant aerial part up; the triple superphosphate presented greater solubility than phosphate rock Daoui during the flood of the lowland soils in this experiment; the extractor Mehlich-1 and the Ion Exchange Resin method were equivalent in the prediction capacity of the phosphorus availability for the irrigated rice in the lowland soils in this experiment.

Keywords: irrigated rice, phosphorus, maximum phosphorus adsorption capacity, phosphate rock, Mehlich, Resin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Adsorção de fósforo em função da aplicação de níveis crescentes de fósforo (0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 125 e 150 mg kg ⁻¹) a três solos de várzea do Rio Grande do Sul.....	41
Figura 2 - Distribuição dos pontos $P_{\text{solução}}/P_{\text{adsorvido}} \times P_{\text{solução}}$ da forma linear da equação de Langmuir para o fósforo em três solos de várzea do Rio Grande do Sul.....	42
Figura 3 - Peso de matéria seca da parte aérea de plantas de arroz em função das fontes de fósforo (a - fosfato natural, b - superfosfato triplo) e das doses de fósforo aplicadas aos solos.....	45
Figura 4 - Concentração de fósforo na solução do solo em função de fontes (a - fosfato natural, b - superfosfato triplo) e doses de fósforo para três solos de várzea do Rio Grande do Sul, em quatro períodos de coleta (1, 8, 22, 36 dias de alagamento).....	48
Figura 5 - Teor de fósforo na parte aérea de plantas de arroz em função das fontes de fósforo (a - fosfato natural; b - superfosfato triplo) e das doses de fósforo aplicadas aos solos.....	50
Figura 6 - Quantidade de fósforo acumulada na parte aérea de plantas de arroz em função das fontes de fósforo (a - fosfato natural; b - superfosfato triplo) e das doses de fósforo aplicadas aos solos.....	52
Figura 7 - Teores de fósforo extraídos pelos métodos Mehlich-1 e Resina trocadora de íons em função de doses de fósforo aplicadas em três solos várzea adubados com duas fontes de fósforo (a – fosfato natural, b – superfosfato triplo).....	54
Figura 8 - Correlação entre os teores de fósforo estimados pelo extrator Mehlich-1 e as quantidades de fósforo acumuladas na parte aérea das plantas de arroz.....	55
Figura 9 - Correlações entre os teores de fósforo estimados pelo extrator Mehlich-1 e as quantidades de fósforo acumuladas pela parte aérea das plantas de arroz em função das fontes de fósforo (a – fosfato natural; b – superfosfato triplo).....	57

Figura 10 - Correlações entre os teores de fósforo estimados pelo extrator Mehlich-1 e as quantidades de fósforo acumuladas na parte aérea das plantas de arroz em função dos solos (a – Planossolo Háplico, Pelotas; b – Planossolo Háplico, Bagé; c – Gleissolo Háplico, Banhado).....	58
Figura 11 - Correlação entre os teores de fósforo estimados pela Resina trocadora de íons e as quantidades de fósforo acumuladas na parte aérea das plantas de arroz.....	59
Figura 12 - Correlações entre os teores de fósforo estimados pelo método da Resina trocadora de íons e as quantidades de fósforo acumuladas na parte aérea das plantas de arroz em função das fontes de fósforo (a – fosfato natural; b – superfosfato triplo).....	60
Figura 13 - Correlações entre os teores de fósforo estimados pelo método da Resina trocadora de íons e as quantidades de fósforo acumuladas pela parte aérea das plantas de arroz em função dos solos (a – Planossolo Háplico, Pelotas; b – Planossolo Háplico, Bagé; c – Gleissolo Háplico, Banhado).....	61
Figura 14 - Correlação entre os teores de fósforo estimados pela Resina trocadora de íons e os teores de fósforo obtidos pelo extrator Mehlich-1 para todo o conjunto dos três solos de várzea e das duas fontes de fósforo em estudo.....	62
Figura 15 - Correlações entre os teores de fósforo estimados pelo método da Resina trocadora de íons e os teores de fósforo obtidos pelo extrator Mehlich-1 em função das diferentes fontes de fósforo (a – fosfato natural; b – superfosfato triplo).....	63
Figura 16 - Correlações entre os teores de fósforo estimados pelo método da Resina trocadora de íons e os teores de fósforo obtidos pelo extrator Mehlich-1 em função dos solos (a – Planossolo Háplico, Pelotas; b – Planossolo Háplico, Bagé; c – Gleissolo Háplico, Banhado).....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atributos físicos e químicos de três solos de várzea do Rio Grande do Sul.....	35
Tabela 2 - Quantidades de adubo aplicadas em cada vaso conforme as fontes e as doses de fósforo utilizadas.....	37
Tabela 3 - Coeficiente linear (B_0) e angular (B_1), coeficiente de determinação (r^2) da relação linear entre $P_{\text{solução}}/P_{\text{adsorvido}}$ e $P_{\text{solução}}$ e os parâmetros da equação de Langmuir (b e K) para a adsorção de fósforo em três solos de várzea do Rio Grande do Sul.....	41
Tabela 4 - Valores da produção de matéria seca da parte aérea das plantas de arroz em função das duas fontes de fósforo e dos três solos de várzea.....	44
Tabela 5 - Teor de fósforo (g kg^{-1}) na parte aérea de plantas de arroz cultivadas em três solos de várzea adubados com fosfato natural (FN) e superfosfato triplo (SFT).....	50
Tabela 6 - Quantidade de fósforo acumulada na parte aérea das plantas de arroz em função das duas fontes de fósforo e dos três solos de várzea.....	52

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1. Fósforo no solo.....	17
2.1.1. Formas de fósforo no solo.....	18
2.2. Efeitos do alagamento no solo e no fósforo.....	18
2.3. Fontes de fósforo.....	20
2.3.1. Tipos e características gerais dos principais adubos fosfatados.....	20
2.3.2. Reação dos adubos fosfatados no solo.....	22
2.4. Métodos de análise de fósforo.....	23
2.5. Disponibilidade de fósforo em solos alagados.....	28
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3.1. Delineamento experimental e descrição dos tratamentos.....	33
3.2. Coleta e preparo dos solos.....	34
3.3. Análises químicas e físicas de solo.....	34
3.4. Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo.....	35
3.5. Aplicação dos tratamentos.....	36
3.6. Condução do experimento na casa de vegetação.....	37
3.7. Análises da solução do solo.....	38
3.8. Coleta da parte aérea das plantas e análises de tecido vegetal.....	38
3.9. Análise estatística.....	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.1. Capacidade de adsorção de fósforo pelos solos.....	40
4.2. Produção de matéria seca pela parte aérea das plantas de arroz.....	44
4.3. Teor de fósforo no tecido da parte aérea das plantas de arroz.....	49

4.4. Quantidade de fósforo acumulada na parte aérea das plantas de arroz.....	51
4.5. Fósforo extraível com o extrator Mehlich-1 e com o método da Resina Trocadora de Íons.....	53
4.6. Correlações lineares entre o fósforo acumulado nas plantas e o fósforo extraído pelos métodos Mehlich-1 e Resina Trocadora de Íons.....	55
4.6.1. Correlações lineares entre o fósforo acumulado nas plantas e o fósforo extraído pelo método Mehlich-1.....	55
4.6.2. Correlações lineares entre o fósforo acumulado nas plantas e o fósforo extraído pelo método da Resina Trocadora de Íons.....	59
4.6.3. Correlações lineares entre o extrator Mehlich-1 e o método da Resina Trocadora de Íons.....	62
4.7. Considerações finais.....	64
5. CONCLUSÕES.....	67
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	68
7. APÊNDICES.....	75

1. INTRODUÇÃO

O estado do Rio Grande do Sul possui aproximadamente 5.400.000 ha classificados como solos de várzea (PINTO; NETO; PAULETTO, 2004). O cultivo predominante nesse tipo de solo é o arroz irrigado, caracterizado pelo alagamento do solo, o que assegura produções altas e estáveis (AZAMBUJA; VERNETTI; MAGALHÃES Jr, 2004). Anualmente no estado, aproximadamente, 18,5% ou um milhão de ha desses solos são cultivados com arroz irrigado, alcançando uma produção de 6.1 mil toneladas e uma produtividade de 6.000 kg ha^{-1} , média das últimas 5 safras (CONAB, 2007). Essa produção corresponde a 52% da produção nacional de arroz com uma área de 30% do total cultivado. A produtividade média do estado é 69% maior que a média nacional (CONAB, 2007). Esses dados colocam a cultura como uma das principais do estado e o Estado como o principal produtor de arroz do País.

Embora, a produtividade do arroz no Rio Grande do Sul seja alta, ela está aquém do potencial genético das cultivares utilizadas na atualidade que podem atingir médias de $10.000 \text{ kg ha}^{-1}$. A produtividade do arroz depende, principalmente, do clima (radiação solar e temperatura) e do solo, fatores não controlados pelo homem. Além da época de semeadura, do manejo da água, do controle de pragas e doenças, e da adubação, fatores possíveis de controle pelo homem. A adubação é responsável por em torno de 6,5% do custo de produção da lavoura (AZAMBUJA; VERNETTI; MAGALHÃES Jr, 2004).

Entre os elementos aplicados no solo através dos fertilizantes, o fósforo merece destaque pelo seu alto custo e pelas modificações que esse elemento sofre nos solos de várzea, sazonalmente alagados, em função da alternância nas condições de oxidação e redução, as quais determinam a maior ou menor disponibilidade desse elemento para as plantas.

Nas últimas décadas, vários experimentos foram realizados no Rio Grande do Sul visando estabelecer os níveis de adubação fosfatada mais adequados para a cultura do arroz irrigado. Os experimentos foram realizados em poucas classes de solos de várzea (Planossolos e Gleissolos) e as recomendações foram generalizadas para todos os solos ocorrentes no Rio Grande do Sul e Santa Catarina, o que pode levar a erros nas recomendações de adubação. Além disso, em nenhum desses experimentos, os extratores de fósforo testados mostraram-se superiores ao Mehlich-1, na capacidade de predição da disponibilidade do fósforo, fato que não justifica a troca do método atualmente empregado no Estado.

A eficácia dos métodos de análise pode ser melhorada adicionando-se alguns critérios auxiliares na interpretação dos resultados, como é feito para as culturas de sequeiro, onde os solos são separados de acordo com a sua textura. Contudo, a interpretação dos teores de fósforo no solo para a cultura do arroz irrigado não utiliza nenhum critério auxiliar para a recomendação de adubação, pois, segundo CQFS-RS/SC (2004) e Anghinoni e Meurer (2004), ocorrem aumentos nos teores de fósforo com o alagamento. No entanto, o aumento na disponibilidade de fósforo com o alagamento é bastante variável entre os solos, em função de uma série de características, dentre as quais se destaca a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP). Sendo assim, é provável que solos cultivados com arroz irrigado que apresentem teores semelhantes de fósforo devam receber quantidades diferentes do adubo em função das diferenças no poder tampão de fósforo, assim como ocorre em solos de sequeiro.

Outro fato que merece atenção, atualmente, na adubação fosfatada do arroz irrigado é a utilização de fontes de fósforo alternativas aos fosfatos acidulados, como por exemplo, os fosfatos naturais reativos. Os fosfatos acidulados possuem altas concentrações de fósforo e alta solubilidade em água, devido a vários processos químicos sofridos pela rocha fosfática, o que eleva o custo desse adubo. Já os fosfatos naturais, por sofrerem apenas processos físicos para a separação das impurezas da rocha fosfática, têm um custo mais baixo.

Segundo a CQFS-RS/SC (2004), o uso do fosfato natural é mais indicado para solos que apresentem um teor de fósforo médio ou superior, devido a sua menor solubilidade em relação aos fosfatos acidulados. No caso do arroz, esses teores seriam de no mínimo $3,1 \text{ mg dm}^{-3}$, quando o extrator utilizado fosse o Mehlich-1, e de no mínimo $10,1 \text{ mg dm}^{-3}$, quando o extrator utilizado fosse a Resina

Trocadora de Íons. Essa recomendação se baseia em alguns experimentos que demonstraram comportamentos semelhantes na resposta do arroz irrigado quando foram comparados os fosfatos naturais com os fosfatos solúveis, todavia em muitos desses experimentos não houve resposta à aplicação de fósforo, ou seja, os tratamentos não foram estatisticamente superiores à testemunha. Esses resultados levaram a crer que os fosfatos naturais apresentam eficiência semelhante às fontes de fósforo solúveis nos solos alagados.

Porém, as alterações químicas decorrentes do alagamento do solo, como aumento do pH, e dos teores de fósforo e cálcio na solução do solo são contrárias à dissolução dos fosfatos naturais, o que deve diminuir a sua solubilização no solo. Provavelmente essa semelhança na resposta do arroz irrigado a essas duas fontes de fósforo esteja mais ligada à baixa resposta do arroz irrigado a adubação fosfatada do que a eficiência do fosfato natural.

Considerando a importância da cultura do arroz irrigado para o estado do Rio Grande do Sul e o fato de que o fósforo, assim como o nitrogênio e o potássio, é um dos elementos mais exigido para a nutrição da cultura, a obtenção de uma metodologia mais adequada para o estabelecimento da adubação fosfatada no Rio Grande do Sul possibilitará a maior racionalização na utilização de fertilizantes, permitindo maior economicidade e/ou maior rendimento do arroz e contribuindo para a sustentabilidade da atividade orizícola nesse Estado. Outro aspecto importante a ser considerado é que uma metodologia mais eficiente para estimar a adubação de fósforo evitará a aplicação de uma excessiva quantidade desse nutriente no ecossistema, evitando possíveis impactos negativos ao ambiente, especialmente nos recursos hídricos, como a eutroficação das águas, fenômeno que provoca crescimento exagerado de certos organismos, comumente algas. A decomposição microbiana dessas algas mortas causa esgotamento do oxigênio dissolvido na água e asfixia dos peixes.

Desenvolveu-se o presente trabalho com os objetivos de: avaliar a resposta do arroz irrigado adubado com duas fontes de fósforo em solos de várzea com diferentes capacidades de adsorção de fósforo e avaliar a capacidade de predição dos métodos Mehlich-1 e Resina Trocadora de Íons em esfera na disponibilidade de fósforo para o arroz irrigado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fósforo no solo

As quantidades totais de fósforo (P) presentes na camada arável do solo são muito superiores às quantidades necessárias desse elemento para o pleno desenvolvimento das plantas. Entretanto a maior fração do fósforo no solo está em formas não passíveis de absorção pelas plantas, o que o torna um dos nutrientes mais limitantes ao rendimento das culturas. Esse comportamento ocorre devido à habilidade desse elemento em formar compostos estáveis, de alta energia de ligação e baixa solubilidade, com a fase sólida do solo. Apenas uma pequena quantidade de fósforo tem baixa energia de ligação, o que possibilita a sua disponibilidade para as plantas através da solução do solo.

O fator quantidade (Q), também chamado de fósforo lábil, é a fração do fósforo adsorvido ou precipitado na fase sólida do solo com baixa energia de ligação e em rápido equilíbrio com a solução do solo. A concentração de fósforo na solução do solo é chamada fator intensidade (I). O poder tampão ou fator capacidade de fósforo (C) representa a relação entre o fator quantidade e o fator intensidade, ou seja, a taxa de reposição do elemento na solução do solo (I) pelo fósforo lábil (Q), a qual é controlada pela energia de ligação do nutriente na fase sólida do solo e pela difusividade do fósforo para a solução do solo. Em solos com maior poder tampão (C) a concentração do fósforo na solução do solo se mantém mais constante quando há adição ou retirada de fósforo dessa solução. O contrário ocorre em solos com menor poder tampão de fósforo (C), no qual ocorre uma grande variação na concentração de fósforo na solução do solo, a qual aumenta com a adição de fósforo e reduz com a retirada do elemento (NOVAIS; SMYTH, 1999; GATIBONI, 2003).

2.1.1. Formas de fósforo no solo

O fósforo presente no solo pode ser dividido em dois grupos: fósforo orgânico e fósforo inorgânico. O fósforo orgânico encontra-se como um componente da matéria orgânica do solo e embora possa servir como nutriente às plantas após a mineralização até formas inorgânicas, parece ter pouca importância em solos alagados, haja vista a menor taxa de mineralização que ocorre em condições anaeróbicas (PATRICK; MAHAPATRA, 1968). O fósforo inorgânico pode ser separado em três partes: fósforo solúvel na forma iônica e compostos na solução do solo, encontrados em pequenas quantidades; fósforo mineral, tanto na forma cristalina quanto amorfa, como componente da rede cristalina dos constituintes minerais do solo; e fósforo adsorvido à superfície dos constituintes inorgânicos do solo.

As formas de fósforo ligadas aos minerais do solo ocorrem em função do pH do solo. Em solos ácidos (pH baixo) há maior ocorrência do fósforo nos minerais que contêm ferro e alumínio, como por exemplo, strengtita e variscita respectivamente. Já em solos alcalinos (pH alto) há maior ocorrência do fósforo ligado aos minerais que contêm cálcio, como por exemplo, fluorapatita (PARFITT, 1978).

2.2. Efeitos do alagamento no solo e no fósforo

Quando um solo é alagado, praticamente todo o oxigênio remanescente é consumido pelos microorganismos aeróbios presentes. Assim, os teores desse elemento baixam rapidamente criando um ambiente anaeróbio onde proliferam os microorganismos anaeróbios facultativos e obrigatórios. Esses microorganismos, com o objetivo de obterem energia, realizam a decomposição da matéria orgânica disponível e utilizam compostos oxidados presentes no solo, principalmente nitrato, óxidos de manganês, óxidos de ferro e sulfato, como aceptores dos elétrons liberados na oxidação do carbono orgânico durante o processo de respiração (PONNAMPERUMA, 1977).

Em função do processo de redução ocorre uma série de alterações químicas e eletroquímicas no solo, como aumento do pH em solos ácidos, diminuição do potencial redox, aumento da condutividade elétrica da solução, aumento das

concentrações de cátions (ferro, manganês, potássio, cálcio e magnésio) na solução e alterações na disponibilidade de nutrientes.

O fósforo não está diretamente envolvido nas reações de oxirredução que ocorrem nos solos, porém é grandemente afetado pelo alagamento do solo, por estar ligado quimicamente a substâncias oxidadas como óxidos de ferro e manganês (PATRICK; REDDY, 1978; SHAHANDEH; HOSSNER; TURNER, 2003). Então o principal efeito da redução do solo sobre o fósforo é o aumento da solubilidade dos compostos fosfatados e, com isso ocorre um aumento no fósforo lábil ou fator quantidade (PONNAMPERUMA, 1977). Esse aumento acontece, principalmente, devido: a redução dos fosfatos férricos para a forma ferrosa, mais solúvel; liberação do fósforo ligado com alta energia, através da redução dos óxidos de ferro; deslocamento do fosfato adsorvido na superfície de argilas e óxidos de ferro e alumínio por ânions orgânicos e HCO_3^- acumulados em solos alagados; e hidrólise dos fosfatos de ferro e alumínio (PONNAMPERUMA, 1965; PATRICK; MAHAPATRA, 1968).

O fator intensidade (I) ou concentração de fósforo na solução do solo tende a aumentar com o alagamento, principalmente devido ao aumento da solubilidade dos compostos de fósforo do solo. Este aumento é mais significativo do início até 20 a 40 dias do alagamento, após decresce, podendo ou não permanecer em nível acima do inicial (PONNAMPERUMA, 1965).

Simultaneamente à redução dos óxidos de ferro que ocasionam o aumento do teor de fósforo na solução do solo, ocorre o acúmulo de Fe^{+2} e o aumento do pH do solo. Em consequência pode ocorrer a precipitação de fosfatos ferrosos, porque a solubilidade destes compostos diminui com o aumento do pH. Além disso, ocorre a precipitação de óxidos de ferro, os quais promovem a adsorção de fósforo. Reações deste tipo podem explicar a diminuição dos teores de fósforo na solução do solo após um longo período de alagamento (GOTOH, 1973).

O fósforo para estar em condições de ser absorvido pelas plantas necessita ser transportado de alguma distância no solo até a superfície das raízes, através do mecanismo de difusão, sendo a solução do solo o meio onde este processo ocorre (NOVAIS; NEVES; BARROS, 1990). Em virtude da umidade volumétrica nos solos alagados ser máxima, o movimento deste elemento por difusão torna-se mais eficiente do que no mesmo solo em condições de sequeiro.

Um fenômeno importante que ocorre em ambientes sazonalmente alagados, como os solos de várzea onde se cultiva o arroz irrigado, é a alternância nas condições de oxidação e redução (oxidação ocorre quando o solo está drenado e redução ocorre quando o solo está alagado). Essas constantes mudanças nas condições do solo causam intensas modificações na fase sólida do solo e na dinâmica dos elementos, entre eles, o fósforo.

Sah e Mikkelsen (1986) relatam que as freqüentes mudanças nas condições de oxidação e redução dos solos de várzea resultam em modificações na estabilidade de diversos minerais do solo, de tal modo que formas de óxidos de ferro de baixa cristalinidade tornam-se predominantes com o passar do tempo (MOORMAN; VAN BREEMEN, 1978). Esses óxidos apresentam maior área superficial específica e maior reatividade química do que as frações mais cristalinas (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989), são provavelmente, os componentes mais importantes na adsorção do fósforo, devido a sua alta capacidade de adsorção desse elemento, durante o período em que o solo permanece drenado. Com o alagamento do solo essas formas de ferro de baixa cristalinidade devem liberar o fósforo ligado-as com alta energia. Essa fração do fósforo fica indisponível para as plantas quando o solo está em condições de sequeiro, mas parece apresentar altas contribuições no fornecimento de fósforo quando o solo está alagado. Essa fração parece ter uma grande importância no suprimento de fósforo para a cultura do arroz irrigado e parece ser também a responsável por muitas diferenças entre solos de sequeiro e solos alagados quanto a resposta aos fertilizantes fosfatados adicionados aos solos.

2.3. Fontes de fósforo

2.3.1. Tipos e características gerais dos principais adubos fosfatados

As fontes de fósforo mais utilizadas na agricultura são os fosfatos solúveis em água, tais como os superfosfatos simples e triplo e os fosfatos de amônio. Existem outros fertilizantes disponíveis menos utilizados, tais como os fosfatos naturais, os termosfosfatos e os fosfatos parcialmente acidulados. Algumas características dos adubos fosfatados, como solubilidade, teor, granulometria e

elementos acompanhantes do fósforo, determinam o maior ou menor aproveitamento do nutriente pelas plantas (ALCARDE; GUIDOLIN; LOPES, 1989).

O superfosfato simples é obtido pelo tratamento do fosfato de rocha (apatita) com ácido sulfúrico, originando fosfato monocálcio, sulfato de cálcio (gesso) e ácido fluorídrico (RAIJ, 1991). O superfosfato simples apresenta o fósforo em três formas: fosfato monocálcio (solúvel em água); fosfato bicálcio (insolúvel em água e solúvel em citrato de amônio) e fosfato tricálcio (insolúvel em água e em citrato de amônio) (MALAVOLTA, 1981). Este adubo tem como vantagem o fato de ser uma excelente fonte de enxofre para as plantas e por apresentar uma alta porcentagem (90%) do fósforo solúvel em água, entretanto apresenta como desvantagem a baixa concentração de fósforo (TISDALE et al., 1993). O superfosfato simples contém 18% de P_2O_5 solúvel em citrato neutro de amônio + água, 11% de enxofre e 19% de cálcio (NOVAIS; SMYTH, 1999).

O superfosfato triplo é obtido a partir da rocha fosfatada, consumindo quantidades maiores de ácido sulfúrico que as necessárias para a produção do superfosfato simples, obtendo-se inicialmente gesso e ácido fosfórico. Este, por sua vez, irá reagir com o material apatítico produzindo o superfosfato triplo (RAIJ, 1991). A principal forma de fósforo neste adubo é o fosfato monocálcio (solúvel em água), embora ocorra também fosfatos de ferro, alumínio e ainda uma pequena parcela de fosfato bicálcio (insolúveis em água, mas solúveis em citrato de amônio). A principal vantagem deste adubo é a alta concentração de fósforo e a sua desvantagem é a ausência de enxofre (MALAVOLTA, 1981). O superfosfato triplo contém 43% de P_2O_5 total solúvel em citrato neutro de amônio + água e 13% de cálcio (NOVAIS; SMYTH, 1999).

Os fosfatos naturais são concentrados apatíticos obtidos a partir de minérios fosfáticos que podem ou não passar por processos físicos de concentração, como lavagem e/ou flotação, para separá-los dos outros minerais com os quais estão misturados (KAMINSKI; PERUZZO, 1997). As apatitas são rochas que pertencem à classe dos fosfatos de cálcio, tendo como principais minerais primários a fluorapatita e a francolita, que podem ocorrer misturadas com outros minerais. As rochas fosfáticas podem ser classificadas conforme a sua origem e formação, em sedimentares, ígneas e metamórficas, sendo que as duas últimas apresentam minerais duros, ou seja, apatitas com estrutura cristalográfica rígida e melhor arranjada com cristais grandes e não porosos, o que lhes confere pequena área

superficial e baixa reatividade. O seu principal mineral é a fluorapatita (HAMMOND; CHIEN; EASTERWOOD, 1986). Já os fosfatos de rochas sedimentares apresentam alto grau de substituição isomórfica e estrutura microcristalina, com grande porosidade, o que lhes confere uma maior área superficial e alta reatividade (SALE; MOKWUNYE, 1993). A francolita é o principal mineral primário na maioria dos fosfatos naturais sedimentares. Os fosfatos naturais de origem sedimentar comercializados no Brasil são provenientes do norte da África (Gafsa e Daoui), Oriente Médio (Arad) e dos Estados Unidos (Carolina do Norte) (GONÇALVES, 2003). As reservas brasileiras são formadas por fosfatos naturais de baixa reatividade não sendo recomendado a sua utilização para aplicação direta no solo, mas podem ser utilizados como matéria prima para fabricação de adubos solúveis.

2.3.2. Reação dos adubos fosfatados no solo

A adição de adubos fosfatados de qualquer origem ao solo desencadeia uma série de reações físico-químicas que transformam o fosfato em substâncias fosfatadas complexas.

Quando se adiciona ao solo um fertilizante fosfatado solúvel em água sua reação é rápida e os produtos formados (fosfato monocálcio em grande quantidade e em menor quantidade fosfato dicálcio e ácido fosfórico) irão manter uma solução saturada em fósforo em torno da região de dissolução do grânulo. Desta forma, cria-se um gradiente osmótico que provoca o deslocamento da água em sua direção e, ao mesmo tempo, uma difusão da solução da região mais concentrada para regiões de menor concentração, sendo que, na região de maior concentração de fósforo, ou seja, ao redor dos grânulos dos fertilizantes, ocorre a precipitação de fosfatos (BARROW, 1980). Essa precipitação ocorre, em solos ácidos, devido à reação do fósforo com formas iônicas de ferro e de alumínio e, em solos alcalinos, devido à reação do fósforo com íons cálcio, formando compostos de composição definida e baixa solubilidade (SAMPLE; SOPER; RACZ, 1980). Na porção mais afastada das partículas ou grânulos, pela diminuição da concentração de fósforo em solução, provavelmente ocorre adsorção do fósforo à superfície dos óxidos e hidróxidos de alumínio e ferro (BARROW, 1980). Logo, as diferenças de concentração ocorrem até que se completem as reações de precipitação e adsorção com os constituintes do

solo ou até que haja diluição da concentração do fósforo na solução e ocorra um equilíbrio do potencial osmótico.

Já com os fosfatos naturais, a concentração do fósforo na solução do solo é mais diluída e apresenta um potencial osmótico menor, ambos ditados pela solubilidade dos fosfatos. Nesse caso, o movimento de água na direção do fertilizante é menor e esta solução influencia volumes de solo muito menores ao redor do grânulo do fertilizante, de modo que o movimento de fósforo, que ocorre por difusão é prejudicado. Logo, nessas condições o suprimento de fósforo ao sistema radicular será dependente do aumento do teor de água no solo, uma vez ser este o meio através do qual a difusão ocorre (SAMPLE; SOPER; RACZ, 1980). Entretanto, os principais fatores que promovem uma melhor dissolução da rocha fosfática são: o baixo pH do solo, baixos teores de fósforo e, principalmente, baixos teores de cálcio na solução do solo (ROBINSON; SYERS, 1990; SANYAL; DATTA, 1991).

Quando um solo apresenta baixo pH, ele possui uma maior concentração de íons H^+ na solução do solo. Esses íons são importantes para a solubilização da rocha fosfática, pois os mesmos auxiliam no rompimento das estruturas da rocha, o que ocasiona a liberação do fósforo contido na mesma. Além disso, baixas concentrações de fósforo e cálcio na solução do solo provocam o deslocamento da reação de solubilização da rocha fosfática no sentido da dissolução da mesma, o que também provoca a liberação do fósforo.

2.4. Métodos de análise de fósforo

Nas últimas décadas foram desenvolvidas várias metodologias para avaliar a disponibilidade de fósforo dos solos, tendo como base teórica à técnica do fracionamento desenvolvida por Chang e Jackson em 1957, que usa o modo de ação de extratores químicos como agente seletivo para a extração do fósforo presente em diferentes formas: fosfatos de alumínio, fosfatos de ferro, fosfatos de cálcio e fosfatos ligados com alta energia aos óxidos de ferro e alumínio (fosfato ocluso); e estados de energia. Todos os métodos se baseiam em obter uma estimativa ou um índice da fração lábil do fósforo que se correlacione com o fósforo absorvido pelas culturas.

Segundo Barber (1995), muitos métodos apresentam uma boa correlação entre o fósforo do solo e o fósforo absorvido pelas plantas quando solos com

características semelhantes de concentração inicial de fósforo na solução, poder tampão e coeficiente de difusão efetivo são agrupados e analisados. Entretanto, basta que se agrupem solos cujas características variem significativamente, para que um mesmo método não apresente boa correlação com as quantidades de fósforo absorvido pelas plantas.

Segundo Gatiboni (2003), as extrações do fósforo disponível fornecem valores que variam entre o fator intensidade e o fator quantidade e até mesmo parte do fósforo não disponível, dependendo das propriedades do extrator e das condições de extração, sem informar sobre o fator capacidade. Os métodos de avaliação da fertilidade do solo procuram estimar a porção lábil (fator quantidade), passível de repor a solução do solo (fator intensidade), para estimar a necessidade de suplementação do nutriente. A eficiência desses métodos depende da forma em que o nutriente está inserido na fração lábil (fósforo ligado ao alumínio, ligado ao cálcio e ligado ao ferro) e do acesso do extrator a essa forma (GATIBONI, 2003).

Para Silva (1996), a determinação em rotina de laboratórios de análise de solos dos fatores intensidade, quantidade, capacidade e difusão esbarram em obstáculos operacionais de difícil transposição. Assim, na prática são usadas metodologias que avaliam o fator quantidade de fósforo no solo, por este ser considerado o fator de maior importância na avaliação da disponibilidade de fósforo (RAIJ, 1991).

A existência de um grande número de extratores químicos para avaliar a disponibilidade de fósforo às plantas é um indicador da complexidade do comportamento desse elemento no solo (LARSEN, 1967), pois nenhum deles é satisfatório para um grande número de solos, havendo controvérsias quanto à eficiência desses métodos em estimar satisfatoriamente a disponibilidade de fósforo às plantas (SILVA; RAIJ, 1999).

Fixen e Grove (1990), fazem referência sobre os principais extratores utilizados para extração do fósforo disponível no solo, que normalmente são baseados em soluções de reagentes químicos, e que dividem-se em quatro grandes grupos, segundo seus modos de ação:

- 1) Dissolução ácida: neste grupo são empregados ácidos fortes diluídos (clorídrico, nítrico e sulfúrico) ou ácidos fracos diluídos (acético, cítrico e láctico) que provocam a dissolução parcial dos colóides inorgânicos através da manutenção de uma atividade do íon H^+ na solução do solo suficiente para provocar essa dissolução,

sendo extraídos, em ordem decrescentes de efetividade os fosfatos de cálcio, fosfatos de alumínio e fosfatos de ferro. Como exemplo deste grupo temos o extrator Mehlich-1.

2) Troca iônica: os extratores deste grupo atuam na substituição do fósforo dos sítios de adsorção dos colóides pelos ânions da solução extratora (acetato, bicarbonato, citrato, lactato ou sulfato). Neste grupo não ocorre extração preferencial do fósforo ligado aos colóides, pois são baseados na troca iônica, onde o princípio mais importante é a energia de ligação com o colóide, e não a capacidade de dissolução do extrator, como no grupo anterior. Um exemplo deste grupo é a Resina Trocadora de Íons.

3) Complexação de cátions: neste grupo os extratores atuam na complexação dos colóides. Assim, quando a solução extratora contém o ânion fluoreto ou alguns ânions orgânicos (citrato e lactato), estes complexam o alumínio, dissolvendo uma maior quantidade de fósforo ligado a este elemento. Similarmente, o ânion bicarbonato complexa o cálcio, liberando uma maior quantidade de fósforo ligado a este elemento. Como exemplos deste grupo temos os extratores Bray-1 e Bray-2.

4) Hidrólise de cátions: os extratores deste grupo agem em pH alto, devido à adição de ânions hidroxilas (OH^-), na liberação do fósforo dos compostos. Esses ânions dissolvem compostos fosfatados de alumínio e de ferro pela hidrólise dos cátions ferro e alumínio presentes na superfície dos colóides. Como exemplo deste grupo temos o extrator Olsen.

Dentre as metodologias mais modernas utilizadas para extração do fósforo disponível no solo podem ser destacadas as que utilizam agentes de troca iônica como a resina de trocadora de íons proposta inicialmente por Amer et al. (1955) e as que utilizam agentes adsorventes como o papel filtro impregnado com óxido de ferro (VAN DER ZEE; FOKKINK; RIEMSDIJK, 1987; REIN, 1991). O papel filtro impregnado com óxido de ferro age através da diferença de concentração. Esse método extrai o fósforo de maneira similar à absorção realizada pelas raízes das plantas (MENON; CHIEN; HAMMOND, 1990). A adsorção do fósforo liberado da fase sólida do solo pela superfície dos óxidos de ferro presentes no papel filtro gera uma diminuição da concentração de fósforo na solução do solo próxima à superfície do papel filtro, criando um gradiente de concentração que faz com que mais fósforo seja liberado da fase sólida do solo. Porém, problemas como a precipitação do papel e a baixa quantidade de fósforo extraído são comuns nesta situação (REIN, 1991;

SILVA; RAIJ, 1996). No Brasil, os laboratórios de análise de solo utilizam dois métodos com mais frequência: o Mehlich-1 e a Resina Trocadora de Íons (SILVA; RAIJ, 1999), sendo o primeiro utilizado pela Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo dos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (ROLAS) e o segundo utilizado pelos laboratórios de análise de solo do Instituto Agronômico de Campinas, estado de São Paulo.

O extrator Mehlich-1 (MEHLICH, 1953) foi introduzindo no Rio Grande do Sul na década de 60 através de um convênio entre o Ministério da Agricultura e a Universidade da Carolina do Norte (EUA), no qual se buscava transferir conhecimento e tecnologias para as condições do Brasil, na época bastante carente em conhecimentos básicos na área da fertilidade do solo e nutrição de plantas (RANNO, 2004). Esse método é composto de uma mistura de ácidos fortes em baixas concentrações (H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1} e HCl 0,05 mol L^{-1}) com pH entre 2 e 3. A extração do fósforo ocorre pela dissolução ácida dos compostos fosfatados de fraca energia, sendo maior para fosfatos de cálcio, seguido daqueles ligados ao alumínio e, por último, aqueles ligados ao ferro. O princípio do método é a dissolução ácida, porém um efeito secundário de troca iônica nos sítios de adsorção também ocorre, no caso, do íon sulfato pelo fosfato. Dentre as principais vantagens da utilização do método Mehlich-1, está sua facilidade de execução e baixo custo de análise. Por outro lado, são conhecidas desvantagens como a extração preferencial de compostos de cálcio, superestimando os teores disponíveis em solos com presença de fosfatos de cálcio como mineral primário e também nos que receberam adubação com fosfatos naturais (HOLFORD, 1980; YOST et al., 1982; SHARPLEY; TIESSEN; COLE, 1987; KAMINSKI; PERUZZO, 1997). Também, em solos argilosos, o montante de fósforo extraído pelo Mehlich-1 é menor, pois com o aumento do teor de argila a capacidade extrativa diminui, devido ao consumo de íons hidrogênio e sulfato do extrator pelos grupos funcionais não ocupados pelo fósforo nos colóides inorgânicos e também pela readsorção de fósforo aos colóides durante a extração (CAJUSTE; KUSSOW, 1974; BAHIA FILHO et al., 1983).

As resinas são materiais sintéticos de alta massa molecular, constituídas de uma matriz polimérica contendo grupos funcionais com cargas elétricas responsáveis pela troca de íons, cuja estrutura é porosa e flexível podendo dilatar-se e reter solvente em seu interior. O princípio da extração do fósforo pela resina trocadora de íons é a sua remoção contínua da solução pela troca com o

bicarbonato da resina, criando um gradiente de concentração que força a saída da superfície dos colóides, até que seja alcançado um equilíbrio químico entre o solo e a resina trocadora de íons (SKOGLEY; DOBERMANN, 1996). Silva e Raji (1999) consideram que o uso da resina trocadora de íons como extrator de fósforo é adequado para estimativa do fator quantidade e melhor que outros extratores, porque: o processo de extração ocorre de forma contínua através da água, de forma similar à ação das raízes das plantas; não ocorre perda de força de extração do fósforo em solos com alto teor de argila; não provoca dissolução química de constituintes do solo, pois não utiliza nenhum reagente químico energético; o pH da suspensão solo-resina é um pouco abaixo de 7, coincidente com a faixa de maior disponibilidade de fósforo; e evita superestimação do fósforo disponível em solos que receberam adubação com fosfatos naturais. Porém, Rheinheimer et al. (2003) alertam que a resina trocadora de íons também é sensível à textura, diminuindo sua capacidade de extração com o aumento do teor de argila do solo, embora em menor magnitude que no caso do Mehlich-1.

Existem dois tipos de resinas trocadoras de íons, em esferas e em membrana, porém, ambas possuem semelhante princípio de extração do fósforo, estando a diferença no formato do material trocador (MIOLA, 1995). Na resina trocadora de íons em esferas são usadas esferas de 2mm de diâmetro. Na resina trocadora de íons em membrana são usadas lâminas em tiras com 2,5 x 3,0 cm. Essa forma de tiras tem por objetivo simplificar o método que utiliza esferas, pois torna mais fácil a separação das lâminas de resina do solo após a extração do fósforo. Segundo Miola (1995), os teores de fósforo extraídos pela resina em lâminas apresentam elevada correlação com os teores de fósforo extraídos pela resina em esferas.

Chang (1978) cita que muitos métodos de extração de fósforo têm apresentado bons resultados quanto à recomendação de adubação fosfatada para culturas de sequeiro. Todavia, para solos alagados os métodos não apresentam a mesma eficiência, principalmente por dois problemas que não ocorrem em solos destinados à cultura de sequeiro: os teores de fósforo aumentam significativamente devido à redução do solo originada pelo alagamento, sendo que o aumento nos teores de fósforo disponível varia de solo para solo; e como os métodos analisam as amostras com o solo seco, não refletem o possível aumento de fósforo disponível após o alagamento. Esse mesmo autor, após reunir vários dados de pesquisas com

extratores de fósforo chegou às seguintes conclusões: quando são analisados solos com altos teores de fosfatos de ferro, geralmente com pH abaixo de 6,5, são obtidas boas correlações para a maioria dos métodos; quando são analisados solos com alto teor de fosfato de cálcio, geralmente com pH acima de 6,5, os extratores alcalinos apresentam os melhores resultados; e quando são agrupados solos ácidos e alcalinos, os extratores alcalinos como o Olsen ou extratores de ácidos fracos contendo um radical complexante para cátions trivalentes, como o Bray-1, são mais eficientes.

2.5. Disponibilidade de fósforo em solos alagados

Nos últimos 40 anos mais de 60 experimentos foram realizados nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina visando estabelecer os níveis de adubação fosfatada mais adequados para a cultura do arroz irrigado. Analisando-se os resultados desses experimentos é possível concluir que: a resposta do arroz a adubação fosfatada é baixa; nenhum extrator de fósforo do solo avaliado mostrou capacidade de predição superior ao Mehlich-1 que justificasse sua substituição; a maior parte dos experimentos foram realizados em Planossolos e Gleissolos do litoral Sul e de Cachoeirinha e as recomendações foram generalizadas para todos os solos de várzea de todas as regiões orizícolas, o que pode levar a erros nas recomendações de adubação.

Em relação à interpretação das análises de solo, talvez o maior problema seja que o solo é analisado seco e a planta de arroz cresce em ambiente alagado. Embora o fósforo não esteja envolvido diretamente nas reações de oxirredução do solo alagado, apresenta forte interação com compostos de ferro e manganês, que são passíveis de serem reduzidos durante o alagamento (PONNAMPERUMA, 1972; SOUSA; CAMARGO; VAHL, 2004). Desta forma, formas de fósforo não disponíveis em condições de sequeiro pela forte interação principalmente com ferro, são disponibilizadas para a planta durante o alagamento. Aparentemente os 15 métodos de análise de fósforo testados por Silva (1996) e Ranno (2004) não foram capazes de predizer de forma satisfatória o fósforo disponibilizado durante o alagamento para os solos do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.

A eficácia dos métodos de análise pode ser melhorada adicionando-se alguns critérios auxiliares na interpretação dos resultados. Por exemplo, a

recomendação de fósforo para culturas de sequeiro no Rio Grande do Sul e Santa Catarina é realizada baseada nos teores de fósforo extraídos por Mehlich-1 (H_2SO_4 0,0125 mol L⁻¹ + HCl 0,05 mol L⁻¹). Como a capacidade de extração do fósforo por este método varia com o teor de argila, a interpretação dos teores de fósforo é realizada agrupando-se os solos em classes de textura (CQFS–RS/SC, 2004; ANGHINONI; MEURER, 2004).

Na cultura do arroz irrigado, a interpretação dos teores de fósforo no solo não utiliza a divisão por classes de textura como critério auxiliar para a recomendação de adubação, pois, segundo CQFS–RS/SC (2004) e Anghinoni e Meurer (2004), ocorrem aumentos nos teores de fósforo com o alagamento. No entanto, o aumento na disponibilidade de fósforo com o alagamento é bastante variável entre os solos, em função de uma série de características, dentre as quais se destaca a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP). Silva (1996) observou que os teores de fósforo na solução de solos alagados aumentaram em média 3,5 vezes para solos com alta capacidade de adsorção de fósforo, 15,6 vezes para solos com média capacidade de adsorção e 43,9 vezes para solos com baixa capacidade de adsorção. Além disso, a inclusão de características relacionadas ao poder tampão aumenta a capacidade de predição dos métodos de análise (SILVA, 1996; RANNO, 2004), o que é um indicativo de que solos com teores semelhantes de fósforo extraído por Mehlich-1 podem suprir quantidades diferentes de fósforo para o arroz, em virtude de diferenças na capacidade de adsorção de fósforo. Sendo assim, é provável que solos cultivados com arroz irrigado que apresentem teores semelhantes de fósforo devam receber quantidades diferentes do adubo em função das diferenças no poder tampão, assim como ocorre em solos de sequeiro.

Por outro lado, o aumento da capacidade de predição dos métodos de análise com a divisão em classes, não é consistente para todas as classes. No trabalho de Silva (1996), os solos foram divididos em 3 classes, alta, média e baixa capacidade de adsorção de fósforo, e a capacidade de predição dos métodos testados (Mehlich-1 e Resina) aumentou para as classes alta e média e diminuiu para a classe baixa. Ranno (2004) dividiu os solos em classes de textura (classe 1, > 400 g kg⁻¹ de argila; classe 2, 260 a 400 g kg⁻¹ de argila; classe 3, 110 a 250 g kg⁻¹ de argila; e classe 4, < 100 g kg⁻¹ de argila), o que aumentou a capacidade de predição do método Mehlich-1 nas classes 1, 2 e 4 e diminuiu na classe 3. As classes baixa no trabalho de Silva (1996) e 3 no de Ranno (2004) englobam

justamente os Planossolos, que são os solos que ocorrem em mais de 50% das várzeas do Rio Grande do Sul (PINTO; NETO; PAULETTO, 2004). Assim, a inclusão da divisão em classes baseadas em características relacionadas ao poder tampão por fósforo na interpretação das análises de solo, provavelmente melhoraria a recomendação de adubação para a maior parte dos solos de várzea a exceção dos Planossolos.

É provável que entre os Planossolos existam outras características associadas além do teor de argila que estão interferindo na disponibilização do fósforo durante o alagamento. No trabalho de Ranno (2004), os solos da classe 3 (teor de argila entre 110 e 250 g kg⁻¹), embora com teores de argila semelhantes, apresentaram variação acentuada na capacidade máxima de adsorção de fósforo com valores entre 90 até 593 mg kg⁻¹. Silva (1996) conseguiu uniformizar melhor o teor de argila e a capacidade máxima de adsorção de fósforo dentro das classes, mas mesmo assim continuou com problemas nos Planossolos. Porém, nenhum dos autores trabalhou com energia de adsorção, que também pode influenciar na disponibilidade do fósforo e está relacionada com as características da superfície adsorvente e com o tipo de ligação formada com a superfície. Assim, permanece a dúvida se é realmente necessário e possível juntar todas estas informações para a interpretação das análises de fósforo em arroz irrigado.

A ausência de resposta a fósforo verificada principalmente nos Planossolos mesmo nas situações em que os teores de fósforo no solo estão abaixo do nível crítico, indica que existe uma parcela significativa de fósforo no solo que é disponibilizada durante o alagamento e que não é extraída pelos extratores. Ranno (2004) verificou que mais de 80% do fósforo inorgânico nos solos de várzea está ligado a ferro. Porém, deste total, apenas a parcela ligada às formas de ferro de baixa cristalinidade é que será disponibilizada durante o alagamento. Então, o método ideal para avaliar o fósforo disponível durante o alagamento deveria ser aquele que consiga solubilizar essas forma de ferro de baixa cristalinidade.

Um outro aspecto que vem sendo bastante discutido no meio científico em relação à adubação fosfatada em arroz irrigado é a possibilidade de utilização do fosfato natural. Em experimentos de campo com a cultura do arroz irrigado realizados no Rio Grande do Sul, em Planossolos, foram avaliados vários fosfatos naturais, entre os quais Gafsa, Marrocos, Olinda, Jacupiranga e Araxá, comparativamente com o superfosfato simples e superfosfato triplo. Constatou-se,

nesses experimentos, baixa resposta do arroz à adubação fosfatada e absoluta semelhança entre as fontes (PATELLA, 1964 e 1965; SHERER; BACHA, 1972 e 1974; BACHA et al., 1977; LOPES; BACHA; CABRAL, 1983; GOMES et al., 2002). A ausência de diferenças significativas na resposta do arroz aos fosfatos naturais em relação aos solúveis fez com que pesquisadores concluíssem que essas fontes de fósforo apresentam eficiência semelhante para o arroz irrigado. A falta de experimentos que contrariassem essa idéia fez com que ela perdurasse ao longo dos anos e passasse a ser aceita por todos, passando a fazer parte das recomendações técnicas da pesquisa.

Porém, as alterações químicas que ocorrem durante o alagamento são contrárias à solubilização dos fosfatos naturais, que necessitam de certo grau de acidez e de baixas concentrações de fósforo e de cálcio na solução do solo, visto que possuem baixa solubilidade em água (VAHL, 1999). O alagamento promove o aumento do pH e dos teores de fósforo e cálcio na solução do solo. Estas alterações dificultam a dissolução dos fosfatos naturais, causando concentrações de fósforo na solução do solo muito menores do que as observadas com o superfosfato triplo (GONÇALVES, 2003). Em solos com alta capacidade de adsorção de fósforo, as concentrações de fósforo na solução podem estar abaixo do Km (parâmetro cinético de absorção) para o arroz (GONÇALVES, 2003), indicando que a absorção de fósforo poderia estar abaixo da quantidade exigida pelas plantas para o máximo rendimento.

No entanto, os resultados de Gonçalves (2003) foram obtidos em experimentos conduzidos sem a presença de plantas de arroz no solo alagado. Nesta condição, a ausência da absorção exclui o efeito dreno-planta, considerado muito importante na dissolução de fosfatos naturais (NOVAIS; SMYTH, 1999). O dreno-planta é estabelecido quando a planta ao absorver cálcio e fósforo faz baixar a concentração desses elementos na solução do solo, aumentando a dissolução do fosfato natural. Além do dreno-planta, outro fator importante na dissolução de fosfatos naturais é o dreno-solo. Solos com alta capacidade de adsorção de fósforo e alta capacidade de troca de cátions (CTC) adsorvem maiores quantidades de fósforo e cálcio diminuindo as suas concentrações na solução do solo, aumentando a dissolução do fosfato natural.

Atualmente, as doses recomendadas de fosfatos naturais reativos para o arroz são calculadas considerando-se o dobro do teor de P_2O_5 solúvel em ácido

cítrico, que corresponderia, aproximadamente, a um acréscimo de 20% na dose calculada pelo teor de P_2O_5 total (SOSBAI, 2005). Essa recomendação é genérica e não considera o efeito dreno-solo, que deve interferir de forma significativa na solubilização do fosfato natural e no estabelecimento de doses mais adequadas a cada tipo de solo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Delineamento experimental e descrição dos tratamentos

O experimento foi conduzido na casa de vegetação do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia, Eliseu Maciel (FAEM), da Universidade Federal de Pelotas (UFPel), estado do Rio Grande do Sul, nos meses de janeiro e fevereiro de 2006. As análises laboratoriais do experimento foram realizadas nos Laboratórios do Departamento de Solos da FAEM/UFPel. Os tratamentos (duas fontes de fósforo, três solos com diferentes capacidades máximas de adsorção de fósforo - CMAP e seis níveis de fósforo) foram estruturados em um fatorial 2x3x6 e as unidades experimentais dispostas em um delineamento completamente casualizado, com três repetições, totalizando 108 unidades experimentais. Estas foram compostas por amostras de 6 kg de solo seco acondicionadas em vasos plásticos.

a) Fontes de fósforo:

Superfosfato triplo (SFT)

Fosfato natural Daoui (FN)

b) Solos:

Baixa CMAP – Planossolo Háplico¹ (Unidade de Mapeamento Pelotas²)

Média CMAP – Planossolo Háplico¹ (Unidade de Mapeamento Bagé²)

Alta CMAP – Gleissolo Háplico¹ (Unidade de Mapeamento Banhado²)

¹ Classificação dos solos conforme EMBRAPA (2006).

² Classificação das unidades de mapeamento conforme Brasil (1973).

- c) Níveis de fósforo em relação ao teor total de fósforo contido nas fontes:
0, 10, 20, 40, 80, 160 mg kg⁻¹ P

3.2. Coleta e preparo dos solos

As amostras de solo foram formadas pela camada superficial (0-20 cm) de três solos de várzea do estado do Rio Grande do Sul com diferentes capacidades máxima de adsorção de fósforo, coletadas nos municípios de: Capão do Leão (Planossolo Háplico – Pelotas), cujas coordenadas do ponto de coleta foram 31° 48' 59" S – 52° 28' 23" O; Bagé (Planossolo Háplico - Bagé), o ponto de coleta estava localizado a 31° 29' 05" S – 54° 08' 14" O; e Itaqui (Gleissolo Háplico - Banhado) com a coleta realizada nas coordenadas 29° 06' 56" S – 56° 17' 42" O. Para a coleta dos solos foram escolhidas áreas não cultivadas.

As amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com abertura de malha de 10 mm e colocadas em vasos plásticos de 8 litros, em quantidade equivalente a 6 kg de solo seco por vaso. Uma sub-amostra de cada solo, assim preparado, foi passada em peneira com abertura de malha de 2 mm e reservada para análises físicas e químicas.

3.3. Análises químicas e físicas de solo

A caracterização química e física dos solos foi realizada através de sub-amostras de cada solo original onde foram determinados os atributos físicos e químicos apresentados na Tabela 1, segundo a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

Tabela 1. Atributos físicos e químicos de três solos de várzea do Rio Grande do Sul.

Atributo	Solo		
	Planossolo Háplico (Pelotas)	Planossolo Háplico (Bagé)	Gleissolo Háplico (Banhado)
pH água 1:1	4,8	4,9	5,2
Índice SMP	5,3	6,0	5,7
Mat. Org. (mg dm ⁻³)	24	26	35
Argila (mg dm ⁻³)	190	210	330
P-Mehlich (mg dm ⁻³)	8,7	15,5	3,7
K (mg dm ⁻³)	49	81	48
Cu (mg dm ⁻³)	1,8	2,7	6,2
Zn (mg dm ⁻³)	2,1	2,0	2,6
Fe (mg dm ⁻³)	7	12	26
Mn (mg dm ⁻³)	20	27	34
Na (mg dm ⁻³)	41	13	42
Ca (cmol _c dm ⁻³)	2,5	3,7	15,0
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,8	1,8	4,2
Al (cmol _c dm ⁻³)	1,6	0,8	0,2
H+Al (cmol _c dm ⁻³)	9,7	4,4	6,2
CTC _{efetiva} (cmol _c dm ⁻³)	6,0	6,5	19,5
CTC _{pH7} (cmol _c dm ⁻³)	14,1	10,1	25,5
Saturação Bases (%)	31	57	76
Saturação Al (%)	27	12	1

Mat. Org.: Método de Walkley-Black; Argila: Método do densímetro de Bouyoucos; P, K, Na: Mehlich-1; Cu, Zn: HCL 0,1M; Fe: Oxalato de Amônio 0,2 M a pH 3; Ca, Mg, Al, Mn: KCL 1M

3.4. Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo

A Capacidade Máxima de Adsorção de Fósforo (CMAP) foi determinada pela metodologia descrita por Braga (1980), onde para avaliar a adsorção de fósforo, amostras de cada solo são colocadas em contato com soluções de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ com níveis crescentes de fósforo. Após 16 horas de contato, é determinado o fósforo remanescente na solução. A diferença entre os teores iniciais e os remanescentes na solução após as 16 horas de contato é atribuída à adsorção pela fase sólida do solo.

Os dados de P adsorvido e P solução são relacionados segundo a equação de Langmuir: $P_{\text{adsorvido}} = \frac{K \cdot b \cdot P_{\text{solução}}}{1 + K \cdot P_{\text{solução}}}$, onde b é a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) e K é uma constante relacionada à energia de adsorção de fósforo pelo solo (SPOSITO, 1994).

Para determinar os parâmetros b e K é usada a forma linearizada da equação anterior, originando a equação: $\frac{P_{\text{solução}}}{P_{\text{adsorvido}}} = \frac{1}{K \cdot b} + \frac{1}{b} P_{\text{solução}}$ (NOVAIS; SMYTH, 1999). Através da análise de regressão linear entre $P_{\text{solução}}/P_{\text{adsorvido}}$ e $P_{\text{solução}}$, os coeficientes da reta $\frac{P_{\text{solução}}}{P_{\text{adsorvido}}} = B_0 + B_1 P_{\text{solução}}$, relacionam-se com os parâmetros b e K da seguinte forma: $b = \frac{1}{B_1}$ $K = \frac{B_1}{B_0}$.

3.5. Aplicação dos tratamentos

As fontes de adubo fosfatado utilizadas para a obtenção dos níveis de fósforo foram o superfosfato triplo que possui 44% de P_2O_5 total, sendo 40% solúvel em água, e o fosfato natural Daoui, que possui 32% de P_2O_5 total, sendo 10% solúvel em ácido cítrico a 2%. Os fosfatos foram moídos e passados em peneira de 0,250 mm, para uniformizar o tamanho das partículas e facilitar a aplicação no solo. A seguir, foram pesadas quantidades de cada fonte conforme a Tabela 2, que corresponderam às doses de fósforo dos tratamentos. Os adubos foram aplicados individualmente em cada vaso plástico, misturando-os uniformemente aos 6 kg de solo. Os solos passaram por um período de incubação de 20 dias para que ocorressem as reações entre os solos e os adubos fosfatados.

Após o período de incubação, os solos de cada vaso plástico foram retirados dos mesmos e misturados novamente e, ao passo que isso ocorria, amostras foram guardadas para que fossem realizadas análises do teor de fósforo contido em cada amostra de solo com os métodos Mehlich-1 (MEHLICH, 1953) descrito por Tedesco et al., (1995) e Resina trocadora de íons (RAIJ; QUAGGIO, 2001). Retiradas as amostras de solo, os mesmos foram devolvidos aos vasos plásticos. À medida que isso acontecia acomodou-se, a uma profundidade de 10 cm, o sistema de coleta de solução do solo desenvolvido por Sousa, Bohnen e Meurer (2002), o qual consiste

em um tubo de polietileno com duas fileiras de orifícios recoberto com tela de nylon, construído na forma de espiral acoplado a um sifão de vidro projetado para fora do vaso. Isso permite a retirada da solução do solo sem utilizar sucção forte, evitando dessa maneira o entupimento da tela de nylon ou o arrastamento de partículas de solo junto com a solução. Esse sistema de coleta de solução do solo foi colocado nas três repetições dos seguintes tratamentos: 0, 40, 160 mg kg⁻¹ P dos três solos.

Tabela 2. Quantidades de adubo aplicadas em cada vaso conforme as fontes e as doses de fósforo utilizadas.

Doses de P (mg kg ⁻¹)	Doses de P ₂ O ₅ (kg ha ⁻¹)	Quantidade de adubo (g vaso ⁻¹)	
		FN	SFT
0	0	0	0
10	46	0,448	0,323
20	92	0,895	0,645
40	183	1,791	1,291
80	366	3,582	2,581
160	733	7,164	5,163

3.6. Condução do experimento na casa de vegetação

Sementes da variedade BRS 7 “Taim”, foram pré-germinadas durante um período de 3 dias em bandejas com papéis toalha umedecidos. Depois de pré-germinadas, 8 sementes foram transplantadas em cada vaso plástico. O solo foi mantido saturado com água durante 7 dias para que as plântulas de arroz fixassem as raízes ao solo e desenvolvessem parte aérea suficiente para suportar a lâmina de água aplicada ao fim do período. Essa lâmina possuía uma altura de 5 cm e foi mantida constante até o final do experimento através de irrigações diárias com água destilada. Passados 19 dias do transplante das plantas foi realizado um desbaste, mantendo-se 3 plantas de arroz por vaso.

As aplicações de nitrogênio e potássio, na forma de uréia e cloreto de potássio, foram definidas através dos resultados das análises dos solos e da interpretação das tabelas de recomendação de adubação da CQFS–RS/SC (2004). Aplicou-se na base doses equivalentes a 50 kg ha⁻¹ de N (dobro da recomendação) e 80 kg ha⁻¹ de K₂O (uma vez e meia a recomendação), ainda foi aplicado em

cobertura aos 19 dias do transplante a dose de 50 kg ha^{-1} de N e aos 30 dias as doses de 50 kg ha^{-1} de N e 80 kg ha^{-1} de K_2O . Para facilitar a aplicação dos adubos no solo, em função das pequenas quantidades, diluiu-se a uréia e o cloreto de potássio em água destilada e aplicou-se a solução com uma seringa calibrada de 20 ml.

3.7. Análises da solução do solo

As coletas de solução dos solos foram realizadas quatro vezes, aos 8, 15, 28 e 43 dias após o transplante. Após a coleta as amostras foram filtradas em filtro milipore de $0,45 \mu\text{m}$, transferindo-se aproximadamente 25 ml de solução para frascos de vidro, contendo 1 ml de $\text{HCl } 2,5 \text{ mol L}^{-1}$, para que a concentração final de HCl da amostra ficasse em torno de $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, possibilitando, desta maneira, a análise da composição química das amostras em laboratório. Nas amostras da solução do solo foram avaliados os teores de fósforo por colorimetria seguindo o método descrito por Murphy e Riley (1962).

3.8. Coleta da parte aérea das plantas e análises de tecido vegetal

O arroz foi cultivado por um período de 45 dias até o início do período reprodutivo (diferenciação do primórdio da panícula). A colheita da parte aérea das plantas foi realizada com o corte rente ao solo, e o material foi seco em estufa a 60°C de temperatura, até peso constante, quando foi determinado o peso de matéria seca (PMS) do material em balança de precisão ($0,01\text{g}$), em seguida o material vegetal foi moído para as posteriores análises químicas.

Foi determinado o fósforo da matéria seca seguindo a metodologia descrita por Tedesco et al., (1995). A quantidade deste elemento acumulado na parte aérea das plantas foi calculada a partir das quantidades de matéria seca produzida por vaso e os respectivos teores na matéria seca.

3.9. Análise estatística

Os resultados da produção de matéria seca, do teor de fósforo no tecido e da quantidade de fósforo acumulado, na parte aérea das plantas de arroz foram submetidos à análise de variância pelo teste F e quando os efeitos foram significativos para o fator quantitativo, foram ajustadas equações de regressão polinomial de 1º grau (modelo linear) e 2º grau (modelo quadrático). Os níveis dos fatores qualitativos foram comparados pelo teste de comparação de médias de Tukey a 5% de probabilidade.

Para os dados de fósforo acumulado na parte aérea das plantas de arroz e os métodos de estimativa de fósforo disponível no solo (Mehlich-1 e Resina Trocadora de Íons em esfera) foram ajustadas equações de regressão linear simples e realizadas análises de correlação linear simples de Pearson, considerando os níveis de significância maiores que 95% ($\alpha < 0,05$).

O programa estatístico utilizado para a análise dos dados foi o WinStat (MACHADO; CONCEIÇÃO, 2001).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Capacidade de adsorção de fósforo pelos solos

A relação entre $P_{\text{adsorvido}}$ e $P_{\text{solução}}$ é apresentada na Figura 1. Os parâmetros da regressão linear entre $P_{\text{solução}}/P_{\text{adsorvido}}$ e $P_{\text{solução}}$, e os parâmetros da equação de Langmuir para cada um dos três solos são apresentados na Tabela 3 e a distribuição dos pontos dessa relação está na Figura 2.

Observa-se na Figura 1, que as isotermas de adsorção de fósforo assumiram a forma L (SPARKS, 1995), onde a afinidade inicial é alta e, conforme aumenta a cobertura da superfície, diminuem a afinidade e a declividade (SPOSITO, 1994). Os altos coeficientes de determinação observados na forma linearizada da equação de Langmuir (Tabela 3, Figura 2), confirmam que a adsorção de fósforo nos três solos pode ser descrita por essa equação.

Os valores encontrados para a capacidade máxima de adsorção de fósforo (parâmetro b da equação de Langmuir na Tabela 3) confirmam que o Planossolo Háplico (Pelotas) apresenta baixa capacidade máxima de adsorção de fósforo, o Planossolo Háplico (Bagé) média capacidade máxima de adsorção de fósforo e o Gleissolo Háplico (Banhado) alta capacidade máxima de adsorção de fósforo. Silva (1996), trabalhando com 11 solos de várzea de lavouras orizícolas do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, dividiu os mesmos em 3 grupos, de acordo com os valores de b : 435 a 667 mg kg^{-1} , alta capacidade máxima de adsorção de fósforo; 333 a 370 mg kg^{-1} , média capacidade máxima de adsorção de fósforo e 137 a 250 mg kg^{-1} , baixa capacidade máxima de adsorção de fósforo. O mesmo autor usando a mesma metodologia de avaliação da capacidade máxima de adsorção de fósforo deste trabalho e também usando solos da mesma classificação (Planossolo Háplico - Pelotas e Gleissolo Háplico - Banhado) encontrou valores de b (145 mg kg^{-1} para o

Planossolo Háplico - Pelotas e 556 mg kg⁻¹ para o Gleissolo Háplico - Banhado) da mesma ordem de magnitude apresentadas neste trabalho.

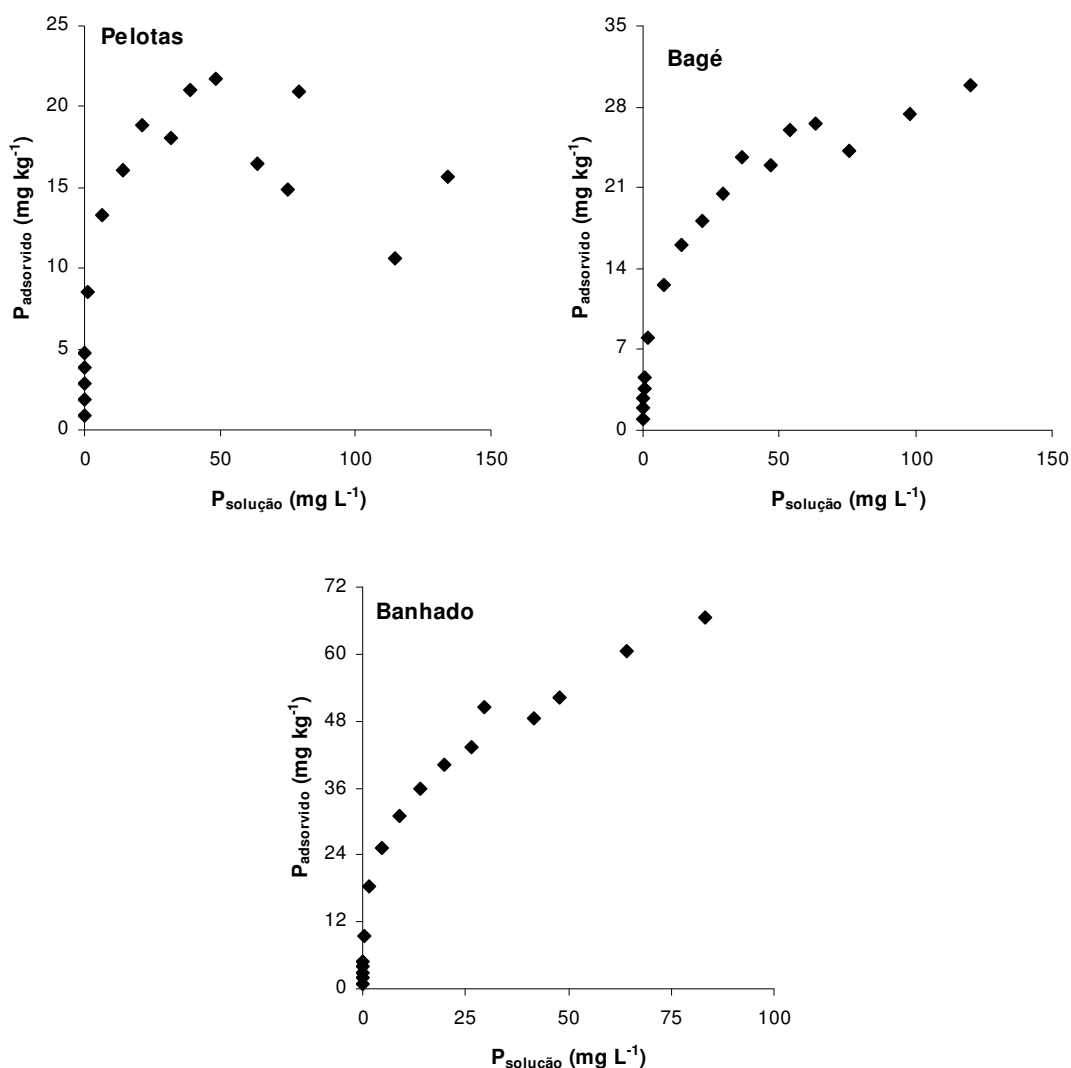


Figura 1. Adsorção de fósforo em função da aplicação de níveis crescentes de fósforo (0, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 125 e 150 mg kg⁻¹) a três solos de várzea do Rio Grande do Sul.

Tabela 3. Coeficiente linear (B_0) e angular (B_1), coeficiente de determinação (r^2) da relação linear entre $P_{\text{solução}}/P_{\text{adsorvido}}$ e $P_{\text{solução}}$ e os parâmetros da equação de Langmuir (b e K) para a adsorção de fósforo em três solos de várzea do Rio Grande do Sul.

Solos	B_0	B_1	r^2	b (mg kg ⁻¹)	K
Planossolo Háplico (Pelotas)	0,0221	0,0071	0,91**	141	0,32
Planossolo Háplico (Bagé)	0,0226	0,0035	0,98**	286	0,15
Gleissolo Háplico (Banhado)	0,0089	0,0016	0,96**	625	0,18

(**) Significativo ao nível de 1% de probabilidade

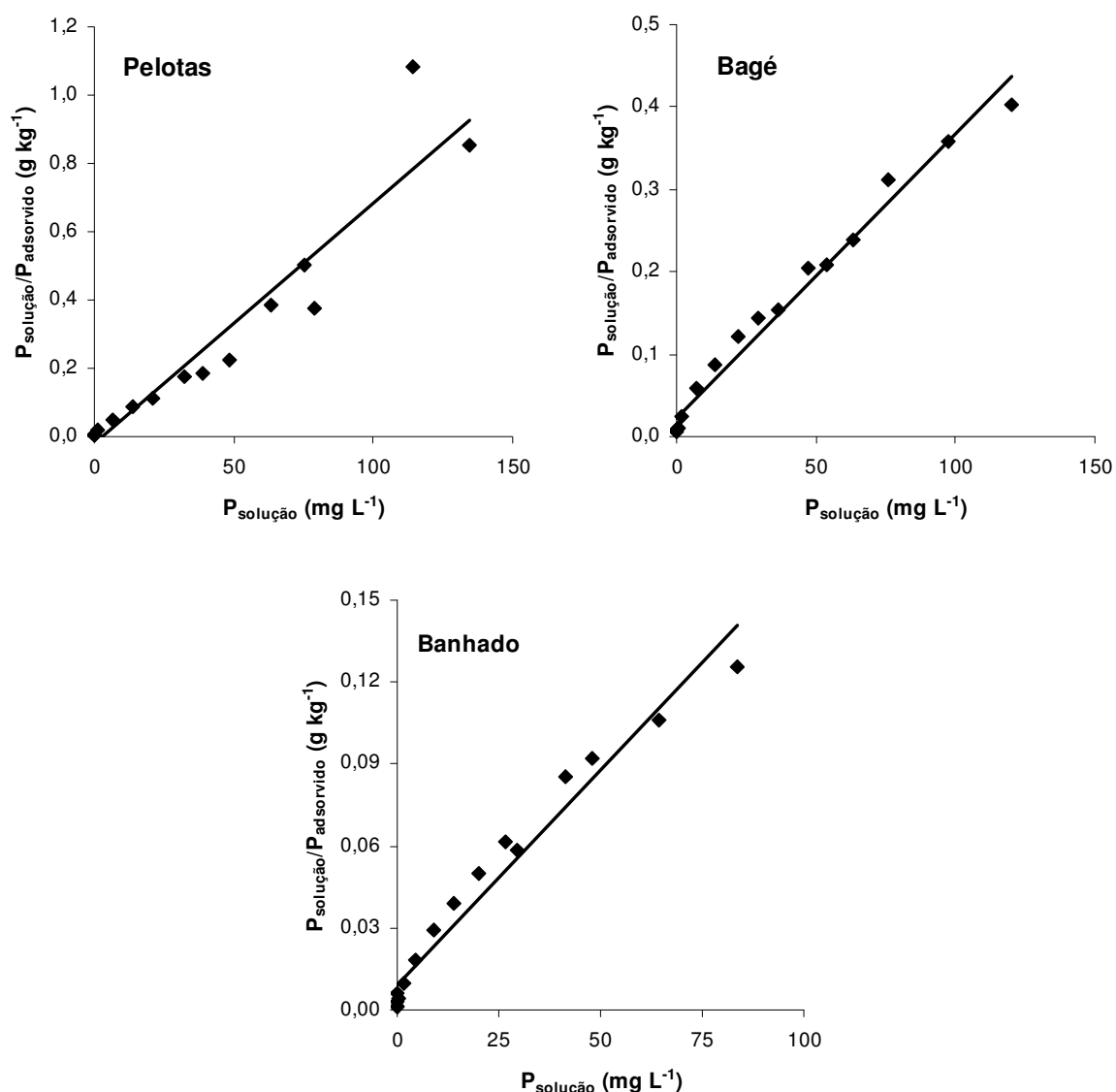


Figura 2. Distribuição dos pontos $P_{\text{solução}}/P_{\text{adsorvido}} \times P_{\text{solução}}$ da forma linear da equação de Langmuir para o fósforo em três solos de várzea do Rio Grande do Sul.

A alta variação da capacidade máxima de adsorção de fósforo (b), (141 a 625 mg kg^{-1}), encontrada neste trabalho é devida às diferenças nos materiais de origem dos solos estudados e à ação dos agentes de intemperismo, ao longo do tempo, que originaram solos com características físicas e químicas distintas e com colóides que interagem diferentemente com o fósforo. Os principais colóides da fase sólida do solo responsáveis pela adsorção do fósforo são os óxidos de ferro e alumínio e os minerais de argila do tipo 1:1 (PARFITT; ATKINSON; SMART, 1978; HUE, 1991; VIOLANTE; COLOMBO; BUONDONND, 1991).

Vários autores (KHALID; PATRICK Jr; DELAUNE, 1977; SAH; MIKKELSEN; HAJES, 1989; WILLETT, 1989; AMER; SALEH; MOSTAFA, 1991; SHAHANDEH; HOSSNER; TURNER, 1994b e 2003) consideram os óxidos de ferro de baixa cristalinidade extraíveis com oxalato de amônio, como os principais adsorvedores de fósforo em solos de várzea. Vahl (1989) e Ranno (2004) trabalhando com solos de várzea do Rio Grande do Sul e Santa Catarina mostraram que os solos derivados de basalto, neste trabalho representado pelo Gleissolo Háptico (Banhado), possuem teores de ferro maiores que os Planossolos. A partir dos valores de b, da Tabela 3, e dos valores de ferro, da Tabela 1, verifica-se que o Planossolo Háptico (Pelotas) apresenta menores teores de ferro e menor capacidade máxima de adsorção de fósforo e o Gleissolo Háptico (Banhado) maiores teores de ferro e maior capacidade máxima de adsorção de fósforo. Esses dados concordam com o que foi demonstrado pelos autores acima citados.

Silva (1996) encontrou uma baixa relação ($r^2=0,41$) entre os valores de b e o teor de argila e atribuiu isso à mineralogia da fração argila da maioria dos solos por ele estudados, os quais possuíam teores variáveis de argila do tipo 2:1, que não são eficientes adsorvedores de fósforo. Logo, o autor concluiu que o teor de argila em si não é um bom indicador de capacidade de adsorção de fósforo nesses solos. Já Ranno (2004) encontrou uma correlação positiva ($r=0,81$) entre esses parâmetros, demonstrando a dependência entre a capacidade máxima de adsorção de fósforo e o teor de argila presente no solo, ou seja, quanto maior o teor de argila maior a adsorção de fósforo do solo. Entretanto, este autor, assim como Silva (1996), trabalhou com solos pouco intemperizados, que possuem um tipo de argila que não apresenta muitos grupos funcionais eficientes na adsorção de fósforo, o que diminui a importância dessa correlação. Então, para este trabalho, embora não tenham sido feitas análises de correlações entre a capacidade máxima de adsorção de fósforo e os teores de ferro extraídos com oxalato de amônio e entre a capacidade máxima de adsorção de fósforo e os teores de argila, devido ao pequeno número de solos estudados, verificou-se que houve um aumento na capacidade máxima de adsorção de fósforo com o aumento do teor de argila e dos teores de ferro.

4.2. Produção de matéria seca pela parte aérea das plantas de arroz

O teste de análise de variância sobre o peso de matéria seca da parte aérea das plantas de arroz mostrou que a interação tripla entre fontes x solos x doses não foi significativa ao nível de 5%, já as interações fontes x solos e solos x doses foram significativas ao nível de 1% de probabilidade. A Tabela 4 apresenta os resultados do peso de matéria seca da parte aérea em função das fontes de fósforo e dos solos, e na Figura 3 são apresentadas às curvas de respostas do peso de matéria seca da parte aérea das plantas de arroz em função das doses de fósforo utilizadas para cada fonte de fósforo e tipo de solo. Pode-se observar que o Planossolo Háplico (Bagé) proporcionou as maiores produções de matéria seca independente da fonte de fósforo utilizada (Tabela 4). Na comparação entre as fontes de fósforo, para este solo, não houve diferenças significativas (Tabela 4) e não ocorreram respostas significativas as diferentes doses de fósforo aplicadas ao solo (Figura 3). Isso se deve ao teor inicial, muito alto, de fósforo disponível nesse solo ($15,5 \text{ mg kg}^{-1}$, Tabela 1), que ultrapassa o valor mínimo ($12,0 \text{ mg kg}^{-1}$) da classe muito alto, para solos alagados (CQFS-RS/SC, 2004), onde não são esperadas respostas significativas à adição de fósforo (Apêndice 2).

Tabela 4. Valores da produção de matéria seca da parte aérea das plantas de arroz em função das duas fontes de fósforo e dos três solos de várzea.

Solo	Fonte de fósforo	
	FN	SFT
	----- g vaso ⁻¹ -----	
Planossolo Háplico (Bagé)	32,0 Aa	31,6 Aa
Gleissolo Háplico (Banhado)	17,8 Bb	21,8 Ba
Planossolo Háplico (Pelotas)	15,8 Ca	16,0 Ca
DMS (solos)		1,6
DMS (fontes)		1,3
CV (%)		9,0

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%)

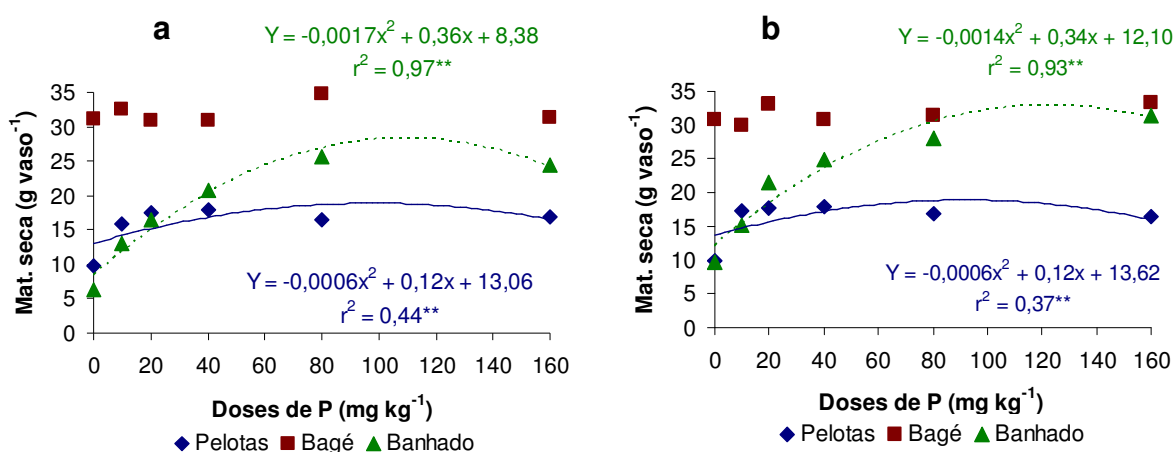


Figura 3. Peso de matéria seca da parte aérea de plantas de arroz em função das fontes de fósforo (a - fosfato natural, b - superfosfato triplo) e das doses de fósforo aplicadas aos solos.

A produção de matéria seca da parte aérea das plantas no Gleissolo Háplico (Banhado) foi superior a do Planossolo Háplico (Pelotas) e inferior a do Planossolo Háplico (Bagé) independentemente da fonte de fósforo utilizada (Tabela 4), sendo que no Gleissolo Háplico (Banhado), o superfosfato triplo proporcionou maior produção de matéria seca da parte aérea do que o fosfato natural (Tabela 4). Isso pode ser explicado pela diferença de solubilidade apresentada por essas duas fontes de fósforo. O fósforo contido no superfosfato triplo é quase totalmente solúvel em água, sendo rapidamente disponibilizado para as plantas, enquanto que no fosfato natural reativo, apenas uma parcela do fósforo encontra-se prontamente disponibilizada para as plantas. Como o Gleissolo Háplico (Banhado) é um solo que possui alta capacidade máxima de adsorção de fósforo, são necessárias grandes quantidades de fósforo aplicadas no solo para se manter uma alta concentração desse elemento na solução do solo. O superfosfato triplo possui 40% do P_2O_5 solúvel em água e o fosfato natural possui 10% do P_2O_5 solúvel em ácido cítrico (CQFS–RS/SC, 2004). Por isso, o superfosfato triplo conseguiu manter maiores quantidades de fósforo na solução do solo do que o fosfato natural (Figura 4 e Apêndice 3). Nesse solo, essa maior disponibilidade de fósforo na solução do solo nos tratamentos que utilizaram o superfosfato triplo se refletiu na maior produção de matéria seca das plantas em relação aos tratamentos que utilizaram o fosfato natural. Esse solo apresentou resposta significativa e positiva em relação as diferentes doses de fósforo aplicadas ao solo, em ambas as fontes (Figura 3), ou seja, à medida que houve um aumento da quantidade de fósforo aplicada no solo, as

plantas de arroz responderam com um aumento na produção de matéria seca da parte aérea até a dose de 106 mg kg^{-1} de P quando foi utilizado o fosfato natural e 121 mg kg^{-1} de P quando foi usado o superfosfato triplo. Embora esse ajuste tenha gerado equações com coeficientes de determinação altos ($r^2=0,97$ para o fosfato natural e $r^2=0,93$ para o superfosfato triplo), quando foi realizado o teste de comparação de médias desses dados, não foram encontradas diferenças significativas entre as doses de 80 e 160 mg kg^{-1} de P (Apêndice 2). Isso mostra que uma dose de fósforo maior que 80 mg kg^{-1} não resultaria numa produção de matéria seca estatisticamente superior.

O Planossolo Háplico (Pelotas) proporcionou as menores produções de matéria seca da parte aérea das plantas, independente da fonte de fósforo utilizada e não houve diferença significativa entre as fontes de fósforo (Tabela 4). O Planossolo Háplico (Pelotas) apresentou resposta significativa e positiva em relação as diferentes doses de fósforo aplicadas ao solo em ambas as fontes de fósforo (Figura 3), ou seja, à medida que houve um aumento da quantidade de fósforo aplicada no solo, as plantas de arroz responderam com um aumento na produção de matéria seca da parte aérea até a dose de 100 mg kg^{-1} de P para os tratamentos que receberam fosfato natural e também para os tratamentos em que foi usado o superfosfato triplo. Nesse solo as equações geradas pelo ajuste das regressões polinomiais de modelo quadrático tiveram baixos coeficientes de determinação ($r^2=0,44$ para o fosfato natural e $r^2=0,37$ para o superfosfato triplo). Ao analisar o teste de comparação de médias do peso de matéria seca das plantas em relação às doses de fósforo nesse solo (Apêndice 2), infere-se que só existiu diferença significativa entre o tratamento sem adição de fósforo (testemunha) para com os tratamentos com adição de fósforo. Nos tratamentos que foram adicionadas doses de fósforo não houve diferenças significativas entre eles. Com isso pode-se concluir que as plantas responderam com aumento do peso de matéria seca até a dose de 10 mg kg^{-1} de P, que é uma dose muito inferior àquela calculada pela equação da curva de resposta. Essa baixa resposta à adubação fosfatada e a equivalência entre as fontes de fósforo nesse solo já foi demonstrada em diversos experimentos de campo com a cultura do arroz irrigado, realizados no Rio Grande do Sul, onde foram avaliados vários fosfatos naturais comparativamente com superfosfatos simples e triplos (PATELLA, 1964 e 1965; SHERER; BACHA, 1972 e 1974; BACHA et al., 1977; LOPES; BACHA; CABRAL, 1983; GOMES et al., 2002).

Analisando os dados dos Apêndices 2 e 7, pode-se observar também, que os solos responderam com aumento do peso de matéria seca da parte aérea das plantas até que o teor de fósforo no solo atingisse, aproximadamente, 15 mg kg^{-1} . Pois, o Planossolo Háplico (Bagé) possuía teor inicial de fósforo no solo acima de 15 mg kg^{-1} , e com isso não apresentou resposta na produção de matéria seca da parte aérea das plantas. O Planossolo Háplico (Pelotas) possuía teor inicial de fósforo no solo de, aproximadamente, 9 mg kg^{-1} , e aumentou com a 1ª dose ($10 \text{ mg kg}^{-1} \text{ P}$) para, aproximadamente, 12 mg kg^{-1} , onde a partir dessa dose não obteve mais reposta na produção de matéria seca da parte aérea. Já o Gleissolo Háplico (Banhado) possuía teor inicial de fósforo no solo de, aproximadamente, 8 mg kg^{-1} , e apresentou resposta na produção de matéria seca da parte aérea até acima da 4ª dose ($40 \text{ mg kg}^{-1} \text{ P}$), onde o teor de fósforo no solo atingiu, aproximadamente 15 mg kg^{-1} . Sendo que o Gleissolo Háplico (Banhado), que possuía a maior capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), necessitou da maior quantidade de fósforo aplicada no solo para atingir a máxima produção de matéria seca da parte aérea.

A Figura 4 apresenta os gráficos da concentração de fósforo na solução do solo em função de fontes e doses de fósforo em três solos de várzea do Rio Grande do Sul, em quatro períodos de coleta. Quando a fonte de fósforo utilizada foi o fosfato natural, o Planossolo Háplico (Pelotas) disponibilizou as maiores quantidades de fósforo na solução do solo e o Gleissolo Háplico (Banhado) as menores, nos quatros períodos de coleta. Quando a fonte de fósforo utilizada foi o superfosfato triplo, o Gleissolo Háplico (Banhado) também disponibilizou as menores quantidades de fósforo na solução do solo no quatro períodos de coleta. O Planossolo Háplico (Bagé) proporcionou as maiores quantidades de fósforo na solução do solo na primeira e segunda coleta e o Planossolo Háplico (Pelotas) na terceira e quarta coleta. Entretanto na média das quatro coletas, o Planossolo Háplico (Pelotas) proporcionou as maiores quantidades de fósforo na solução do solo (Apêndice 3). Esses resultados da concentração de fósforo na solução do solo (Figura 4 e Apêndice 3) são coerentes com a capacidade máxima de adsorção de fósforo apresentada pelos solos, pois o Planossolo Háplico (Pelotas), que possui baixa capacidade máxima de adsorção de fósforo, apresentou os maiores teores de fósforo na solução do solo, independentemente da fonte de fósforo utilizada.

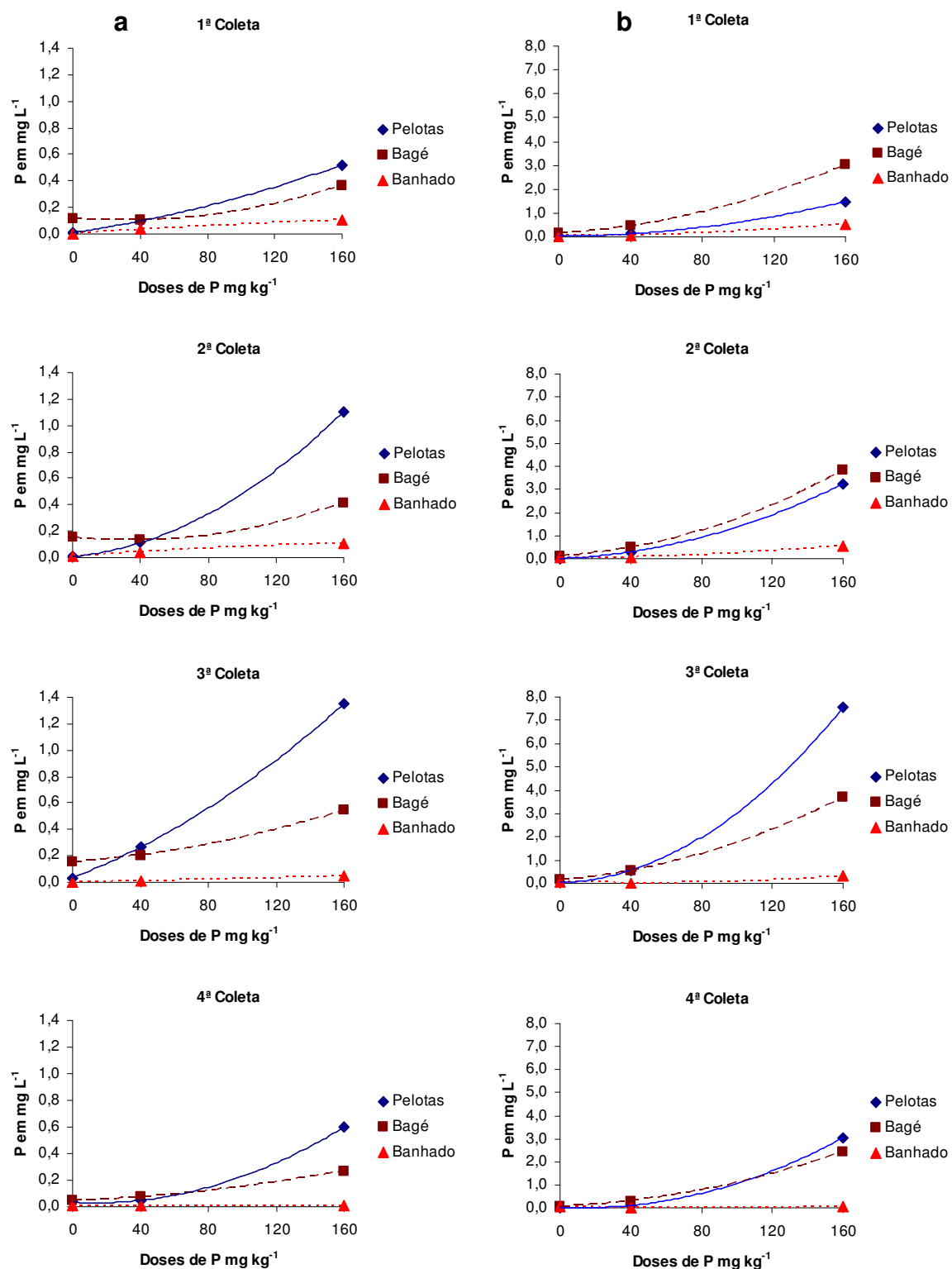


Figura 4. Concentração de fósforo na solução do solo em função de fontes (a - fosfato natural, b - superfosfato triplo) e doses de fósforo para três solos de várzea do Rio Grande do Sul, em quatro períodos de coleta (1, 8, 22, 36 dias de alagamento).

O Planossolo Háplico (Bagé), que possui um valor médio de capacidade máxima de adsorção de fósforo, apresentou valores intermediários de fósforo na solução do solo, enquanto que o Gleissolo Háplico (Banhado) apresentou as mais baixas concentrações de fósforo na solução do solo, também independentemente da fonte de fósforo utilizada, por possuir a mais alta capacidade máxima de adsorção de fósforo.

Quanto maior a capacidade de adsorção de fósforo pelo solo, menores os teores do elemento na solução do solo (NOVAIS; SMYTH, 1999). Isso ocorre porque a capacidade de adsorção de fósforo está diretamente relacionada com os teores de argila e ferro presentes no solo, pois esses elementos são responsáveis pela adsorção da maior parte do fósforo na fase sólida do solo, ou seja, quanto maiores as quantidades desses elementos no solo maior é a capacidade de adsorção de fósforo e, em consequência, menor é a concentração de fósforo na solução do solo.

4.3. Teor de fósforo no tecido da parte aérea das plantas de arroz

O teste de análise de variância sobre o teor de fósforo no tecido da parte aérea das plantas de arroz mostrou que a interação tripla entre fontes x solos x doses não foi significativa ao nível de 5%, já a interação fontes x solos foi significativa ao nível de 1% de probabilidade. A Tabela 5 apresenta os resultados dos teores de fósforo no tecido da parte aérea das plantas de arroz em função das fontes de fósforo e dos solos. Na Figura 5 são apresentadas as curvas de respostas dos teores de fósforo na parte aérea das plantas em função das doses de fósforo para cada fonte e solo utilizado.

Observa-se na Tabela 5 que o Planossolo Háplico (Pelotas) proporcionou o maior teor de fósforo no tecido e o Gleissolo Háplico (Banhado) o menor teor de fósforo no tecido, quando a fonte de fósforo utilizada foi o fosfato natural. O Planossolo Háplico (Bagé) proporcionou o teor intermediário de fósforo no tecido para essa fonte de fósforo. Quando a fonte de fósforo utilizada foi o superfosfato triplo, o Planossolo Háplico (Bagé) proporcionou o maior teor de fósforo no tecido e o Gleissolo Háplico (Banhado) o menor teor de fósforo no tecido. Já para essa fonte de fósforo foi o Planossolo Háplico (Pelotas) que proporcionou o teor intermediário de fósforo no tecido.

Tabela 5. Teor de fósforo (g kg^{-1}) na parte aérea de plantas de arroz cultivadas em três solos de várzea adubados com fosfato natural (FN) e superfosfato triplo (SFT).

Solo	Fonte de fósforo	
	FN	SFT
----- g kg^{-1} -----		
Planossolo Háplico (Pelotas)	3,13 Ab	3,48 Ba
Planossolo Háplico (Bagé)	2,84 Bb	3,78 Aa
Gleissolo Háplico (Banhado)	1,69 Cb	2,38 Ca
DMS (solos)	0,21	
DMS (fontes)	0,18	
CV (%)	9,2	

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%)

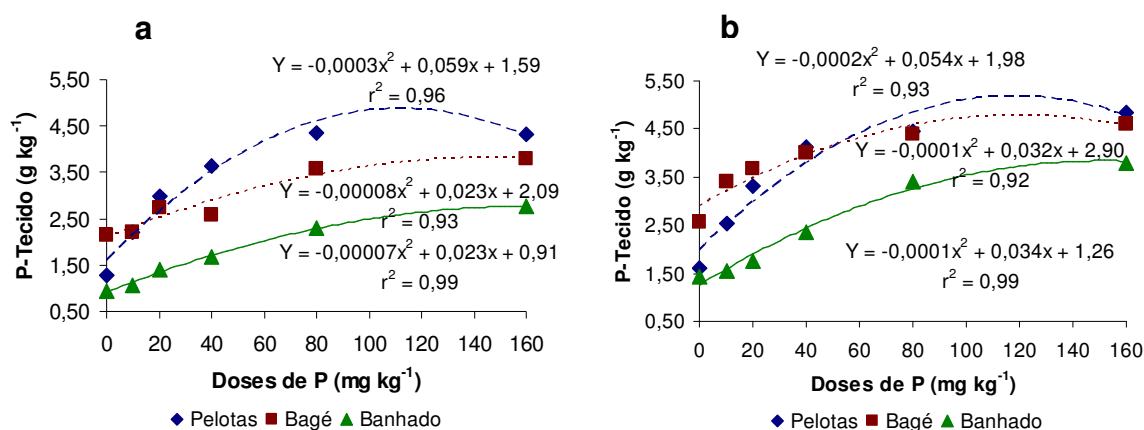


Figura 5. Teor de fósforo na parte aérea de plantas de arroz em função das fontes de fósforo (a - fosfato natural; b - superfosfato triplo) e das doses de fósforo aplicadas aos solos.

Quando se compararam as diferenças entre as fontes de fósforo dentro de cada solo, verificou-se que o superfosfato triplo foi a fonte de fósforo que proporcionou os maiores teores de fósforo no tecido, independente do solo estudado. Isso pode ser explicado pelas diferentes quantidades de fósforo presentes na solução do solo entre as duas fontes (Figura 4). Os tratamentos que utilizaram o superfosfato triplo mantiveram maiores teores de fósforo na solução do solo do que os tratamentos que utilizaram o fosfato natural, em todas as épocas em que foram realizadas as análises (Figura 4). Então, quanto maior é a disponibilidade de um elemento no solo, a planta responde com maior absorção desse elemento.

Ao analisar-se a Figura 5, observa-se que as plantas de arroz responderam de forma positiva as doses de fósforo aplicadas ao solo. À medida que se aumentou a dose de fósforo aplicada ao solo, as plantas de arroz apresentaram maior teor de fósforo no tecido, independente da fonte de fósforo utilizada e do solo estudado. Quando a fonte de fósforo usada foi o fosfato natural, o Planossolo Háplico (Pelotas) atingiu o máximo teor de fósforo no tecido na dose de 98 mg kg^{-1} , o Planossolo Háplico (Bagé) atingiu o máximo teor de fósforo no tecido na dose de 144 mg kg^{-1} e o Gleissolo Háplico (Banhado) atingiria o máximo teor de fósforo no tecido na dose de 164 mg kg^{-1} . Quando a fonte de fósforo utilizada foi o superfosfato triplo, o Planossolo Háplico (Pelotas) atingiu o máximo teor de fósforo no tecido na dose de 135 mg kg^{-1} , o Planossolo Háplico (Bagé) atingiu o máximo teor de fósforo no tecido na dose de 158 mg kg^{-1} e o Gleissolo Háplico (Banhado) atingiria o máximo teor de fósforo no tecido na dose de 170 mg kg^{-1} .

4.4. Quantidade de fósforo acumulada na parte aérea das plantas de arroz

O teste de análise de variância sobre a quantidade de fósforo acumulada na parte aérea das plantas de arroz mostrou que a interação tripla entre fontes x solos x doses não foi significativa ao nível de 5%, já a interação fontes x solos foi significativa ao nível de 1% de probabilidade. A Tabela 6 apresenta os resultados da quantidade de fósforo acumulada na parte aérea das plantas de arroz em função das fontes de fósforo e dos solos. Na Figura 6 são apresentadas as curvas de respostas da quantidade de fósforo acumulada na parte aérea das plantas em função das doses de fósforo para cada fonte e solo utilizado.

Observa-se na Tabela 6 que o Planossolo Háplico (Bagé) proporcionou a maior acumulação de fósforo na parte aérea das plantas e o Gleissolo Háplico (Banhado) a menor acumulação de fósforo na parte aérea das plantas, quando a fonte de fósforo utilizada foi o fosfato natural. O Planossolo Háplico (Pelotas) acumulou a quantidade intermediária de fósforo na parte aérea das plantas para essa fonte de fósforo. Quando a fonte de fósforo utilizada foi o superfosfato triplo, o Planossolo Háplico (Bagé), também, acumulou a maior quantidade de fósforo na parte aérea das plantas. O Gleissolo Háplico (Banhado) e o Planossolo Háplico (Pelotas) acumularam as menores quantidades de fósforo na parte aérea das

plantas, não apresentando diferença significativa, entre estes solos, quando foi utilizado o superfosfato triplo como fonte de fósforo.

Tabela 6. Quantidade de fósforo acumulada na parte aérea das plantas de arroz em função das duas fontes de fósforo e dos três solos de várzea.

Solo	Fonte de fósforo	
	FN	SFT
	----- mg vaso ⁻¹ -----	
Planossolo Háptico (Bagé)	91,3 Ab	119,6 Aa
Planossolo Háptico (Pelotas)	51,6 Bb	57,8 Ba
Gleissolo Háptico (Banhado)	34,1 Cb	58,1 Ba
DMS (solos)	6,0	
DMS (fontes)	5,0	
CV (%)	11,0	

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%)

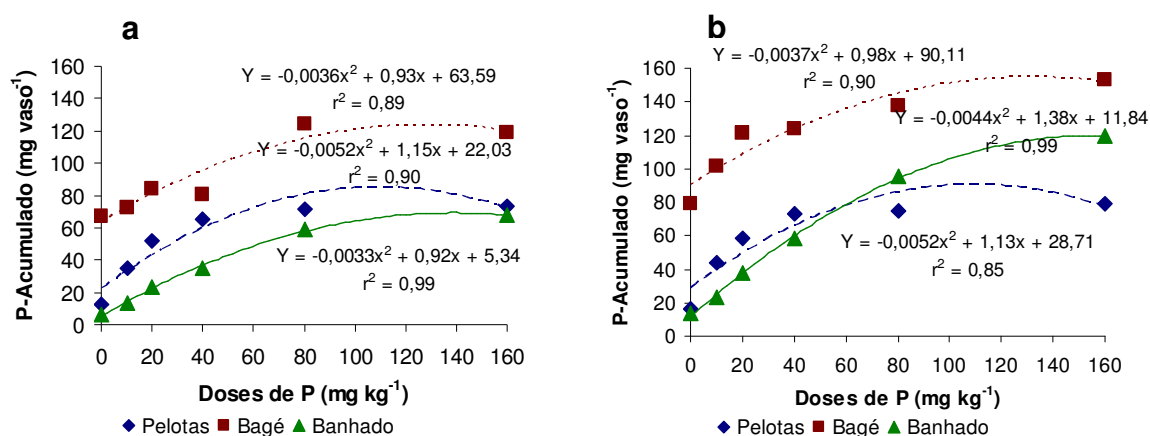


Figura 6. Quantidade de fósforo acumulada na parte aérea de plantas de arroz em função das fontes de fósforo (a - fosfato natural; b - superfosfato triplo) e das doses de fósforo aplicadas aos solos.

Quando se comparou as diferenças entre as fontes de fósforo dentro de cada solo, verificou-se, para todos os solos, que o superfosfato triplo foi a fonte de fósforo que proporcionou as maiores quantidades acumuladas de fósforo na parte aérea das plantas. Isso também pode ser explicado pela quantidade de fósforo presente na solução do solo em relação as duas fontes, como verificado para o teor de fósforo no tecido. Os tratamentos que utilizaram o superfosfato triplo mantiveram maiores teores de fósforo na solução do solo do que os tratamentos que utilizaram o fosfato natural, em todas as épocas em que foram realizadas as análises (Figura 4).

Então, quanto maior é a disponibilidade de um elemento no solo a planta responde com maior absorção desse elemento.

Ao analisar-se a Figura 6 observa-se que as plantas de arroz responderam de forma positiva as doses de fósforo aplicadas ao solo. Na medida em que aumentava a dose de fósforo aplicada ao solo as plantas de arroz aumentavam a quantidade de fósforo acumulada na parte aérea, independente da fonte de fósforo utilizada e do solo estudado. Quando a fonte de fósforo usada foi o fosfato natural, o Planossolo Háplico (Pelotas) atingiu a máxima quantidade de fósforo acumulada na parte aérea das plantas na dose de 110 mg kg^{-1} , o Planossolo Háplico (Bagé) atingiu a máxima quantidade de fósforo acumulada na parte aérea das plantas na dose de 130 mg kg^{-1} e o Gleissolo Háplico (Banhado) atingiu a máxima quantidade de fósforo acumulada na parte aérea das plantas na dose de 139 mg kg^{-1} . Quando a fonte de fósforo utilizada foi o superfosfato triplo, o Planossolo Háplico (Pelotas) atingiu a máxima quantidade de fósforo acumulada na parte aérea das plantas na dose de 109 mg kg^{-1} , o Planossolo Háplico (Bagé) atingiu a máxima quantidade de fósforo acumulada na parte aérea das plantas na dose de 132 mg kg^{-1} e o Gleissolo Háplico (Banhado) atingiu a máxima quantidade de fósforo acumulada na parte aérea das plantas na dose de 157 mg kg^{-1} .

4.5. Fósforo extraível com o extrator Mehlich-1 e com o método da Resina Trocadora de Íons

Na Figura 7, são apresentados os gráficos dos teores de fósforo extraídos pelos extratores Mehlich-1 e Resina Trocadora de Íons (em função das doses de fósforo aplicadas aos três solos de várzea adubados com duas fontes de fósforo) nas amostras de solo retiradas após o período de incubação dos solos, pós-aplicação dos adubos. Houve um aumento nos teores de fósforo no solo com o aumento das doses de fósforo aplicadas ao solo. Os teores de fósforo extraídos pelo método da Resina foram maiores do que os teores de fósforo extraídos pelo extrator Mehlich-1.

Nos tratamentos onde não foi aplicado fósforo (testemunha), o Planossolo Háplico (Bagé) apresentou os maiores teores de fósforo no solo para ambos os métodos de extração de fósforo em estudo. O Planossolo Háplico (Pelotas) e o

Gleissolo Háplico (Banhado) apresentaram, nesses tratamentos, teores semelhantes de fósforo no solo em ambos os métodos de extração de fósforo.

Conforme as tabelas de interpretação do teor de fósforo no solo extraído pelo método Mehlich-1 para os solos alagados e pelo método da Resina em lâminas, da CQFS-RS/SC (2004), os teores iniciais de fósforo presentes no Planossolo Háplico (Bagé) são classificados como muito alto pela tabela do Mehlich-1 e em alto pela tabela da Resina. No Planossolo Háplico (Pelotas), os teores iniciais de fósforo no solo são classificados como alto pela tabela do Mehlich-1 e em médio pela tabela da Resina. Os teores iniciais de fósforo no Gleissolo Háplico (Banhado) são classificados como médio para o tratamento com fosfato natural e alto para o tratamento com superfosfato triplo, pela tabela do Mehlich-1 e médio, pela tabela da Resina.

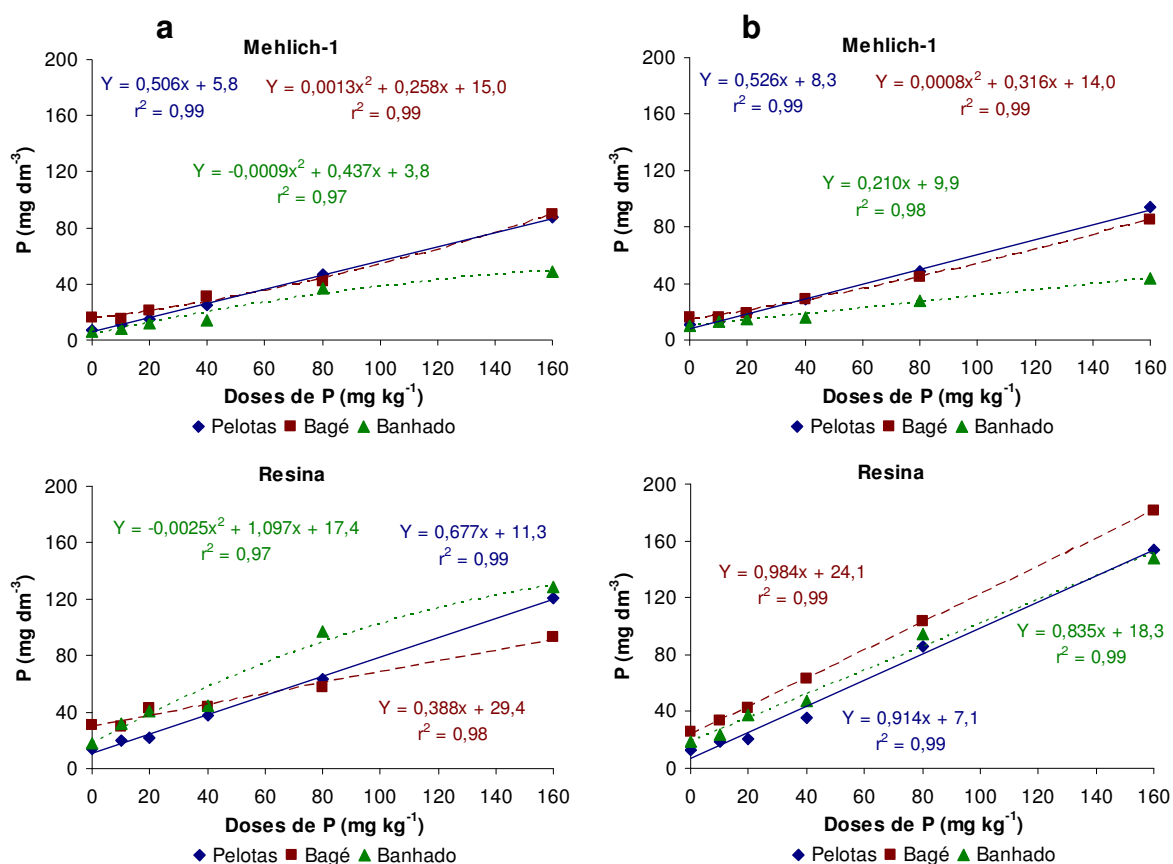


Figura 7. Teores de fósforo extraídos pelos métodos Mehlich-1 e Resina trocadora de íons em função de doses de fósforo aplicadas em três solos várzea adubados com duas fontes de fósforo (a – fosfato natural, b – superfosfato triplo).

4.6. Correlações lineares entre o fósforo acumulado nas plantas e o fósforo extraído pelos métodos Mehlich-1 e Resina Trocadora de Íons

Considerando a quantidade de fósforo acumulada pela parte aérea das plantas como uma medida da disponibilidade do elemento no solo, a eficácia dos métodos de análise em avaliar esta disponibilidade, pode ser medida pelo grau de correlação linear entre os teores de fósforo extraídos do solo pelos métodos e as quantidades do elemento acumuladas pelas plantas.

4.6.1. Correlações lineares entre o fósforo acumulado nas plantas e o fósforo extraído pelo método Mehlich-1

Na Figura 8 é apresentada a correlação entre os teores de fósforo obtidos pelo extrator Mehlich-1 e as quantidades de fósforo acumuladas pelas plantas de arroz para todo o conjunto dos três solos de várzea e das duas fontes de fósforo em estudo. O resultado obtido foi significativo ao nível de 1% de probabilidade com um coeficiente de correlação de $r=0,58$. A baixa eficiência do extrator Mehlich-1 em estimar os teores de fósforo no solo correlacionados com o teor de fósforo acumulado pela parte aérea das plantas de arroz já era esperada. Ranno (2004), trabalhando com solos de várzea do Rio Grande do Sul e utilizando o superfosfato triplo como fonte de fósforo encontrou um coeficiente de correlação de $r=0,45$. Grande, Curi e Quaggio (1986) trabalhando com solos de várzea do sul de Minas Gerais encontraram um coeficiente de correlação de $r=0,40$.

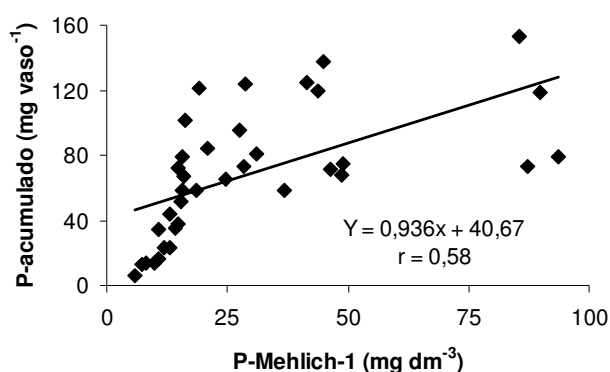


Figura 8. Correlação entre os teores de fósforo estimados pelo extrator Mehlich-1 e as quantidades de fósforo acumuladas na parte aérea das plantas de arroz.

Segundo Patrick Jr e Mahapatra (1968), vários métodos de extração química de fósforo utilizados para avaliar sua disponibilidade em solos e recomendar adubação fosfatada para culturas de sequeiro, geralmente apresentam baixa eficiência em solos submetidos ao alagamento. Isso estaria relacionado ao fato de os extratores ácidos, como o Mehlich-1, dissolverem predominantemente o fósforo ligado ao cálcio e alumínio, sendo a liberação do fósforo ligado ao ferro o processo que predominaria com o alagamento do solo. Segundo Ranno (2004), que analisou 16 solos de várzea do Rio Grande do Sul, quando os solos estavam secos o fósforo lábil correspondia a 31% do fósforo total nos solos, sendo que desse percentual, 82% do fósforo estava ligado ao ferro e 18% do fósforo estava ligado ao cálcio. Após 30 dias com o solo alagado, o fósforo lábil aumentou para 49% do fósforo total, sendo que desse percentual, 87% do fósforo estava ligado ao ferro e 13% do fósforo estava ligado ao cálcio. Grande, Curi e Quaggio (1986) afirmaram que o Mehlich-1 realiza a extração de fósforo em valores de pH muito baixo, ambiente desfavorável para estimar as frações de fósforo disponibilizadas pelo alagamento do solo.

Na Figura 9 as correlações entre os teores de fósforo obtidos pelo extrator Mehlich-1 e as quantidades de fósforo acumuladas pelas plantas de arroz foram separadas em função das duas fontes de fósforo utilizadas, já que as mesmas quando presentes no solo se comportam de maneira distinta em relação à solubilização do fósforo contido na sua composição, sendo que o fósforo contido no superfosfato triplo é totalmente solúvel em água e o fósforo contido no fosfato natural é insolúvel em água. Na análise dos coeficientes de correlação, que foram significativos a 1% de probabilidade, nota-se que houve um aumento no coeficiente de correlação ($r=0,66^{**}$), quando a fonte de fósforo utilizada foi o fosfato natural, e uma diminuição no coeficiente de correlação ($r=0,55^{**}$), quando a fonte de fósforo usada foi o superfosfato triplo, em relação ao conjunto das duas fontes de fósforo. Embora essas diferenças nos valores dos coeficientes de correlação entre o conjunto das duas fontes de fósforo e elas separadas tenham sido pequenas, o que chama a atenção é o aumento do coeficiente de correlação do fosfato natural e a diminuição do coeficiente de correlação do superfosfato triplo, já que o esperado seria o contrário, pois o extrator Mehlich-1 é um extrator ácido que extrai preferencialmente o fósforo ligado ao cálcio, sendo assim ele superestima os teores de fósforo disponíveis em solos adubados com fosfatos naturais (SILVA; RAIJ, 1999). Esse extrator por usar ácidos fortes diluídos dissolve a rocha fosfática que

forma o adubo. Além disso, essa fonte de fósforo é insolúvel em água e tem uma baixa solubilidade na solução do solo, fornecendo pequenas quantidades de fósforo para o meio onde é aplicada.

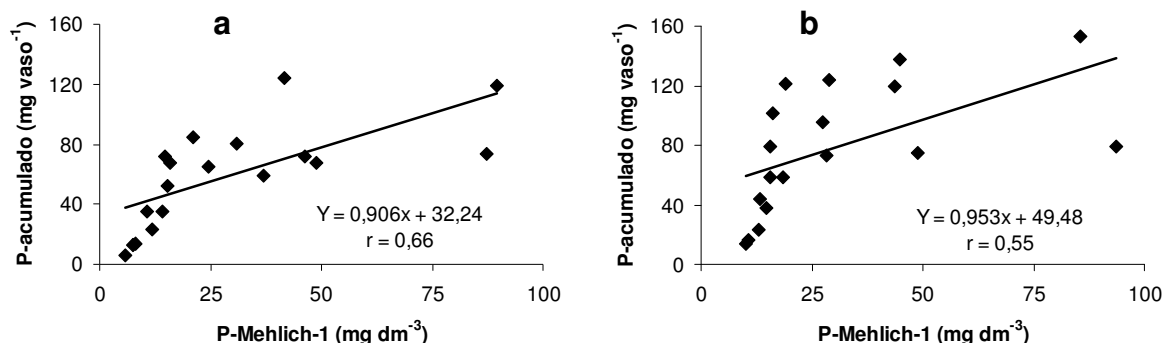


Figura 9. Correlações entre os teores de fósforo estimados pelo extrator Mehlich-1 e as quantidades de fósforo acumuladas pela parte aérea das plantas de arroz em função das fontes de fósforo (a – fosfato natural; b – superfosfato triplo).

Uma das alternativas para aprimorar a eficiência de um método em estimar a disponibilidade de fósforo é a separação dos solos, relacionando-os a uma característica ligada ao fósforo. Para tal, poderiam ser utilizados os valores de capacidade máxima de adsorção de fósforo, teores de argila, teores de ferro extraídos por oxalato, fósforo total, etc (GRANDE; CURI; QUAGGIO, 1986; RANNO, 2004).

Tendo em vista o baixo coeficiente de correlação entre o fósforo acumulado pelas plantas e os teores de fósforo estimados nos solos pelo extrator Mehlich-1, considerando-se um único conjunto de dados, estabeleceram-se novas correlações separadamente em cada um dos três solos utilizados. Com isso obteve-se um aumento dos coeficientes de correlação linear entre os teores de fósforo extraídos pelo método e os teores de fósforo acumulados pelas plantas de arroz em todos os três solos estudados (Figura 10).

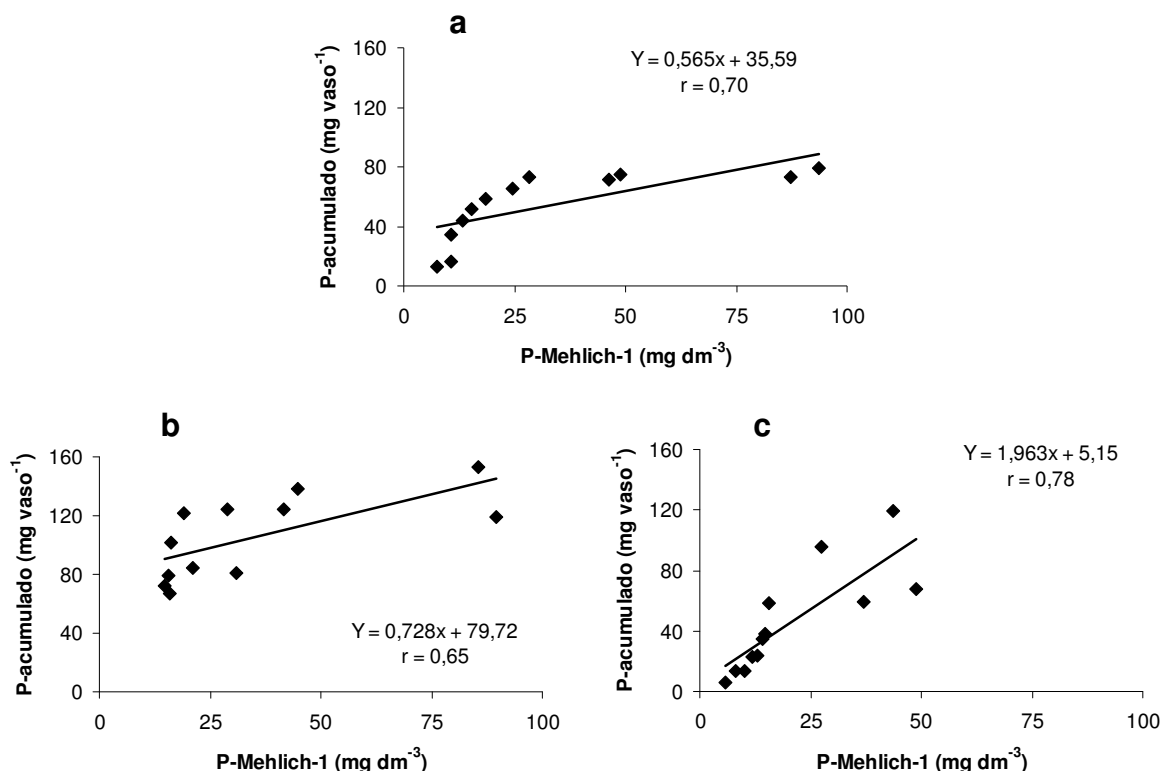


Figura 10. Correlações entre os teores de fósforo estimados pelo extrator Mehlich-1 e as quantidades de fósforo acumuladas na parte aérea das plantas de arroz em função dos solos (a – Planossolo Háplico, Pelotas; b – Planossolo Háplico, Bagé; c – Gleissolo Háplico, Banhado).

Esse aumento foi variável para os diferentes solos sendo de: 21% para o Planossolo Háplico (Pelotas), que obteve um coeficiente de correlação igual a $r=0,70^{**}$, 12% para o Planossolo Háplico (Bagé), que obteve um coeficiente de correlação igual a $r=0,65^{**}$ e 34% para o Gleissolo Háplico (Banhado), que obteve um coeficiente de correlação igual a $r=0,78^{**}$. Esse fato mostra a importância de uma interpretação diferenciada dos teores de fósforo extraídos por esse método. Cabe ressaltar que nessa nova avaliação não estão separadas as duas fontes de fósforo e que se as mesmas fossem avaliadas em separado, ou seja, isolando cada fonte com cada solo, poderia-se melhorar ainda mais os coeficientes de correlação linear entre os teores de fósforo acumulados pelas plantas de arroz e os teores de fósforo extraídos pelo método, porém as regressões lineares seriam construídas com um pequeno número de pontos.

4.6.2. Correlações lineares entre o fósforo acumulado nas plantas e o fósforo extraído pelo método da Resina Trocadora de Íons

Na Figura 11 é apresentada a correlação entre os teores de fósforo obtidos pela Resina e as quantidades de fósforo acumuladas pelas plantas de arroz para todo o conjunto dos três solos de várzea e das duas fontes de fósforo em estudo.

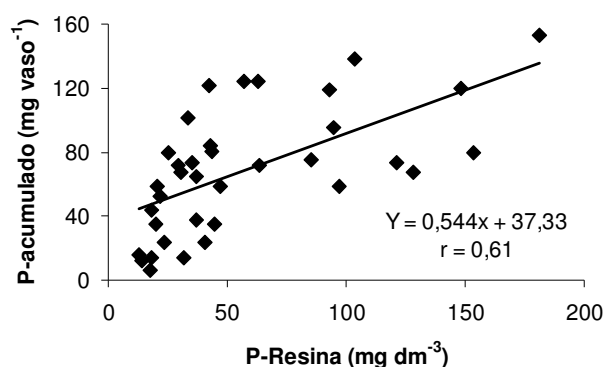


Figura 11. Correlação entre os teores de fósforo estimados pela Resina trocadora de íons e as quantidades de fósforo acumuladas na parte aérea das plantas de arroz.

O resultado obtido ($r=0,61^{**}$) foi significativo ao nível de 1% de probabilidade. Teoricamente, como a extração por este método ocorre em pH elevado, o que é favorável à extração do fósforo ligado ao ferro (que é a fração predominante nos solos de várzea) e com pH semelhante ao de equilíbrio dos solos de várzea após o alagamento (condição na qual ocorre a absorção de fósforo pelo arroz irrigado) (MAHAPATRA; PATRICK, 1969), este método deveria apresentar um coeficiente de correlação com o fósforo acumulado superior ao método Mehlich-1. Todavia, os coeficientes de correlação foram muito semelhantes, $r=0,58$ para o Mehlich-1 e $r=0,61$ para a Resina.

Silva (1996) e Ranno (2004) também encontraram coeficientes semelhantes entre os métodos. Silva (1996) usando a análise de regressão polinomial com o modelo quadrático como método de avaliar a relação entre o fósforo acumulado na parte aérea das plantas de arroz e o fósforo estimado pelos extratores encontrou um coeficiente de determinação de $r^2=0,74$ para o extrator Mehlich-1, $r^2=0,63$ para o método da Resina em esferas e $r^2=0,68$ para o método da Resina em lâminas. Ranno (2004) encontrou um coeficiente de correlação linear simples de $r=0,70$ para

o método da Resina em lâminas e de $r=0,45$ para o extrator Mehlich-1, porém quando esse autor analisou novamente o conjunto de solos deixando um de fora, pois o mesmo apresentava valores muito discrepantes dos demais, encontrou um coeficiente de correlação de $r=0,74$ para o extrator Mehlich-1 e de $r=0,73$ para o método da Resina.

Na Figura 12, as correlações entre os teores de fósforo obtidos pela Resina e as quantidades de fósforo acumuladas pelas plantas de arroz foram separadas em função das duas fontes de fósforo utilizadas, assim como foi feito para o extrator Mehlich-1. Ao analisarem-se os coeficientes dessas correlações nota-se que houve uma diminuição no coeficiente de correlação ($r=0,47^{**}$) quando a fonte de fósforo utilizada foi o fosfato natural e um aumento no coeficiente de correlação ($r=0,67^{**}$) quando a fonte de fósforo usada foi o superfosfato triplo em relação ao conjunto das duas fontes de fósforo. Justamente o contrário do que ocorreu com o extrator Mehlich-1. Esses resultados discordam dos resultados de Silva e Raij (1999), que afirmam que uma das vantagens do método da Resina trocadora de íons é que ele não superestima, como os extratores ácidos, a disponibilidade de fósforo em solos adubados com fosfatos naturais, pois não usa nenhum reagente químico que poderia dissolver o fósforo não lábil, e realiza a extração do fósforo em pH próximo a neutralidade. Entretanto, Kroth (1998) encontrou baixas correlações entre o método da resina trocadora de íons e a absorção de fósforo pelas plantas em solos adubados com fosfato natural. Esse mesmo autor mostrou que a resina trocadora de íons também superestima, assim como o Mehlich-1, o fósforo disponível em solos onde foram aplicados fosfatos naturais.

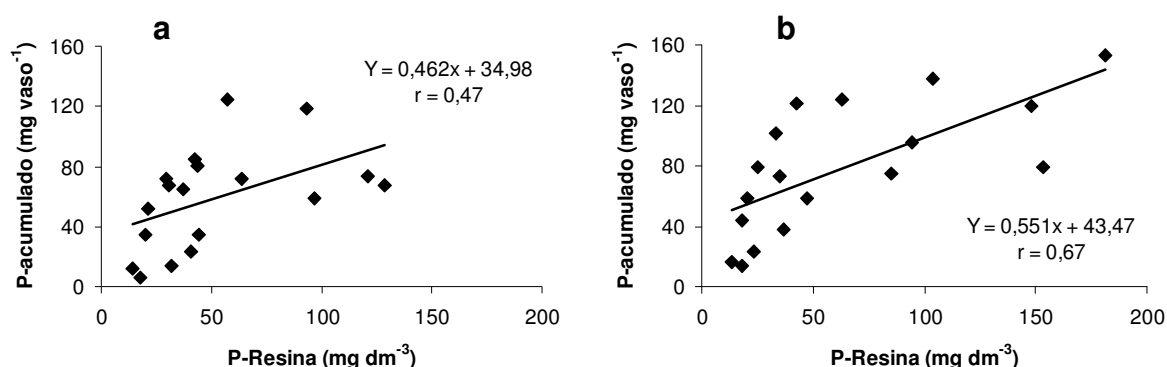


Figura 12. Correlações entre os teores de fósforo estimados pelo método da Resina trocadora de íons e as quantidades de fósforo acumuladas na parte aérea das plantas de arroz em função das fontes de fósforo (a – fosfato natural; b – superfosfato triplo).

Na Figura 13 são apresentadas as correlações entre os teores de fósforo estimados pela Resina e os teores de fósforo acumulados na parte aérea pelas plantas de arroz, separando-se os dados de cada solo.

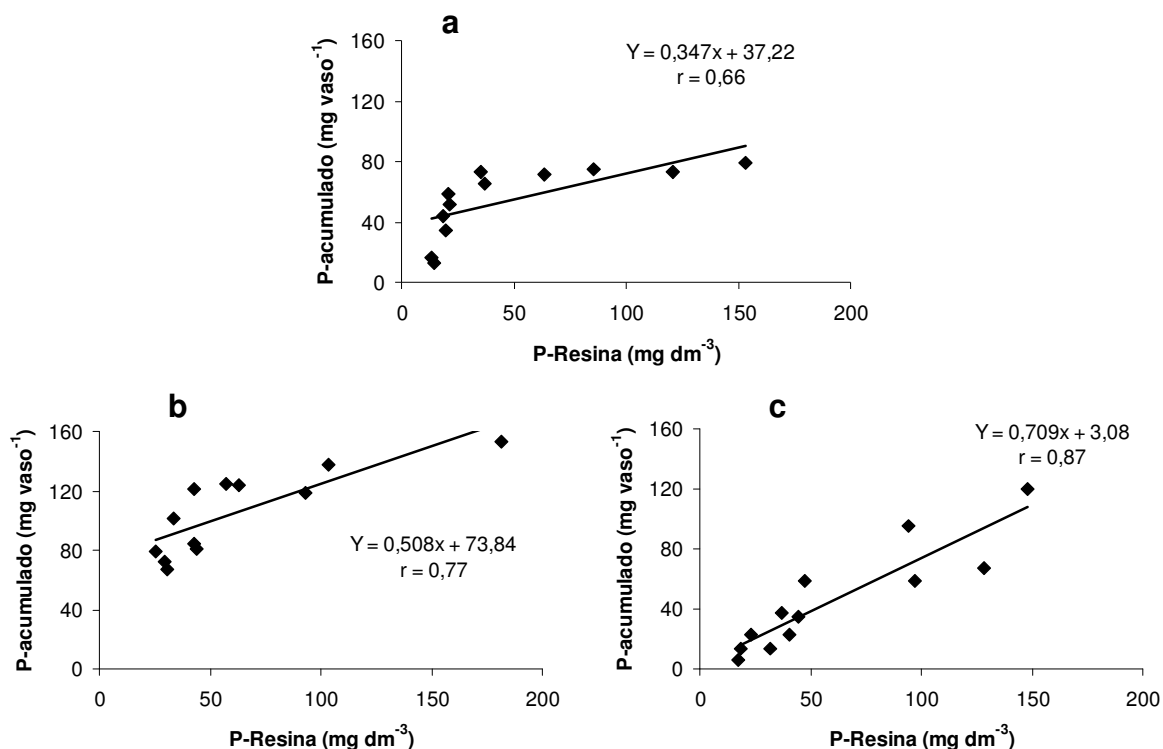


Figura 13. Correlações entre os teores de fósforo estimados pelo método da Resina trocadora de íons e as quantidades de fósforo acumuladas pela parte aérea das plantas de arroz em função dos solos (a – Planossolo Háplico, Pelotas; b – Planossolo Háplico, Bagé; c – Gleissolo Háplico, Banhado).

Houve um aumento dos coeficientes de correlação linear entre os teores de fósforo extraídos pelo método e os teores de fósforo acumulados pelas plantas de arroz em todos os três solos estudados. Esse aumento foi variável para os diferentes solos sendo de: 8% para o Planossolo Háplico (Pelotas), que obteve um coeficiente de correlação de $r=0,66^{**}$, 26% para o Planossolo Háplico (Bagé), que obteve um coeficiente de correlação de $r=0,77^{**}$ e 43% para o Gleissolo Háplico (Banhado), que obteve um coeficiente de correlação de $r=0,87^{**}$. Esse fato mostra a importância de uma interpretação diferenciada dos teores de fósforo extraídos por esse método, contrariando o que afirmam Novais e Smith (1999), os quais apontam que não é necessário incluir uma medida do poder tampão de fósforo – como argila, capacidade máxima de adsorção de fósforo, entre outras – na interpretação dos teores extraídos por esse método, como se faz para extratores ácidos.

4.6.3. Correlações lineares entre o extrator Mehlich-1 e o método da Resina Trocadora de Íons

Na Figura 14, é apresentada a correlação entre os teores de fósforo obtidos pelo método da Resina e os teores de fósforo obtidos pelo extrator Mehlich-1 para todo o conjunto dos três solos de várzea e das duas fontes de fósforo em estudo. O resultado obtido ($r=0,85^{**}$) foi significativo ao nível de 1% de probabilidade.

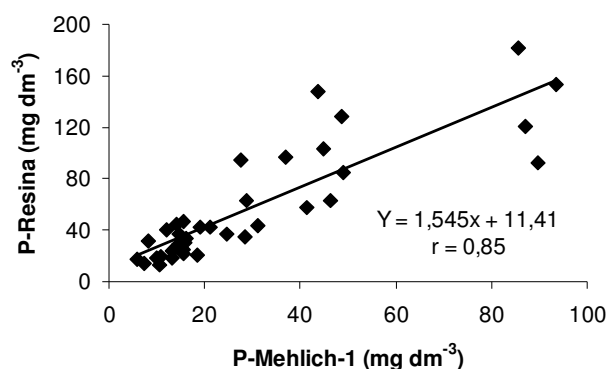


Figura 14. Correlação entre os teores de fósforo estimados pela Resina trocadora de íons e os teores de fósforo obtidos pelo extrator Mehlich-1 para todo o conjunto dos três solos de várzea e das duas fontes de fósforo em estudo.

Na Figura 15 as correlações entre os teores de fósforo obtidos pela Resina e os teores de fósforo obtidos pelo extrator Mehlich-1 foram separadas em função das duas fontes de fósforo utilizadas. Houve uma diminuição no coeficiente de correlação do fosfato natural ($r=0,82^{**}$) e um aumento no coeficiente do superfosfato triplo ($r=0,91^{**}$), isso evidencia as diferenças no comportamento desses métodos quando é usada no solo uma fonte de fósforo constituída de fosfatos naturais.

A separação dos resultados em função da capacidade máxima de adsorção de fósforo dos solos estudados também melhorou os resultados dos coeficientes das correlações lineares entre os métodos (Figura 16). Isso mostra a importância da separação dos resultados das análises de solo. Essa separação deve ocorrer através da adoção de critérios referentes ao comportamento do fósforo no solo.

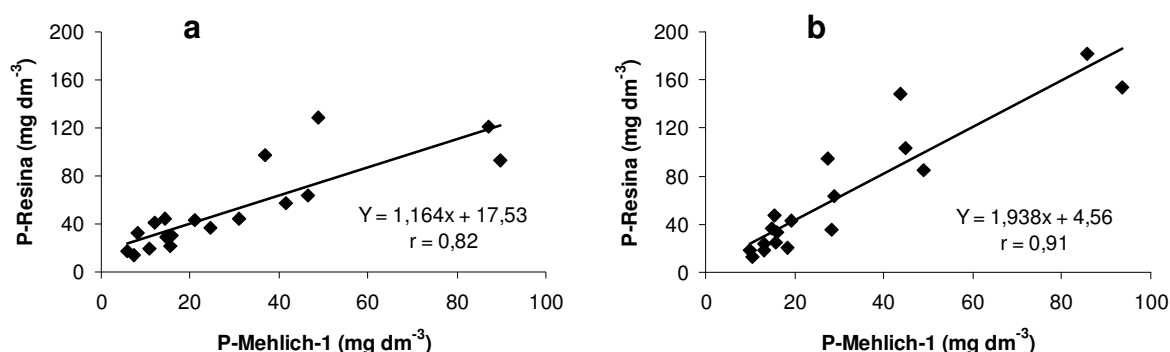


Figura 15. Correlações entre os teores de fósforo estimados pelo método da Resina trocadora de íons e os teores de fósforo obtidos pelo extrator Mehlich-1 em função das diferentes fontes de fósforo (a – fosfato natural; b – superfosfato triplo).

Trabalhos de Silva, 1996 e Ranno, 2004, assim como este estudo, não encontraram diferenças significativas entre os métodos da resina trocadora de íons e o extrator Mehlich-1, concluindo que esses métodos se equivalem na estimativa do teor de fósforo no solo para a cultura do arroz irrigado em solos de várzea do Rio Grande do Sul. Com isso pode-se inferir que o melhor meio para avaliar o teor de fósforo nos solos alagados não estaria na troca do método atualmente utilizado no Rio Grande do Sul (Mehlich-1) e sim na avaliação dos seus resultados relacionados com alguma característica de comportamento do fósforo nos solos.

Como este estudo avaliou apenas três solos de várzea do Rio Grande do Sul, é impossível afirmar que a capacidade máxima de adsorção de fósforo seja o melhor critério a ser adotado na separação dos solos em grupos mais homogêneos, com o objetivo de melhorar a recomendação de adubação para o arroz irrigado. Um estudo avaliando um número maior de solos de várzea é necessário para se confirmar essa hipótese.

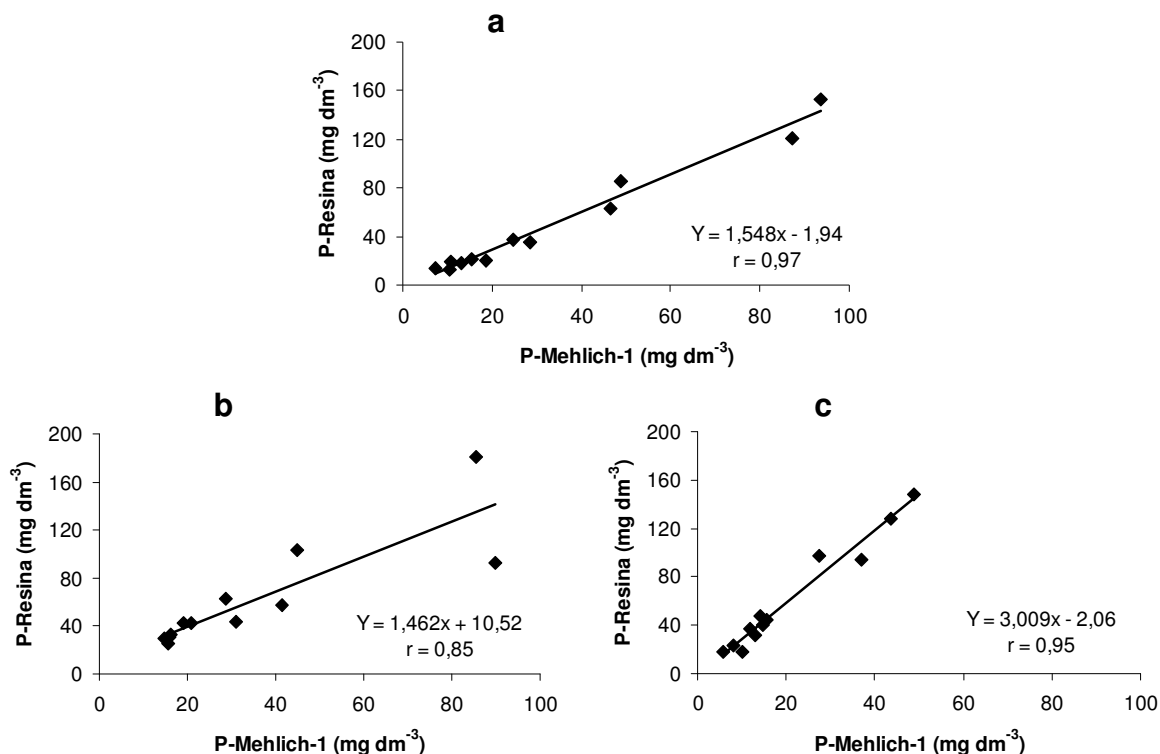


Figura 16. Correlações entre os teores de fósforo estimados pelo método da Resina trocadora de íons e os teores de fósforo obtidos pelo extrator Mehlich-1 em função dos solos (a – Planossolo Háplico, Pelotas; b – Planossolo Háplico, Bagé; c – Gleissolo Háplico, Banhado).

4.7. Considerações finais

Os teores de fósforo presentes nos solos não adubados (testemunhas) deste experimento apresentaram-se acima do nível crítico (6 mg dm^{-3}) para a cultura do arroz irrigado (CQFS-RS/SC, 2004), o que limitou a resposta das plantas à adubação fosfatada. No Planossolo Háplico (Bagé) os teores de fósforo apresentaram-se na faixa muito alto, não ocorrendo nenhum efeito da adubação sobre o peso de matéria seca das plantas. Nos outros dois, solos a resposta ao fósforo foi relativamente alta no Gleissolo Háplico (Banhado) e baixa no Planossolo Háplico (Pelotas). Os altos teores de fósforo originalmente presentes nos solos dificultaram a interpretação dos resultados e o estabelecimento de conclusões mais próximas ao objetivo inicial do trabalho. Todavia, foram obtidos alguns avanços importantes no conhecimento da dinâmica do fósforo em solos alagados.

Considerando-se que fossem plantadas culturas de sequeiro nesses solos, o Planossolo Háplico (Pelotas) que apresenta 19% de argila e teor de fósforo na testemunha de $10,6 \text{ mg dm}^{-3}$ para o tratamento em que a fonte de fósforo utilizada

foi o superfosfato triplo, seria enquadrado na classe 4 de teor de argila e classificado como de baixa disponibilidade de fósforo. O Gleissolo Háplico (Banhado) seria enquadrado na classe 3 de argila (33%) e classificado como de média disponibilidade de fósforo ($10,0 \text{ mg dm}^{-3}$). Sendo assim, o Gleissolo Háplico (Banhado) receberia uma quantidade menor de adubo do que o Planossolo Háplico (Pelotas). No entanto o presente trabalho demonstrou que o Gleissolo Háplico (Banhado) respondeu até a dose de 80 mg dm^{-3} de P enquanto que o Planossolo Háplico (Pelotas) apresentou resposta significativa até a dose de 10 mg dm^{-3} de P, ou seja, para o arroz irrigado a adubação maior deveria ocorrer no Gleissolo Háplico (Banhado).

Em relação ao arroz irrigado, a interpretação dos teores de fósforo utilizando critérios auxiliares, como teor de argila e capacidade máxima de adsorção de fósforo, deve seguir um raciocínio diferente do utilizado para as culturas de sequeiro. O aumento no teor de argila no solo diminui a capacidade de predição do extrator Mehlich-1, para solos no sistema sequeiro, e o enquadramento em classes de textura é utilizado para corrigir esse problema. Em solos alagados, essa correção não é utilizada, devido ao aumento nos teores de fósforo com o alagamento.

No entanto, solos com alta capacidade máxima de adsorção de fósforo, como o Gleissolo Háplico (Banhado) mantém baixos teores de fósforo na solução do solo, pois o fósforo liberado pela redução do solo é readsorvido na fase sólida limitando o acesso desse elemento pelas raízes. Então, as recomendações de adubação com fósforo na cultura do arroz irrigado deveriam levar em consideração as diferenças na capacidade máxima de adsorção de fósforo dos solos de várzea, pois solos com alta capacidade máxima de adsorção de fósforo necessitam de uma maior quantidade de adubo fosfatado do que aqueles com baixa capacidade máxima de adsorção de fósforo, mesmo com o aumento dos teores de fósforo no solos, devido aos fenômenos que ocorrem durante o alagamento.

Outro fato importante na adubação fosfatada do arroz irrigado é a utilização de fosfatos naturais reativos em substituição as fontes solúveis de fósforo. Os resultados deste experimento demonstraram que a dissolução dos fosfatos naturais foi pequena nos solos estudados e por isso, as concentrações de fósforo na solução desses solos foram baixas. Esses dados concordam com os resultados de Gonçalves (2003), que também demonstrou a baixa dissolução dos fosfatos naturais em solos alagados.

O Planossolo Háplico (Bagé) não apresentou resposta à adubação fosfatada e em consequência disso, também não demonstrou diferença significativa entre as fontes de fósforo no peso de matéria seca da parte aérea do arroz. Já o Planossolo Háplico (Pelotas) apresentou baixa resposta à adubação fosfatada e também não demonstrou diferença significativa entre as fontes. O Gleissolo Háplico (Banhado) foi o único solo que demonstrou diferença significativa entre o fosfato natural e o superfosfato triplo. Esses resultados reforçam a idéia de que é necessário revisar as recomendações atuais de utilização dos fosfatos naturais reativos para o arroz irrigado, as quais permitem o uso dessas fontes de fósforo em solos que apresentem teores maiores que 3 mg dm^{-3} de P. Essa recomendação foi proposta a partir de resultados de experimentos realizados apenas na classe dos Planossolo que apresentam baixa resposta à adubação fosfatada e foi generalizada para todas as classes de solos de várzea, o que pode levar a recomendações errôneas de adubação nas outras classes. Haja vista, que neste experimento mesmo o Gleissolo Háplico (Banhado) apresentando um teor inicial de $10,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de P no solo, respondeu diferentemente às fontes de fósforo, tendo produzido uma quantidade de matéria seca superior com o superfosfato triplo. Contudo, esses resultados foram obtidos num experimento feito em casa de vegetação, baseado em produção de matéria seca da parte aérea das plantas, sendo necessário um estudo a campo, com dados de rendimento de grãos, para confirmar esses resultados.

5. CONCLUSÕES

- 1 – O Planossolo Háplico (Pelotas) respondeu com aumento de peso de matéria seca da parte aérea do arroz até a dose de 10 mg kg^{-1} de fósforo aplicado no solo, enquanto que no Gleissolo Háplico (Banhado) a resposta ao fósforo aplicado foi até a dose de 80 mg kg^{-1} . Já no Planossolo Háplico (Bagé) não houve resposta ao fósforo.
- 2 – O solo com maior capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP), Gleissolo Háplico (Banhado), necessitou maior quantidade de fósforo aplicado na forma de superfosfato triplo e fosfato natural para atingir a máxima produção de matéria seca da parte aérea.
- 3 – O superfosfato triplo apresentou maior solubilização do que o fosfato natural Daoui durante o alagamento dos solos de várzea utilizados neste experimento.
- 4 – O extrator Mehlich-1 e o método da Resina Trocadora de Íons em esfera equivaleram-se na capacidade de predição da disponibilidade de fósforo para o arroz irrigado nos solos de várzea utilizados neste experimento.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCARDE, J. A.; GUIDOLIN, J. A.; LOPES, A. S. **Os adubos e a eficiência das adubações**. São Paulo: ANDA, 1989. 35p. (ANDA, Boletim Técnico).

AMER, F.; BOULDIN, D. R.; BLACK, C. A.; DUKE, F. R. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and P^{32} equilibration. **Plant and Soil**, The Hague, v 6, p. 391-408, 1955.

AMER, F.; SALEH, M. E.; MOSTAFA, H. E. Phosphate behavior in submerged calcareous soils. **Soil Science**. Baltimore, v.4, p.306-312, 1991.

ANGHINONI, I.; MEURER, E.J. Interpretação dos resultados das análises de solo e de tecido vegetal. In: **BISSANI, C A, et al.** Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas. Porto Alegre: Gênese, 2004. p.67-73.

AZAMBUJA, I. H. V.; VERNETTI Jr, F .J.; MAGALHÃES Jr, A. M. **Aspectos socioeconômicos da produção do arroz**. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr, .A. M. (eds.). Arroz irrigado no Sul do Brasil. 1º ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004. p. 23-44.

BACHA, R. E.; OLIVEIRA, M. A.; SHERER, C. H.; WOLKSWEISS. Eficiência de fosfatos naturais em arroz irrigado. In: Reunião da Cultura do Arroz, 7, 1977, Porto Alegre. **Anais...** Pelotas, RS: Instituto Rio Grandense do Arroz – UEPAE de Pelotas, 1977. p.1-5.

BAHIA FILHO, A. F. C.; BRAGA, J. M.; RIBEIRO, A. C.; NOVAIS, R. F. Sensibilidade de extratores químicos à capacidade tampão de fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v. 7, p. 243-249, 1983.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. 2. ed. New York: j. Wiley, 1995. 414p.

BARROW, N. J. Evaluation and utilization of residual phosphorus in soil. In: KHASAWNEH, E. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. The role of phosphorus in agriculture. Madison: **American Society of Agronomy**, p.333-355. 1980.

BRAGA, J. M. **Avaliação da fertilidade do solo**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1980. 81p. (Boletim Técnico 42).

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife, 1973. 431p. (Boletim Técnico 30).

CAJUSTE, L. J.; KUSSOW, W. R. Use and limitations of the North Carolina method to predict available phosphorus in some oxisols. **Tropical Agriculture**, Trinidad, v 51, p. 246-252, 1974.

CHANG, S. C. **Evaluation of fertility of rice soils**. In: International Rice Research Institute. Soil & Rice. Los Banos: International Research Institute, p.521-541, 1978.

CHANG, S. C.; JACKSON, M. L. Fractionation of soil phosphorus. **Soil Science**, Baltimore, v 84, p. 133-144, 1957.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10ª ed. Porto Alegre: SBRS/NRS, 2004. 400p.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível na Internet via www. URL: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 1º de julho de 2007.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. (editores técnicos, Humberto Gonçalves dos Santos et al.) 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 306p. 2006.

FIXEN, P. E.; GROVE, J. H. Testing soils for phosphorus. In: WESTERMAN, R. L. (Ed) **Soil Testing and Plant Analysis**, 3 ed. Madison. p. 141-180, 1990.

GATIBONI, L. C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. Santa Maria: UFSM, 2003. 231p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria. 2003.

GOMES, A. S.; SCIVITTARO, W. B.; FERREIRA, L. H.; MARTINS; CAPILHEIRA, A. Uso de fosfatos naturais reativos como fonte supridora de fósforo ao arroz irrigado. In: Congresso da Cadeia Produtiva do Arroz, 1; Reunião Nacional de Pesquisa de Arroz, 7, 2002, Florianópolis. **Resumos expandidos...** Florianópolis, SC: Embrapa Arroz e Feijão, 2002. CD-ROM.

GONÇALVES, G. K. **Solubilização de fosfatos naturais em solos alagados**. Pelotas, 2003. 49p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Solos), Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2003.

GOTOH, S. Reduction processes in waterlogged soils with special reference to transformation of nitrate, manganese and iron. **Bolletín of Kyushu Agriculture Experimental Station**, v.16, p.669-714, 1973.

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, p.45-50,1986.

HAMMOND, L. L.; CHIEN, S. H.; EASTERWOOD, G. W. Agronomic effectiveness of Bayovar phosphate rock in soils with induced phosphorus retention. **Soil Sci. Am. J.** Madison, v.56, p.1601-1606, 1986.

HOLFORD, I. C. R. Greenhouse evaluation of four phosphorus soil tests in relation to phosphate buffering and labile phosphate in soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 44, p. 555-559, 1980.

HUE, N. V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soil with different mineralogies. **Soil Science**, Baltimore, v.152, p.463-471, 1991.

KAMINSKI, J.; PERUZZO, G. **Eficácia de fosfatos naturais reativos em sistemas de cultivo**. Santa Maria: NRS-SBCS, 1997. 31p. (Boletim Técnico, 3).

KHALID, R. A.; PATRICK Jr, W. H.; DELAUNE, R. D. Phosphorus sorption characteristics of flooded soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** Madison. V.41, p.305-309, 1977.

KROTH, P. L. **Disponibilidade de fósforo no solo para plantas e fatores que afetam a extração por resina de troca em membrana**. Porto Alegre: UFRGS, 1998. 168 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LARSEN, S. Soil phosphorus. **Advances in Agronomy**, New York, v.19, p.151-210, 1967.

LOPES, M. S.; BACHA, R. E.; CABRAL, J. T. Efeito da substituição gradativa de fosfato solúvel por fosfato natural sobre o rendimento de grãos de arroz irrigado. In: Reunião da Cultura do Arroz, 12, 1983, Porto Alegre. **Anais...** Pelotas, RS: Instituto Rio Grandense do Arroz – UPEAE, 1983. p.133-135.

MACHADO, A. A.; CONCEIÇÃO, A. R. **WinStat** – sistema de análise estatística para Windows. Versão: beta 3. Pelotas: UFPel/NIA. 2001. 1 CD-ROM.

MAHAPATRA, I. C.; PATRICK Jr, W. H. Inorganic phosphate transformation in waterlogged soils. **Soil Science**. v.107, p.281-288, 1969.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: Adubos e Adubações**. 3.ed. São Paulo: Ceres, 1981. 608p.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄ by North Carolina Soil Testing Laboratories**. Raleigh: University of North Carolina, 1953. (mimeografado).

MENON, R. G.; CHIEN, S.H.; HAMMOND, L. L. Development and evaluation of the Pi soil test for plant-available phosphorus. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.** V.21, p.1131-1150, 1990.

MIOLA, G. R. **Extração de P, K, Ca, e Mg do solo por diferentes métodos e avaliação da disponibilidade de P às plantas**. 1995. 127f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1995.

MOORMANN, F. R.; VAN BREEMEN, N. **Rice: soil, water, land**. Los Banos, Int. Rice Research Institute, p.140-142, 1978.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single method for determination of phosphates in natural waters. **Anal. Chem. Acta**, Amsterdam, v.27, p.31-36, 1962.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Aspectos físico-químicos envolvidos na fixação do fósforo no solo. In: V Encontro Nacional de Rocha Fosfática. São Paulo, 1990. **Anais...** São Paulo: Instituto Brasileiro do Fosfato, 1990. p.133-164.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Ed. Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**. San Diego. v. 30, p.01-46, 1978.

PARFITT, R. L.; ATKINSON, R. J.; SMART, R. St. C. The mechanism of phosphate fixation by iron oxides. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, v.39, p.837-841, 1978.

PATELLA, J. F. Efeito residual do fósforo em solos alagados de arroz irrigado. **Agrisul**, Pelotas, p.31-35, Junho, 1964.

PATELLA, J. F. Arroz: adubação fosfatada em solos alagados. **Agrisul**, Pelotas, p.14-15 e 20-32, Setembro, 1965.

PATRICK Jr., W. H.; MAHAPATRA, I. C. Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. **Advances in Agronomy**, v. 20, p.323-359, 1968.

PATRICK, W. H.; REDDY, C. N. Chemical changes in rice soils. In: International Rice Research Institute. **Soil & Rice**. Los Banos: International Research Institute, 1978. p.361-379.

PINTO, L. F. S.; NETO, J. A. L.; PAULETTO E. A. **Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado**. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr, .A. M. (eds.). Arroz irrigado no Sul do Brasil. 1ª ed. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004. p. 75-96.

PONNANPERUMA, F. N. Dynamic aspects of flooded soils and nutrition of rice plants. In: International Rice Research Institute. **The mineral nutrition of rice plant**. Baltimore: John Hopkins Press, 1965. p.195-238.

PONNAMPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.24, p.29-96, 1972.

PONNANPERUMA, F. N. **Physicochemical properties of submerged soils in relation to fertility**. Manila, Filipinas: International Rice Research Institute, 1977. 32p. (IRRI Research Paper Series).

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1991. 343p.

RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A. Determinação de P, Ca, Mg e K extraídos com resina trocadora de íons. In: RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO J. A. eds. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. p.189-199.

RANNO, S. K. **Estimativa da disponibilidade de fósforo para a cultura do arroz irrigado cultivado em solos do RS**. 2004. 137p. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

REIN, T. A. **Estimativa do fluxo difusivo de fósforo no solos e avaliação de sua disponibilidade às plantas**. 1991. 137 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, L. C. Dessorção de fósforo avaliada por extrações sucessivas em amostras de solo provenientes dos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v.33, n. 6, p. 1053-1059, 2003.

ROBINSON, J. S.; SYERS, J. K. A critical evaluation of the factors influencing the dissolution of Gafsa phosphate rock. **Journal of Soil Science**, Oxford, p. 597-605, 1990.

SAH, R. N.; MIKKELSEN, D. S. Transformations of inorganic phosphorus during the flooding and draining cycles of soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.** Madison, v.50. p.62-67, 1986.

SAH, R. N.; MIKKELSEN, D. S.; HAJES, A. A. Phosphorus behavior in flooded-drained soils III. **Soil Sci. Soc. Am. J.** Madison, v.53. p.1729-1732, 1989.

SALE, P. G.; MOKYWUNYE, A. U. Use of phosphate rocks in the tropics. **Fertilizer Research**. Dordrecht, v.35, p.33-45, 1993.

SAMPLE, E. C.; SOPER, R. J.; RACZ, G. J.; Reactions of phosphate fertilizers in soils. In: KHASAWNEH, E. E.; SAMPLE, E. C.; KAMPRATH, E. J. The role of phosphorus in agriculture. Madison: **American Society of Agronomy**, p.263-310. 1980.

SANYAL, S. K.; DATTA, S. K. Chemistry of phosphorus transformations in soil. In: STEWART, B. A. (ed) **Advances in soil science**, New York, v 16, p. 01-120, 1991.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. E. Iron oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. **Minerals in soil environments**. Madison: Soil Science Society of America, p.379-438, 1989.

SHAHANDEH, H.; HOSSNER, L. R.; TURNER, F. T. A comparison of extraction methods for evaluating Fe and P in flooded rice soils. **Plant Soil**. v.165. p.219-225, 1994b.

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

SHARPLEY, A. N.; TIESSEN, H.; COLE, C. V. Soil phosphorus forms extracted by soil tests as a function of pedogenesis. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 51, p. 362-365, 1987.

SHERER, C. H.; BACHA, R. E. Eficiência de fosfatos naturais na cultura do arroz irrigado. In: Reunião geral da cultura do arroz irrigado, 2, 1972, cachoeirinha. **Anais...** Porto Alegre, RS: Instituto Rio Grandense do Arroz – IPEAS, 1972. p.71-72

SHERER, C. H.; BACHA, R. E.; OLIVEIRA, M. A. Eficiência dos fosfatos em arroz irrigado, em solo Vacacaí. In: Reunião geral da cultura do arroz irrigado, 4, 1974, Pelotas. **Anais...** Porto Alegre RS: Instituto Rio Grandense do Arroz – IPEAS, 1974. p. 84-86.

SILVA, F. C.; RAIJ, B. V. Avaliação da disponibilidade de fósforo por diversos extratores em amostras de solos cultivados com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p.83-90, 1996.

SILVA, F. C.; RAIJ, B. V. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v 34, p. 267-288, 1999.

SILVA, R. J. da. **Metodologia de avaliação da disponibilidade de fósforo em solos alagados**. Pelotas, 1996. 65f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, 1996.

SKOGLEY, O.; DOBERMANN, A. Synthetic Ion-exchange Resins: Soil and environmental studies. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 25, p. 13-24, 1996.

SPARKS, D. **Environmental soil chemistry**. San Diego: Academic Press, 1995. 267p.

SPOSITO, G. **Chemical equilibrium and kinetics in soil**. New York: Oxford University Press, 1994. 268p.

SOSBAI - Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. **Arroz Irrigado: recomendações técnicas da pesquisa para o sul do Brasil**. IV Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, Santa Maria. 159p. 2005.

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, n.26, p.343-348, 2002.

SOUSA, R. O.; CAMARGO, F. A. O.; VAHL, L. C. Solos alagados (reações de redox). In: **MEURER, E.J.** (editor). Fundamentos de química do solo. 2.ed. Porto Alegre: Gênese, 2004. p.207-237.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre. UFRGS/FA/DS. 1995. 174p.

TISDALE, S. L.; WERNER, N. L.; BEATON, J. D.; HAVLIN, J. L. **Soil fertility and fertilizer**. New York: 1993. 634p.

VAHL, L. C. Fertilidade de solos de várzea. In: Gomes, A. da S; PAULETTO, E. A. **Manejo do solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p.119-161.

VAN DER ZEE, S. E. A. T. M.; FOKKINK, L. G. J.; RIEMSDIJK, W. H. V. A new technique for assessment of reversibly adsorbed phosphate. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 51, p. 599-604, 1987.

VIOLANTE, A.; COLOMBO, C.; BUONDONND, D. Competitive adsorption of phosphate and oxalate by aluminum oxides. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, v.55, p.65-70, 1991.

WILLET, I. R. Causes and prediction of changes in extractable phosphorus during flooding. **Aust. J. Soil Res.**, v.27, p.45-54, 1989.

YOST, R. S.; NADERMAN, G. C.; KAMPRATH, E. J.; LOBATO, E. Availability of rock phosphate as measured by an acid tolerant pasture grass and extractable phosphorus. **Agronomy Journal**, Madison, v. 74, p. 462-468, 1982.

7. APÊNDICES

Apêndice 1. Teor de fósforo remanescente na solução do solo (Psol) e quantidade de fósforo absorvido à fase sólida do solo (Pads), utilizados para determinação da capacidade máxima de adsorção de fósforo dos 3 solos de várzea usados no experimento.

Pelotas		Bagé		Banhado	
Psol	Pads	Psol	Pads	Psol	Pads
mg L ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg L ⁻¹	mg kg ⁻¹	mg L ⁻¹	mg kg ⁻¹
0,065	0,935	0,059	0,941	0,060	0,940
0,074	1,926	0,122	1,878	0,065	1,935
0,089	2,911	0,201	2,799	0,040	2,960
0,154	3,846	0,347	3,653	0,055	3,945
0,263	4,737	0,480	4,520	0,060	4,940
1,470	8,530	1,938	8,062	0,417	9,583
6,714	13,286	7,398	12,602	1,748	18,252
13,906	16,094	13,975	16,025	4,648	25,352
21,157	18,843	21,921	18,079	9,039	30,961
31,983	18,017	29,555	20,445	14,055	35,945
38,936	21,064	36,405	23,595	19,965	40,035
48,273	21,727	47,072	22,928	26,620	43,380
63,569	16,431	54,020	25,980	29,599	50,401
75,091	14,909	63,415	26,585	41,519	48,481
79,064	20,936	75,746	24,254	47,875	52,125
114,424	10,576	97,667	27,333	64,364	60,636
134,290	15,710	120,175	29,825	83,434	66,566

Apêndice 2. Valores da produção de matéria seca da parte aérea das plantas de arroz em função dos três solos de várzea com diferente capacidade máxima de adsorção de fósforo e das diferentes doses de fósforo aplicadas.

Dose de P (mg kg ⁻¹)	Solos		
	Planossolo Háplico (Pelotas)	Planossolo Háplico (Bagé)	Gleissolo Háplico (Banhado)
	----- g vaso ⁻¹ -----		
0	9,8 b	31,0 a	8,0 e
10	16,6 a	31,3 a	14,1 d
20	17,6 a	32,1 a	19,0 c
40	17,9 a	30,9 a	22,8 b
80	16,7 a	33,2 a	26,9 a
160	16,7 a	32,3 a	27,9 a
DMS		3,4	
CV (%)		9,0	

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (5%)

Apêndice 3. Concentração de fósforo na solução do solo dos três solos de várzea usados no experimento em função das duas fontes (FN e SFT) e das doses (0, 40 e 160 mg kg⁻¹) de fósforo, e de quatro períodos de coleta (1, 8, 22, 36 dias de alagamento).

Solo	Dose de P (mg kg ⁻¹)	Coleta	Concentração de fósforo					
			FN			SFT		
			Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 1	Rep 2	Rep 3
			----- mg L ⁻¹ -----					
Pelotas	0	1 ^a	0,011	0,011	0,012	0,024	0,028	0,011
		2 ^a	0,002	0,010	0,007	0,035	0,002	0,003
		3 ^a	0,037	0,017	0,045	0,037	0,024	0,040
		4 ^a	0,038	0,010	0,060	0,033	0,024	0,026
	40	1 ^a	0,108	0,104	0,081	0,158	0,106	0,131
		2 ^a	0,108	0,123	0,104	0,497	0,245	0,160
		3 ^a	0,296	0,261	0,237	0,575	0,476	0,617
		4 ^a	0,053	0,050	0,041	0,108	0,098	0,107
	160	1 ^a	0,643	0,549	0,375	1,918	1,238	1,307
		2 ^a	1,381	1,407	0,523	5,208	2,242	2,262
		3 ^a	1,505	1,401	1,150	7,933	6,841	7,856
		4 ^a	0,738	0,454	0,604	2,669	3,180	3,275
Bagé	0	1 ^a	0,253	0,071	0,028	0,120	0,218	0,080
		2 ^a	0,266	0,174	0,017	0,179	0,175	0,014
		3 ^a	0,192	0,190	0,080	0,233	0,174	0,021
		4 ^a	0,045	0,050	0,036	0,107	0,072	0,022
	40	1 ^a	0,094	0,112	0,106	0,574	0,648	0,145
		2 ^a	0,219	0,099	0,075	0,556	0,726	0,174
		3 ^a	0,185	0,244	0,188	0,636	0,723	0,272
		4 ^a	0,053	0,084	0,083	0,392	0,385	0,120
	160	1 ^a	0,448	0,377	0,273	3,763	3,214	2,054
		2 ^a	0,427	0,452	0,372	4,431	4,718	2,294
		3 ^a	0,547	0,415	0,665	3,275	3,789	3,989
		4 ^a	0,231	0,275	0,306	2,261	2,333	2,736
Banhado	0	1 ^a	0,004	0,005	0,004	0,019	0,051	0,005
		2 ^a	0,002	0,007	0,012	0,083	0,010	0,016
		3 ^a	0,000	0,000	0,000	0,190	0,052	0,000
		4 ^a	0,009	0,009	0,005	0,117	0,086	0,000
	40	1 ^a	0,046	0,032	0,025	0,078	0,060	0,050
		2 ^a	0,059	0,028	0,036	0,096	0,070	0,061
		3 ^a	0,016	0,010	0,000	0,035	0,012	0,017
		4 ^a	0,009	0,009	0,002	0,009	0,007	0,002
	160	1 ^a	0,103	0,129	0,081	0,547	0,467	0,621
		2 ^a	0,109	0,122	0,087	0,507	0,467	0,705
		3 ^a	0,037	0,078	0,026	0,303	0,235	0,399
		4 ^a	0,003	0,010	0,002	0,079	0,048	0,083

Apêndice 4. Valores obtidos para matéria seca da parte aérea por vaso em experimento conduzido com 3 solos de várzea com diferentes CMAP submetidos a 8 níveis de P e 2 fontes de P (valor das três repetições).

Solo	Dose de P mg kg ⁻¹	Matéria seca					
		FN			SFT		
		Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 1	Rep 2	Rep 3
		----- g vaso ⁻¹ -----					
Pelotas	0	8,60	11,97	8,58	9,30	10,98	9,43
Pelotas	10	15,61	18,32	13,94	18,25	16,51	17,14
Pelotas	20	17,63	17,34	17,41	20,01	17,35	15,92
Pelotas	40	18,26	17,24	18,27	16,93	17,95	18,58
Pelotas	80	17,25	15,66	16,52	16,87	16,55	17,20
Pelotas	160	17,46	17,67	15,80	17,14	15,27	16,80
Bagé	0	35,56	33,21	24,83	31,58	31,52	29,37
Bagé	10	33,54	30,95	33,38	30,09	32,20	27,63
Bagé	20	29,60	35,62	27,76	33,38	30,19	36,05
Bagé	40	34,21	31,01	27,63	29,93	29,85	32,76
Bagé	80	37,73	35,18	31,72	29,57	34,95	29,98
Bagé	160	30,45	34,41	29,22	32,02	33,56	34,31
Banhado	0	6,37	7,41	5,22	9,07	11,24	8,79
Banhado	10	12,29	14,27	12,59	14,99	14,69	15,61
Banhado	20	15,91	15,01	18,26	21,45	21,17	22,07
Banhado	40	21,11	22,42	18,64	24,14	25,89	24,64
Banhado	80	26,58	26,92	23,58	27,17	28,90	28,19
Banhado	160	24,99	24,99	23,15	32,90	28,88	32,47

Apêndice 5. Valores obtidos para fósforo no tecido foliar por vaso em experimento conduzido com 3 solos de várzea com diferentes CMAP submetidos a 8 níveis de P e 2 fontes de P (valor das três repetições).

Solo	Dose de P	Fósforo no tecido					
		FN			SFT		
		Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 1	Rep 2	Rep 3
	mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹					
Pelotas	0	1,26	1,29	1,31	1,66	1,69	1,49
Pelotas	10	2,26	1,89	2,46	2,82	2,35	2,41
Pelotas	20	3,00	2,92	3,02	3,46	3,04	3,43
Pelotas	40	4,00	3,31	3,57	4,01	4,17	4,16
Pelotas	80	4,30	4,53	4,25	3,70	4,35	5,28
Pelotas	160	4,25	4,44	4,27	4,08	5,13	5,35
Bagé	0	2,29	2,15	1,96	2,35	2,71	2,67
Bagé	10	2,14	2,31	2,18	3,44	3,29	3,47
Bagé	20	2,73	2,56	2,92	4,06	3,72	3,23
Bagé	40	2,84	2,83	2,08	3,95	4,05	4,05
Bagé	80	3,38	3,38	4,00	4,22	4,15	4,81
Bagé	160	4,02	3,49	3,90	4,63	4,46	4,71
Banhado	0	1,00	0,88	0,92	1,55	1,44	1,27
Banhado	10	1,08	1,18	0,89	1,53	1,64	1,47
Banhado	20	1,39	1,35	1,49	1,64	1,73	1,87
Banhado	40	1,53	1,68	1,87	2,43	2,14	2,53
Banhado	80	2,31	2,35	2,21	3,33	3,32	3,54
Banhado	160	2,98	2,50	2,85	3,81	3,76	3,86

Apêndice 6. Valores obtidos para a quantidade de fósforo acumulado por vaso em experimento conduzido com 3 solos de várzea com diferentes CMAP submetidos a 8 níveis de P e 2 fontes de P (valor das três repetições).

Solo	Dose de P	Fósforo acumulado					
		FN			SFT		
		Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 1	Rep 2	Rep 3
	mg kg ⁻¹	mg vaso ⁻¹					
Pelotas	0	10,8	15,4	11,2	15,4	18,6	14,1
Pelotas	10	35,3	34,6	34,3	51,5	38,8	41,3
Pelotas	20	52,9	50,6	52,6	69,2	52,7	54,6
Pelotas	40	73,0	57,1	65,2	67,9	74,9	77,3
Pelotas	80	74,2	70,9	70,2	62,4	72,0	90,8
Pelotas	160	74,2	78,5	67,4	69,9	78,3	89,9
Bagé	0	81,4	71,4	48,7	74,2	85,4	78,4
Bagé	10	71,8	71,5	72,8	103,5	105,9	95,9
Bagé	20	80,8	91,2	81,1	135,5	112,3	116,4
Bagé	40	97,2	87,8	57,5	118,2	120,9	132,7
Bagé	80	127,5	118,9	126,9	124,8	145,0	144,2
Bagé	160	122,4	120,1	114,0	148,3	149,7	161,6
Banhado	0	6,4	6,5	4,8	14,1	16,2	11,2
Banhado	10	13,3	16,8	11,2	22,9	24,1	22,9
Banhado	20	22,1	20,3	27,2	35,2	36,6	41,3
Banhado	40	32,3	37,7	34,9	58,7	55,4	62,3
Banhado	80	61,4	63,3	52,1	90,5	95,9	99,8
Banhado	160	74,5	62,5	66,0	125,3	108,6	125,3

Apêndice 7. Teores de fósforo extraídos pelo método Mehlich-1 do experimento conduzido com 3 solos de várzea com diferentes CMAP submetidos a 8 níveis de P e 2 fontes de P depois do período de incubação dos adubos (valor das três repetições).

Solo	Dose de P	Mehlich-1					
		FN			SFT		
		Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 1	Rep 2	Rep 3
	mg kg ⁻¹	----- mg dm ⁻³ -----					
Pelotas	0	8,9	7,0	6,3	10,4	10,3	11,1
Pelotas	10	9,1	10,7	12,5	14,2	12,7	12,6
Pelotas	20	15,7	15,5	15,0	21,7	17,5	16,2
Pelotas	40	29,8	25,5	18,8	28,1	27,6	29,3
Pelotas	80	45,7	37,5	55,9	49,0	48,0	50,0
Pelotas	160	76,6	102,1	82,8	96,6	93,6	90,7
Bagé	0	18,0	16,6	12,9	15,9	15,7	15,2
Bagé	10	14,3	14,3	15,5	16,9	16,6	15,0
Bagé	20	21,3	21,4	20,4	20,3	18,6	18,6
Bagé	40	28,6	32,7	31,6	27,2	30,4	28,9
Bagé	80	41,6	46,3	36,6	43,6	44,3	46,7
Bagé	160	90,5	94,4	84,3	88,2	85,8	82,7
Banhado	0	5,9	6,4	5,2	10,3	8,9	10,7
Banhado	10	8,6	8,8	7,3	14,7	12,4	12,1
Banhado	20	8,8	13,2	13,8	14,7	14,2	15,2
Banhado	40	16,3	12,1	14,2	16,7	12,2	17,9
Banhado	80	35,4	33,9	41,3	30,6	28,1	23,8
Banhado	160	48,8	56,5	41,0	37,4	48,1	45,5

Apêndice 8. Teores de fósforo extraído pelo método da Resina em esferas do experimento conduzido com 3 solos de várzea com diferentes CMAP submetidos a 8 níveis de P e 2 fontes de P depois do período de incubação dos adubos (valor das três repetições).

Solo	Dose de P	Resina em esfera					
		FN			SFT		
		Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rep 1	Rep 2	Rep 3
	mg kg ⁻¹	----- mg dm ⁻³ -----					
Pelotas	0	13,6	16,3	12,9	13,1	12,8	13,7
Pelotas	10	21,4	18	19,9	18,3	18,3	18,4
Pelotas	20	18,3	26,5	19,8	19,6	20,2	22,2
Pelotas	40	34,6	40,0	37,0	31,4	39,0	35,2
Pelotas	80	66,9	65,1	58,6	88,7	86,3	80,9
Pelotas	160	125,7	144,5	93,0	165,5	147,4	147,4
Bagé	0	29,1	33,6	28,7	26,1	23,4	26,0
Bagé	10	28,8	29,0	30,7	35,9	30,5	34,1
Bagé	20	43,9	43,5	40,9	49,9	40,4	37,4
Bagé	40	55,4	36,4	39,6	58,9	66,6	64,1
Bagé	80	64,8	55,2	52,0	106,7	94,5	109,9
Bagé	160	82,0	98,8	98,0	185,1	179,6	179,1
Banhado	0	15,4	16,8	20,4	18,0	16,5	20,5
Banhado	10	31,9	33,8	30,2	16,9	28,2	25,0
Banhado	20	29,6	39,7	52,4	30,2	36,9	43,8
Banhado	40	41,9	46,2	45,5	57,3	38,0	46,1
Banhado	80	84,3	97,4	109,3	87,3	85,4	110,6
Banhado	160	121,2	134,0	130,0	125,6	170,9	148,3