



Dissertação de Mestrado

**ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO
PARA A CULTURA DO ARROZ IRRIGADO EM
SOLOS DO RS**

Sidnei Kuster Ranno

PPGCS

Santa Maria, RS, Brasil

2004

**ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO
PARA A CULTURA DO ARROZ IRRIGADO EM
SOLOS DO RS**

por

Sidnei Kuster Ranno

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de:

Mestre em Ciência do Solo

PPGCS

Santa Maria, RS, Brasil

2004

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO
PARA A CULTURA DO ARROZ IRRIGADO EM
SOLOS DO RS**

Elaborada por
Sidnei Kuster Ranno

Como Requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:

Leandro Souza da Silva
(Dr. Prof. UFSM, Presidente/Orientador)

Luciano Colpo Gatiboni
(Dr. Prof. CEO - UDESC)

Rogério Oliveira de Sousa
(Dr. Prof. FAEM - UFPel)

Santa Maria, 17 de dezembro de 2004.

**“Aquilo que escuto, eu esqueço
Aquilo que vejo, eu lembro
Aquilo que faço, eu aprendo”.**

Confúcio

**“Eles podem fazer tudo porque
pensam que podem”.**

Virgílio



DEDICO aos meus pais Remildo e Dulci
(in memorian), pelo amor,
educação e por terem sido
exemplo de simplicidade,
honestidade e dignidade.

**OFEREÇO a minha irmã Leila pelo
apoio e amizade.**

AGRADECIMENTOS

Ao professor Leandro Souza da Silva, pela orientação, incentivo, amizade, confiança e pelo exemplo de dedicação ao ensino superior e a pesquisa.

Ao professor Danilo Rheinheimer dos Santos, pela orientação amizade, confiança e exemplo de dedicação profissional.

Ao professor João Kaminski, pela orientação, incentivo, amizade, confiança e imprescindível ajuda nos momentos de dificuldades.

Ao professor Luciano Colpo Gatiboni, pelas sugestões, incentivo, amizade e inestimáveis ensinamentos durante minha vida acadêmica.

Aos bolsistas do setor de Química e Fertilidade do Solo, em especial a Fábio Mallmann, Darines Britzke e Ronaldo Nestor Thiesen pela amizade e ajuda na execução dos experimentos.

Aos colegas de curso, em especial a Adair Saggin, Anderson Rhoden, Benjamin Osório Filho, Gustavo Brunetto, Jimmy Rasche e Rosane Martinazzo pelas discussões, estudos e companheirismo.

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

Aos funcionários do Departamento de Solos e do PPGCS, pela ajuda nos momentos de dificuldade.

À CAPES pelo auxílio financeiro e bolsa de estudos.

Ao CNPq pela concessão de uma bolsa de iniciação científica.

À UFSM e ao Departamento de Solos, pela estrutura.

Aos colegas do IRGA pelo auxílio na coleta dos solos estudados.

Aos colegas de apartamento e sobretudo grandes amigos, Amilton, Ana Paula, Fabiano e Micheli pelo apoio, companheirismo e ajuda nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Remildo e Dulci (*in memoriam*), minha irmã Leila, que de alguma ou outra forma estavam presentes nestes dois anos de muito estudo e trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE ANEXOS	xiv
LISTA DE APÊNDICES	xvii
RESUMO	xix
ABSTRACT	xx
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Fósforo no solo.....	4
2.1.1 Formas de fósforo no solo.....	7
2.2 Disponibilidade de fósforo.....	8
2.2.1 Métodos de extração de fósforo.....	13
2.2.1.1 Água ou soluções salinas não tamponadas.....	13
2.2.1.2 Ácidos fortes diluídos com a presença ou não de agentes complexantes.....	14
2.2.1.3 Ácidos fracos diluídos com a presença ou não de agentes complexantes.....	16
2.2.1.4 Soluções alcalinas tamponadas com a presença ou não de agentes complexantes	17
2.2.1.5 Resina trocadora de ânions ou tiras de papel filtro impregnadas com óxidos de Fe	18
2.2.1.6 Troca isotópica com ³² P (valor L e E).....	20
2.2.1.7 P-Remanescente.....	20
2.2.2 Avaliação da disponibilidade de fósforo em solos de várzea.....	21
3 MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Coleta e preparo dos solos.....	25
3.2 Aplicação dos tratamentos.....	29
3.3 Condução do experimento.....	32
3.4 Análises laboratoriais.....	33

3.4.1 Análises químicas e físicas do solo.....	33
3.4.2 Fracionamento químico do fósforo inorgânico do solo.....	33
3.4.3 Metodologias de estimativa de fósforo disponível	36
3.4.4 Análises de tecido vegetal.....	37
3.4.5 Estudos de correlações.....	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1 Adsorção de fósforo nos solos de várzea do RS.....	39
4.2 Fracionamento do fósforo inorgânico dos solos de várzea do RS.....	50
4.3 Metodologias para a avaliação da disponibilidade de fósforo em solos de várzea do RS.....	61
4.3.1 Absorção de fósforo pelas plantas de arroz.....	61
4.3.2 Fósforo extraível por ácidos fortes diluídos com a presença ou não de agentes complexantes.....	63
4.3.3 Fósforo extraível por ácidos fracos diluídos com a presença ou não de agentes complexantes.....	70
4.3.4 Fósforo extraível por soluções alcalinas tamponadas com a presença ou não de agentes complexantes.....	75
4.3.5 Fósforo extraível por resina trocadora de ânions	78
4.3.6 P-remanescente.....	79
4.3.7 Separação dos solos em grupos com base em características que estão relacionadas a adsorção de P e/ou com as reações de oxidação-redução.....	81
5 CONCLUSÕES.....	85
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86
7 ANEXOS.....	95
8 APÊNDICES.....	119

LISTA DE TABELAS

1. Atributos físicos e químicos das 16 amostras de solo originais na camada de 0-20 cm.....	27
2. Doses de P_2O_5 aplicadas para obtenção dos níveis de P dos solos em estudo com base na manutenção de um teor de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ na solução do solo.....	31
3. Resumo da composição química dos extratores e procedimento de extração do P disponível por diferentes métodos.....	38
4. Capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) e atributos químicos e físicos dos solos coletados nos 16 municípios do RS.....	41
5. P aplicado para a obtenção de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ de fósforo na solução do solo, P disponível antes e após aplicação do P, ΔP disponível e fator dreno (P aplicado para o acréscimo no P disponível) em solos de várzea do RS.....	42
6. Equações e coeficientes de correlação linear simples entre a CMAP e as variáveis estudadas para o conjunto de solos em estudo.....	44
7. P disponível nas amostras originais, dose de P estimada para a obtenção do N_2 ($0,2 \text{ mg L}^{-1}$ na solução do solo) (Langmuir) , P recomendado pela CFS-RS/SC, Δ entre as doses estimadas, P solução c/ dose da CFS-RS/SC e acréscimo na produção de MS do arroz comparando a não aplicação e aplicação de P no N_2	49
8. Formas de P inorgânico nas amostras de solo seco sem a aplicação de P.....	54
9. Formas de P inorgânico nas amostras após 30 dias de alagamento sem a aplicação de P.....	55
10. Modificações na fração Fe-P decorrentes do alagamento durante 30 dias dos solos sem e com aplicação de P.....	56

11. Modificações na fração Ca-P decorrentes do alagamento durante 30 dias dos solos sem e com aplicação de P.....	59
12. Fósforo absorvido pelas plantas de arroz em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L ⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais..	62
13. Teor de argila, fósforo adicionado, percentagem de fósforo recuperado por Mehlich-1, Mehlich-2, Mehlich-3, Bray-1, Bray-2 e H ₂ SO ₄ e percentagem de P absorvida em relação ao fósforo aplicado no N_2	67
14. Coeficientes de correlação linear (r) entre os teores obtidos pelos extratores ácidos fortes diluídos com a presença ou não de agentes complexantes.....	70
15. Teor de argila, fósforo adicionado, percentagem de fósforo recuperado por EDTA, Texas, Lactato e Morgan e percentagem de P absorvida em relação ao fósforo aplicado no N_2	73
16. Coeficientes de correlação linear (r) entre os teores obtidos pelos extratores ácidos fracos diluídos com a presença ou não de agentes complexantes.....	75
17. Coeficientes de correlação linear (r) entre as soluções alcalinas tamponadas com a presença ou não de agentes complexantes.....	77
18. Coeficientes de correlação linear simples (r) entre os teores de fósforo obtidos pelos extratores e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz considerando todos os solos como um único conjunto e separando os solos em grupos de acordo com o seu conteúdo de argila.....	83

LISTA DE FIGURAS

1. Mapa do RS representando materiais de origem dos solos e locais de coleta das amostras para o experimento.....	28
2. Esquema da técnica de fracionamento do fósforo inorgânico do solo adaptado de Kuo (1996).....	35
3. Correlações estabelecidas entre os teores de fósforo pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-2, Mehlich-3, Bray-1, Bray-2 e H ₂ SO ₄ SP e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz.....	64
4. Correlações estabelecidas entre os teores de fósforo pelos extratores Morgan, Texas, Lactato de Ca e EDTA e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz.....	71
5. Correlações estabelecidas entre os teores de fósforo pelos extratores Olsen, NaOH e Oxalato e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz.....	76
6. Correlação estabelecida entre os teores de fósforo pelo extrator resina trocadora de ânions (RTA) em lâminas e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz.....	79
7. Correlações estabelecidas entre os teores de fósforo remanescente na solução com a aplicação de 60 mg L ⁻¹ de P e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz.....	80

LISTA DE ANEXOS

1. Ilustração demonstrando a coleta do solo (a), secagem ao ar (b), incubação com calcário em sacos plásticos (c) e abertura semanal dos sacos plásticos (d).....	96
2. Ilustração demonstrando o solo acomodado dentro de baldes (a), as plântulas de arroz logo após o trasplante (b) e as plantas de arroz antes e após o alagamento(c, d).....	97
3. Esquema demonstrando desenvolvimento das plantas de arroz na casa de vegetação.....	98
4. Coleta da parte aérea (massa fresca) do experimento de casa de vegetação realizada 45 dias após o transplante para os baldes.....	99
5. Produção de massa seca em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L ⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.....	100
6. Teor de P na massa seca em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L ⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.....	101
7. Adsorção de P em função da aplicação de níveis crescentes de P (0, 50, 100, 200, 300, 600, 900 e 1800 mg Kg ⁻¹ de P) aos solos coletados nos diferentes municípios.....	102
8. Adsorção de P em função da aplicação de níveis crescentes de P (0, 50, 100, 200, 300, 600, 900 e 1800 mg Kg ⁻¹ de P) aos solos coletados nos diferentes municípios.....	103
9. Fósforo disponível pós-incubação por Mehlich-1 em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L ⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.....	104

10. Fósforo disponível por Mehlich-2 pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L^{-1} de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais..... 105
11. Fósforo disponível por Mehlich-3 pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L^{-1} de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais..... 106
12. Fósforo disponível por Bray-1 pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L^{-1} de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.. 107
13. Fósforo disponível por Bray-2 pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L^{-1} de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais. 108
14. Fósforo disponível por H_2SO_4 SP pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L^{-1} de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais..... 109
15. Fósforo disponível por Morgan pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L^{-1} de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais. 110
16. Fósforo disponível por Texas pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L^{-1} de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais. 111
17. Fósforo disponível por Lactato de Ca pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L^{-1} de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais..... 112

18. Fósforo disponível por EDTA pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais..... 113
19. Fósforo disponível por Olsen pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais. 114
20. Fósforo disponível por NaOH 0,1 mol l⁻¹ pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais..... 115
21. Fósforo disponível por Oxalato pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais. 116
22. Fósforo disponível por RTA-lâminas pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais..... 117
23. Fósforo disponível por P-remanescente pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais..... 118

LISTA DE APÊNDICES

1. Associação entre os locais de coleta dos solos objetos de estudo e as unidades de mapeamento e classificação brasileira.....	120
2. Determinação de fósforo inorgânico em extratos alcalinos do solo (Dick & Tabatabai, 1977).....	121
3. Determinação de fósforo inorgânico em extratos ácidos do solo (Murphy & Riley, 1962).....	122
4. Digestão do solo para análise do fósforo total (Sommers & Nelson, 1972).....	123
5. Fósforo disponível por Mehlich-1 (Mehlich, 1953).....	124
6. Fósforo disponível por Mehlich-2 (Mehlich, 1978).....	125
7. Fósforo disponível por Mehlich-3 (Mehlich, 1984).....	126
8. Fósforo disponível pela resina trocadora de ânions (adaptado de Gatiboni, 2003).....	127
9. Fósforo disponível por Bray-1 (adaptado de Bray, 1945).....	129
10. Fósforo disponível por Bray-2 (adaptado de Bray, 1945).....	130
11. Fósforo disponível por Olsen (adaptado de Tran et al., 1990)..	131
12. Fósforo disponível por Morgan (adaptado de Baker & Hall, 1967).....	132
13. Fósforo disponível por Lactato de Ca (adaptado de Steffens, 1994).....	133

14. Fósforo disponível por Texas (adaptado de Sharpley et al., 1987).....	134
15. Fósforo disponível por oxalato de amônio (adaptado de Shahandeh et al., 1994).....	135
16. Fósforo disponível por EDTA (adaptado de Labhsetwar & Soltanpour, 1985).....	136
17. Fósforo disponível por H ₂ SO ₄ (adaptado de Catani & Gargantini, 1954).....	137
18. Fósforo disponível por P-Remanescente (Adaptado de Novais & Smith, 1999).....	138
19. Fósforo disponível por NaOH (adaptado de Chang & Jackson, 1957).....	139

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

**ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO PARA A CULTURA DO ARROZ
IRRIGADO EM SOLOS DO RS**

AUTOR: SIDNEI KUSTER RANNO
ORIENTADOR: LEANDRO SOUZA DA SILVA
CO-ORIENTADOR: DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS
CO-ORIENTADOR: JOÃO KAMINSKI
Santa Maria, 17 de dezembro de 2004.

A avaliação do fósforo disponível é dificultada em solos de várzea, sazonalmente alagados para o cultivo do arroz, em função da alternância nas condições de oxidação e redução que determina modificações na dinâmica deste elemento. Dessa forma, vários métodos de extração química de fósforo, que podem ser eficientes para avaliar sua disponibilidade e recomendar adubação fosfatada para culturas de sequeiro, podem apresentar baixa eficiência para solos de várzea. Neste sentido, os objetivos deste trabalho foram: (a) caracterizar as formas de P inorgânico e a capacidade de adsorção de P (CMAP) de amostras de diferentes locais do RS; (b) testar a correlação entre os teores de fósforo extraídos por diferentes métodos com os teores absorvidos pelo arroz e indicar o método mais adequado para a predição da disponibilidade de fósforo para a cultura do arroz nos solos do RS. Foram coletadas 16 amostras da camada superficial (0-20 cm) de solos de várzea do RS, com ampla diversidade de características químicas e físicas. As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2mm. Para uniformizar o pH dos solos, aplicou-se calcário dolomítico nas quantidades equivalentes para a elevação do pH dos solos a pH 5,5, baseado no índice SMP de cada amostra. Após um período de 35 dias de incubação, realizou-se a montagem dos vasos do experimento com cultivo de plantas. Os vasos constituíram-se de baldes plásticos contendo o solo corrigido, onde para cada um dos solos amostrados aplicou-se 3 níveis de P: N₀ (sem P), N₁ (1/2 de N₂), N₂ (0,2mgL⁻¹ na solução do solo) em função da capacidade máxima de adsorção de P de cada solo, com 3 repetições, totalizando 144 unidades experimentais. Os vasos ficaram dispostos na casa de vegetação em um delineamento inteiramente casualizado. Cultivou-se o arroz durante 45 dias com uma lâmina d' água de aproximadamente 5 cm e colheu-se a parte aérea para a análise do tecido vegetal e obtenção do P absorvido. A partir daí foram testadas diferentes metodologias de análise de solo: Mehlich-1, Mehlich-2, Mehlich-3, Resina em lâminas, Bray-1, Bray-2, Olsen, Morgan, Lactato de Ca, Texas, Oxalato, EDTA, H₂SO₄, P-Remanescente e NaOH, e realizaram-se análises de correlação com as quantidades absorvidas pelas plantas no intuito de verificar a eficiência das mesmas em predizer a disponibilidade de P para o arroz. Os resultados obtidos demonstram que os solos de várzea do RS apresentam uma grande diversidade quanto à CMAP, quantidade de P total e distribuição das formas de P inorgânico, sendo que a fração Fe-P é a de maior contribuição para o P-lábil antes e após o alagamento. Dentre os métodos testados, H₂SO₄ SP, Texas, Lactato de Ca, EDTA, Olsen e RTA se assemelharam à eficiência obtida com o extrator Mehlich-1. No entanto, esses resultados não permitem indicar a substituição do método atualmente empregado por algum dos testados. A inclusão do teor de argila na interpretação dos teores de fósforo extraído aumenta a capacidade preditiva dos métodos dentro de algumas das classes empregadas, com destaque para o Mehlich-1, Bray-2, Lactato de Ca e P-remanescente.

ABSTRACT

Master Dissertation in Soil Science
Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

ESTIMATE OF PHOSPHORUS AVAILABILITY FOR RICE IN SOILS FROM RS

Author: SIDNEI KUSTER RANNO
Adviser: LEANDRO SOUZA DA SILVA
Co-Adviser: DANILO RHEIHEIMER DOS SANTOS
Co-Adviser: JOÃO KAMISKI
Santa Maria, December 17, 2004.

The evaluation of the available phosphorus (P) is hindered in lowland soils flooded for the rice cultivation, since the alternation in the oxidation and reduction conditions determine modifications in the dynamics of this element. Several chemical methods of P extraction, that can be used to evaluate its availability to establish the need to apply P to upland crops, present low efficiency in lowland soils. Therefore, the objectives of this work were: a) to characterize the inorganic P fractions and the P adsorption capacity for different samples in lowland soils from Rio Grande do Sul state (RS); and b) to test the correlation between the phosphorus absorbed by rice and the phosphorus extracted by different methods of soil P analysis, and to propose a more appropriate methodology to predict P availability for flooded rice production. The soils samples were taken from the top 0.20 m in 16 locations in RS with wide diversity of chemical and physical characteristics. The samples were air-dried, crushed, and passed through a 2 mm sieve. To standardize the soil pH, limestone was applied in the equivalent amounts for the soil pH to reach 5,5, based on SMP index of each sample. After a 35-day incubation period, the pots for rice cultivation were setup. The pots were constituted of plastic buckets containing the soils and for each one of sampled soil were applied 3 levels of P: N₀ (without P), N₁ (1/2 of N₂), and N₂ (0,2 mg L⁻¹ in the soil solution) based on the P adsorption capacity of each soil, with 3 replication, adding up 144 experimental units. The pots were positioned in the greenhouse in an entirely randomized experimental design. The rice was cultivated for 45 days with a water layer of approximately 5 cm. At the end of this period, the rice shoot was harvested to measure the adsorbed P. The methods Mehlich-1, Mehlich-2, Mehlich-3, Resin in sheets, Bray-1, Bray-2, Olsen, Morgan, Calcium lactate, Texas, Oxalate, EDTA, H₂SO₄, P-remained, and NaOH were tested and results were correlated with the P absorbed by rice. The results showed the wide diversity in the P adsorption capacity, total amount of P, and distribution of inorganic P fractions, but the Fe-P fraction was the most important in the labile-P before and after flooding. Among the methods, H₂SO₄, Calcium lactate, Texas, EDTA, Olsen, and Resin in sheets were similar to Mehlich-1 efficiency. However, there is not indication to change the actual method used in RS. Coupling the clay content in the P interpretation increase the predictability of some methods in some clay classes, specially to Mehlich-1, Bray-1, Bray-2, Calcium lactate, and P-remained.

1. INTRODUÇÃO

O estado do Rio Grande do Sul apresenta cerca de 20% de sua área com solos caracterizados como *solos de várzea*, o que corresponde a aproximadamente 5,4 milhões de hectares (Pinto et al., 1999). A drenagem insuficiente e o relevo predominantemente plano a suavemente ondulado, principal característica desses solos, propiciou o desenvolvimento da cultura do arroz irrigado por alagamento, ocupando 1.043.623 hectares na safra 2003/2004 (IRGA, 2004). O volume produzido na última safra pelo estado superou 6,3 milhões de toneladas, o que corresponde á uma produtividade média superior a 6 t ha^{-1} . Isto demonstra a grande importância social e econômica desta cultura e o papel do estado como fornecedor de um alimento básico para a população brasileira (IRGA, 2004). Apesar do quadro aparentemente favorável, o rendimento médio obtido no Estado ainda está aquém daqueles obtidos em experimentos ou em lavouras mais tecnificadas, o que pode ser atribuído ao inadequado manejo do solo, da água e das práticas culturais, onde inclui-se o manejo da fertilidade do solo. Entretanto, demonstra o potencial da cultura para rendimentos superiores aos já alcançados.

O rendimento de uma cultivar de arroz é função do seu potencial genético e das condições ambientais durante o cultivo, onde inclui-se o suprimento de nutrientes minerais pelo solo. Quando o solo não tem capacidade de suprir as quantidades de nutrientes exigidas pelas plantas para o seu máximo rendimento, a prática da adubação deve ser empregada. A forma mais rápida e econômica para avaliar a disponibilidade de nutrientes no solo e a quantidade de adubo a ser empregada é através da análise de solo e a consulta de tabelas de recomendação de adubação. Entretanto, a eficácia do uso da análise de solo depende de quanto o valor obtido pelo método está correlacionado com a absorção do nutriente pela planta.

Embora o solo possa apresentar grandes quantidades totais de um determinado nutriente, apenas algumas formas encontram-se disponíveis para serem absorvidas durante o ciclo de uma cultura. No caso do fósforo, o teor médio da quantidade total, na maioria dos solos, equivale a mais de 1.000 kg ha⁻¹ de fósforo presente na camada arável, mas a maior parte encontra-se em formas não passíveis de absorção pelas culturas (Barber, 1995). Dessa forma, a escolha de um método de análise do solo está baseada na capacidade deste estimar a fração do nutriente presente no solo que se correlacione com a quantidade absorvida pelas culturas, em solos que representam uma determinada região de utilização do sistema de recomendação de adubação. Além disto, um método adequado para avaliação da disponibilidade de um nutriente no solo deve apresentar uma grande amplitude no valor da análise entre o solo com teor *baixo* e o solo com teor *alto*, a fim de evitar que o erro de leitura e/ou a contaminação da amostra prejudique demasiadamente a interpretação dos resultados (Mielniczuk, 1995).

A avaliação da disponibilidade de fósforo para as culturas nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina é feita pelo teor de fósforo obtido pelo extrator ácido Mehlich-1, que corresponde a uma fração do fósforo na solução do solo e extraído da superfície dos colóides em uma amostra de solo seco (CQFS – RS/SC, 2004). Entretanto, o alagamento do solo para o cultivo do arroz produz reações de oxi-redução que, em geral, aumentam a disponibilidade de fósforo. Essas alterações dependem das características dos solos, mas todos os tipos de solos em que há cultivo de arroz irrigado por alagamento são classificados como Classe 5 no Sistema de Recomendações de Adubação e de Calagem para os Estados do RS e de SC (CQFS – RS/SC, 2004). Tal procedimento significa considerar a mesma interpretação para o teor de fósforo na análise de solo e a mesma resposta a adubação fosfatada para todos os tipos de solos (Anghinoni & Volkweiss, 1995; CQFS, 2004). Estas considerações contribuem para explicar a baixa eficiência do

método Mehlich-1 na determinação do fósforo disponível em solos alagados (Chang, 1978; Grande et al., 1986). Além disso, a separação entre as classes *baixo* e *alto* no sistema de recomendações para a cultura do arroz irrigado para o RS e SC com o método Mehlich-1 é muito estreita (apenas 3 unidades de mg L^{-1}), dificultando sua interpretação e utilização no manejo da fertilidade do solo.

Considerando a grande importância da cultura do arroz irrigado para o Estado do Rio Grande do Sul e o fato de que o fósforo é um dos elementos mais exigidos para a nutrição da cultura, o conhecimento dos processos que determinam a disponibilidade de fósforo será importante para o desenvolvimento de um método de análise do solo mais eficiente para o diagnóstico da disponibilidade no solo alagado. A obtenção de uma metodologia mais adequada para o estabelecimento da adubação fosfatada no RS possibilitará a maior racionalização na utilização de fertilizantes, permitindo maior economicidade e/ou maior rendimento da cultura do arroz. Outro aspecto importante a ser considerado é que um método mais eficiente para estimar a disponibilidade de fósforo, junto com futuros trabalhos de calibração para a dosagem de adubo fosfatado para as culturas, evitará a aplicação de uma excessiva quantidade de fósforo no agroecossistema, evitando possíveis impactos ao ambiente, especialmente nos mananciais hídricos. Desenvolveu-se o presente trabalho com os objetivos de: (a) caracterizar as formas de P inorgânico e a capacidade de adsorção de P de amostras de diferentes locais do RS; (b) testar a correlação entre os teores de fósforo extraídos por diferentes métodos com os teores absorvidos pelo arroz e indicar o método mais adequado para a predição da disponibilidade de fósforo para a cultura do arroz nos solos do RS.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fósforo no solo

O fósforo (P) tem sido apontado como um dos nutrientes mais limitantes ao rendimento das plantas, apesar de sua relativa abundância na crosta terrestre. Solos bem drenados freqüentemente apresentam baixa disponibilidade de fósforo devido à tendência deste elemento formar compostos estáveis de alta energia de ligação e baixa solubilidade com a fase sólida mineral do solo, principalmente com óxidos e hidróxidos de Fe e Al (Tisdale et al., 1995). Já em ambientes sazonalmente alagados, como os solos de várzea onde se cultiva o arroz irrigado, existe uma alternância nas condições de oxidação e redução, a qual determina modificações intensas na fase sólida mineral do solo e na dinâmica de elementos altamente reativos como o fósforo.

Em condições não saturadas e antes do alagamento para o cultivo do arroz, os solos de várzea comportam-se de forma semelhante aos solos de sequeiro. Com a adição de fertilizantes fosfatados, há uma intensa transferência de íons fosfato da solução para a fase sólida, onde este elemento está mais estável, através do processo genericamente conhecido como sorção. O processo de sorção compreende os processos de adsorção por forças físicas (complexos de esfera externa) e químicas ou específicas (complexo de esfera interna), além da precipitação e a polimerização (McBride, 1994) sendo que, para o fósforo, é de maior importância a adsorção química ou específica com óxidos de Fe e Al, onde os grupos OH^- e OH_2^+ ligados monocordenadamente ao metal (Fe ou Al) são trocados pelo fosfato (Parfitt, 1978).

Com o alagamento do solo durante o cultivo do arroz, o ambiente químico e biológico é profundamente alterado em relação ao anteriormente oxidado. Nessa condição, após o consumo do oxigênio molecular, microrganismos anaeróbios passam a utilizar compostos

oxidados do solo como receptores de elétrons. A partir destas reações de oxi-redução, modificam-se os valores do pH e aumenta a disponibilidade de vários elementos (Ponnamperuma, 1972). O Fe^{3+} e Mn^{4+} da superfície dos óxidos passam para forma de Fe^{+2} e Mn^{+2} , respectivamente, aumentando sua concentração na solução do solo (Vahl, 1991). O fósforo, em função da adsorção específica na superfície dos óxidos, tem sua dinâmica bastante alterada, podendo ser liberado para a solução do solo na medida que há redução do Fe da sua estrutura (Vahl, 1999).

Sah & 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 e hidróxidos de Fe de baixa cristalinidade tornam-se predominantes com o passar do tempo (Moorman & van Breemen, 1978). Nesse ambiente, os óxidos de Fe de baixa cristalinidade, como goethita, lepidocrocita e ferrihidrita, os quais apresentam maior área superficial específica e maior reatividade química do que as frações mais cristalinas (Schwertmann & Taylor, 1989), poderão ser os componentes mais importantes na adsorção de fósforo durante o período em que o solo permanece drenado e, além disso, controlarão a liberação de fósforo provocada pelo posterior alagamento para o cultivo do arroz.

Informações relativas à adsorção de P, como a capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP) e a constante relacionada à energia de ligação deste elemento ao solo, podem ser obtidas através da construção de isotermas de adsorção de P e a aplicação dos resultados em equações semelhantes à desenvolvida por Langmuir em 1918 (Sparks, 1995) apresentada a seguir:

$$P_{\text{SORVIDO}} = (a * b * P_{\text{SOLUÇÃO}}) / (1 + a * P_{\text{SOLUÇÃO}}), \text{ onde:}$$

$$P_{\text{SORVIDO}} = \text{quantidade de fósforo sorvido, em mg kg}^{-1};$$

$$P_{\text{SOLUÇÃO}} = \text{quantidade de fósforo na solução do solo, em mg L}^{-1};$$

$$a = \text{constante relacionada a energia de adsorção de P pelo solo;}$$

$$b = \text{capacidade máxima de adsorção de P, em mg kg}^{-1}.$$

Estas isotermas vêm sendo largamente utilizadas no estudo da adsorção de P em solos de sequeiro. Harter & Baker (1977) verificaram que a isoterma de Langmuir é eficiente no estudo do fenômeno de adsorção do solo, principalmente quando no estudo comparativo de vários solos se correlaciona a CMAP com as características químicas, físicas e mineralógicas dos solos. A sua utilização em estudos da adsorção de P aos solos de várzea torna-se interessante quando consideramos a grande diversidade de solos onde se cultiva arroz no RS, tendo em vista a presença de solos originados de diferentes materiais de origem e em diferentes graus de intemperismo. Na metade Sul do Estado, onde tradicionalmente se cultiva o arroz, os solos são originados, principalmente, de basalto e sedimentos de basalto na região da Fronteira Oeste; de arenitos, siltitos, argilitos e folhelhos na Campanha e Depressão Central; e de sedimentos de granito, na região Litoral Sul (Sousa et al., 2004). Assim, é possível que estes solos apresentem comportamentos bastante distintos quanto à adsorção de P e ao fornecimento de P para a cultura do arroz. Solos mais intemperizados poderão apresentar um caráter dreno do P adicionado como fertilizante, enquanto solos menos intemperizados, como os solos da Campanha ou os aluviais, provavelmente serão fonte de P por apresentarem características (reservas) favoráveis à planta, mesmo que insatisfatórias para altas produtividades. O P adicionado via fertilizante irá somar-se, sem maiores restrições, às reservas já existentes no solo.

2.1.1 Formas de fósforo no solo

O P total do solo encontra-se em formas orgânicas e inorgânicas. O P orgânico, embora possa servir como nutriente às plantas após a mineralização até formas inorgânicas, parece apresentar pouca importância prática (Gatiboni, 2003), principalmente em solos alagados, tendo em vista a menor taxa de mineralização que ocorre em condições anaeróbicas (Patrick & Mahapatra, 1968). De acordo com Chang e Jackson (1957), o fósforo inorgânico do solo pode ser classificado em quatro grupos principais: fosfato de cálcio (Ca-P), fosfato de alumínio (Al-P), fosfato de ferro (Fe-P) e fosfato solúvel por agentes redutores fortes ou P-ocluído.

As quatro formas de P inorgânicas ocorrem em todos os solos. No entanto, existe uma variação na proporção entre elas em função das características dos solos. Em solos ácidos normalmente predominam as formas Al-P, Fe-P e RS-P. Solos neutros e levemente ácidos usualmente contêm as quatro frações em quantidades semelhantes ao passo que solos alcalinos e calcários são freqüentemente dominantes em Ca-P. De um modo geral, Ca-P e Al-P são consideradas as formas de maior probabilidade de ocorrência em solos antes que o intemperismo químico atue severamente. Em um avançado estágio de intemperismo, o Fe-P aumenta as custas do Al-P e Ca-P, com posterior oclusão de parte do Al-P e Fe-P pelo revestimento com óxidos de ferro (Patrick & Mahapatra, 1968). Os minerais mais estáveis formados entre Al-P, Fe-P e Ca-P são a varicita, strenguita e a apatita, respectivamente (Sah & Mikkelsen, 1986).

Informações acerca da distribuição do P nas diferentes formas em condições de solo alagado ainda são limitadas. Resultados de pesquisa obtidos até o momento refletem condições bastante específicas e, deste modo, são necessários estudos para as condições nas quais se cultiva o arroz no Brasil. Neste contexto, ainda devemos considerar a grande diversidade de solos onde se cultiva o arroz, dentre os quais têm-se solos

originados de diferentes materiais de origem e em diferentes graus de intemperismo, conforme abordado anteriormente. A distribuição dos materiais de origem dos solos hidromórficos do Estado do Rio Grande do Sul determinou a localização dos solos mais ricos em ferro na Fronteira Oeste e a diminuição da concentração do ferro na região do Litoral Sul, onde ocorrem os solos derivados do granito (Sousa et al., 2004). Assim, é provável que existam grandes variações na distribuição das formas de P para estes solos, o que possivelmente determina uma dinâmica diferente para o P no solo, tanto em condição de solo seco quanto após o alagamento durante o ciclo do arroz.

2.2 Disponibilidade de fósforo

O rendimento de um cultivar é função do seu potencial genético e das condições ambientais durante o cultivo, onde se inclui o suprimento de nutrientes minerais como o fósforo. De um modo geral, mesmo que os teores totais de fósforo no solo sejam altos em relação aos necessários para as plantas, apenas uma pequena fração deste têm baixa energia de ligação que possibilite sua dessorção e disponibilidade às plantas. A fração de fósforo ligada aos colóides com baixa energia é conhecida como fator quantidade (Q) e está em equilíbrio com o fósforo na solução do solo, fator intensidade (I), de onde as plantas absorvem-no. A taxa de reposição do I pelo Q é conhecido como fator capacidade (C) ou poder tampão (Novais & Smith, 1999). Quando o solo não tem capacidade de suprir as quantidades de nutrientes exigidas pelas plantas para o seu máximo rendimento, a prática da adubação deve ser empregada.

A forma mais rápida e econômica para avaliar a disponibilidade de nutrientes no solo e a quantidade de fertilizantes a ser empregada se dá através da análise de solo e a consulta de tabelas de recomendação de adubação. Entretanto, a eficácia do uso da análise de solo depende de quanto o valor obtido pelo método está correlacionado com a absorção do

nutriente pela planta, em solos que representam uma determinada região de utilização do sistema de recomendação de adubação. Além disto, um método adequado para avaliação da disponibilidade de um nutriente no solo deve apresentar uma grande amplitude no valor da análise entre o solo com teor *baixo* e o solo com teor *alto*, a fim de evitar que o erro de leitura e/ou a contaminação da amostra prejudique demasiadamente a interpretação dos resultados (Mielniczuk, 1995).

A avaliação do fósforo disponível no solo às plantas tem sido feita com o uso de soluções extratoras com características e princípios de extração diversos (acidez, diluição, tamponamento, presença de compostos complexantes) (Novais & Smith, 1999). As extrações do fósforo disponível fornecem valores que variam entre intensidade e quantidade e, às vezes, até mesmo, parte do fósforo não disponível (NQ), 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 de Q passível de repor I, para prever a necessidade de suplementação do nutriente. A eficiência desses métodos depende da forma em que o nutriente está inserido em Q (Al-P, Ca-P, Fe-P) e do acesso do extrator a essa forma (Gatiboni, 2003).

O desenvolvimento de métodos químicos de análise do fósforo disponível teve como base teórica o fracionamento de Chang & Jackson (1957) que, baseado no modo de ação dos compostos químicos, utilizavam soluções químicas específicas para extrair seletivamente diferentes formas de fósforo do solo. Assim, nas últimas décadas numerosas metodologias de análise de solo têm sido desenvolvidas no intuito de avaliar a disponibilidade de P nos solos às plantas. Conforme Kuo (1996), os extratores podem ser classificados em várias categorias, listadas a seguir:

- a) Água ou soluções salinas não tamponadas;
- b) Ácidos fortes diluídos com a presença ou não de agentes complexantes;

- c) Ácidos fracos diluídos com a presença ou não de agentes complexantes;
- d) Soluções alcalinas tamponadas com a presença ou não de agentes complexantes;
- e) Resina trocadora de ânions ou tiras de papel filtro impregnadas com óxidos de Fe;
- f) Troca isotópica com ^{32}P ; e
- g) P-remanescente.

Embora pareça vantajosa a existência de uma grande quantidade de métodos de estimativa da disponibilidade de fósforo às plantas, a existência de tal quantidade e diversidade de metodologias para este fim está relacionada à complexidade do comportamento do fósforo no solo (Larsen, 1967) e à dificuldade de encontrarmos uma metodologia de avaliação de disponibilidade de P satisfatória para um grande número de solos. Por isto, para todos os métodos desenvolvidos existem controvérsias quanto a sua eficiência em predizer a disponibilidade de fósforo (Silva & Rajj, 1999).

Sabe-se que cada metodologia extrai diferentes quantidades de P dependendo do tipo de extratores utilizados. Os métodos para a avaliação da disponibilidade de P não precisam, necessariamente, extrair todo o fator Q do solo, desde que seja mantida a proporcionalidade da fração extraída em diferentes tipos de solo e estoques de fósforo (Novais & Smith, 1999). Isto determina a necessidade de calibração do método para correlacionar os teores extraídos pelo método com a absorção de fósforo e produtividade das culturas em condições de cultivo a campo.

O passo inicial na obtenção de uma metodologia de análise de solo adequada para uma determinada região é a realização de estudos de correlação, os quais são feitos normalmente em casa de vegetação, utilizando-se para tal solos representativos da região de abrangência do sistema de recomendação, onde se pretende fazer posteriormente

estudos de calibração. A calibração de um método de análise do solo significa relacionar o teor de um determinado elemento no solo, utilizando-se uma metodologia de análise de solo previamente selecionada pelo estudo de correlação, com parâmetros de plantas cultivadas a campo (índices de crescimento, teor e/ ou produção de uma cultura), simulando as condições naturais de produção (Anghinoni & Volkweiss, 1984).

A calibração do método é uma das etapas finais de um programa de recomendação de fertilizantes, no qual há a necessidade de conduzir experimentos a campo de uma cultura durante alguns anos e em vários locais adotando-se práticas de cultivo que sejam as mais próximas possíveis àquelas utilizadas pelos agricultores, de modo a garantir a obtenção de rendimento máximo. Também se deve utilizar diversos níveis do nutriente em estudo, mantendo os demais em teores adequados para obter o rendimento máximo. Com a relação entre os teores no solo do nutriente em estudo e os rendimentos relativos do conjunto de experimentos obtém-se uma curva de resposta da cultura ao teor do nutriente no solo. A partir da curva de resposta é possível estimar a probabilidade de resposta da cultura a um estado de fertilidade em outros locais da mesma região em que foi realizado o estudo (Mielniczuk, 1995).

Conforme Anghinoni & Volkweiss (1984), a etapa de calibração do método de análise do solo, durante a elaboração de um programa de recomendação de adubação, visa não somente estabelecer teores de um elemento no solo para uma probabilidade de resposta de uma cultura, mas visa também definir doses do elemento para aumentar a resposta, considerando-se, a dose de máxima eficiência técnica (MET) e/ou econômica (MEE). Assim, quanto maior o teor do nutriente no solo, menor a probabilidade de resposta, até atingir um certo teor, conhecido como nível ou teor crítico (NC ou TC), onde a probabilidade de resposta à adubação com este nutriente é mínima.

No RS e SC, os estudos de calibração a campo para fósforo foram realizados entre as décadas de 60 e 80, utilizando o método Mehlich-1.

Foram instalados experimentos em vários locais, em parceria com instituições de ensino, pesquisa e extensão, as quais, juntamente com a Comissão de Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CFS-RS/SC), elaboraram as primeiras recomendações para estes Estados. A escolha do Mehlich-1 como método oficial avaliação do P disponível para solos do RS e SC, e vários outros estados, é consequência de um convênio entre o Ministério da Agricultura e a Universidade da Carolina do Norte (EUA), através do qual se buscava transferir conhecimentos e tecnologias para as condições do Brasil, na época bastante carente em conhecimentos básicos na área da fertilidade do solo e nutrição de plantas. Ao longo dos anos foram sendo acumulados conhecimentos na área que permitiram ajustes nas recomendações como, por exemplo, a definição de níveis críticos para classes de solos agrupados conforme o teor de argila, primeiramente sem subdivisão, culminando no atual programa de recomendação (CQFS – RS/SC, 2004), no qual faz-se a interpretação do teor extraído por Mehlich-1 considerando-se 4 classes texturais, cada uma com seu nível crítico (obtido em experimentos de calibração a campo) e os solos sob cultivo de arroz irrigado foram agrupados na classe 5, sem considerar o efeito da textura durante a interpretação dos teores extraídos.

2.2.1 Métodos de extração de fósforo

2.2.1.1 Água ou soluções salinas não tamponadas

a) Água

O P da solução do solo ou P solúvel em água representa a porção do P do solo que está em equilíbrio com o P da fase sólida nas condições que predominam no solo. É uma porção muito pequena de P disponível facilmente acessada pelas raízes das plantas. O P-solúvel em água é função da quantidade de P sorvido e da capacidade de sorção ou, alternativamente, do nível de saturação de P na superfície (Murrman & Peech, 1969). O P-solúvel pode estar correlacionado também a concentração de P fisicamente sorvido (Ryden & Syers, 1977). Entretanto, devido a característica não tamponada da água, a quantidade de P solúvel, ou a concentração de P na solução, são altamente dependentes do pH, da força iônica e do tipo e valência dos cátions trocáveis (Sharpley et al., 1988). Assim, existem tanto trabalhos onde o P-solúvel em água se correlacionou bem com a absorção de P pelas plantas (Tran et al., 1988), como outros onde houve correlação (Fried & Shapiro, 1956). Além disso, em concentrações de P semelhantes na solução do solo, solos com maior poder tampão ou maiores conteúdos de argila devem conter mais P-lábil para repor o P da solução removido pela absorção das raízes das plantas (Heddley et al., 1982). Desta maneira, as concentrações críticas de P na solução ou a quantidade crítica de P-solúvel em água requerido para um ótimo crescimento das planta é menor para solos argilosos do que para os solos arenosos (Kamprath & Watson, 1980).

b) Solução de CaCl_2

Uma solução de CaCl_2 ($0,01 \text{ mol l}^{-1}$) pode ser usado no lugar de água para a obtenção de um filtrado mais limpo (Asyling, 1964). A quantidade de P solúvel em solução de CaCl_2 é menor do que aquela em água devido em parte ao aumento da sorção de P provocada pelo Ca, prejudicando assim a determinação deste elemento no extrato em função

das baixas concentrações. Diferentemente da extração com água, a extração com o CaCl_2 diluído não requer centrifugação com alta velocidade para a obtenção de um extrato limpo (Schofield, 1955). Da mesma forma que o P-solúvel em água, o nível crítico de P-solúvel em CaCl_2 para um ótimo crescimento vegetal é menor para solos argilosos do que para solos arenosos (Fox & Kamprath, 1970).

2.2.1.2 Ácidos fortes diluídos com a presença ou não de agentes complexantes

a) Extrator Mehlich-1:

O extrator Mehlich-1 (Mehlich, 1953) se constitui da adição de H_2SO_4 $0,0125 \text{ mol l}^{-1}$ + HCl $0,05 \text{ mol l}^{-1}$ (que são ácidos fortes em baixas concentrações) à uma alíquota de solo. Estes ácidos dissolvem predominantemente o P ligado ao Cálcio e quantidades menores de P ligado a Ferro e Alumínio, em função das características de solubilidade dos fosfatos (Silva & Raij, 1999). O Mehlich-1 é o método de extração de P utilizado na rotina dos laboratórios de análise de solo que fazem parte da Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo e Tecido Vegetal dos Estados do RS e SC (ROLAS).

b) Extrator Mehlich-2:

O extrator Mehlich-2 (Mehlich, 1978), consiste da mistura de extratores (NH_4Cl $0,2 \text{ mol l}^{-1}$ + CH_3COOH $0,2 \text{ mol l}^{-1}$ + NH_4F $0,015 \text{ mol l}^{-1}$ + HCl $0,012 \text{ mol l}^{-1}$) e permite a extração de vários elementos simultaneamente. Esse extrator tem sua ação na extração de P baseado na acidez da solução e na presença do íon fluoreto. Para solos ácidos, o F^- promove a dessorção do P pelo decréscimo da atividade do Al devido a formação de complexos Al-F, ou seja, o íon fluoreto forma um forte complexo com os íons Al^{+3} , liberando o P ligado ao metal (Kuo, 1996). O P presente no solo como fosfato de cálcio também é extraído, com a precipitação de fluoreto de Ca (Silva & Raij, 1999). O íon fluoreto também

atua na supressão da readsorção do P solubilizado pelos colóides do solo.

c) Extrator Mehlich-3:

O Mehlich-3 (Mehlich, 1984) consiste da mistura de extratores (NH_4F 0,015 mol l^{-1} + NH_4NO_3 0,25 mol l^{-1} + CH_3COOH 0,2 mol l^{-1} + HNO_3 0,013 mol l^{-1} + EDTA 0,001 mol l^{-1}) e também permite a extração de vários elementos simultaneamente. Esse extrator tem sua ação na extração de P baseado na acidez da solução e na presença do íon fluoreto. Esta solução difere da anterior pela substituição do ânion cloreto pelo nitrato para eliminar o efeito corrosivo de cloretos sobre instrumentos e pela adição de EDTA, o qual serve para complexar alguns micronutrientes.

d) Extrator Bray-1:

A solução utilizada contém HCl 0,025 mol l^{-1} e NH_4F 0,03 mol l^{-1} (Bray & Kurtz, 1945). Esta é uma solução ácida contendo o F^- como íon complexante. A ação do F^- durante o processo de extração já foi discutida anteriormente.

e) Extrator Bray-2:

A solução extratora apresenta constituição e princípio de extração semelhante ao Bray-1. É uma solução ácida com um íon complexante que se constitui de HCl 0,1 mol l^{-1} e NH_4F 0,03 mol l^{-1} (Bray & Kurtz, 1945).

f) Extrator H_2SO_4 :

O extrator H_2SO_4 0,025 mol l^{-1} (Catani & Gargantini, 1954) se constitui da adição de um ácido forte em baixa concentração à uma alíquota de solo. Segundo os autores, essa solução dissolve os íons H_2PO_4^- e todo o fósforo nas formas di e tricálcica, entre outras formas de P inorgânico.

2.2.1.3 Ácidos fracos diluídos com a presença ou não de agentes complexantes

a) Extrator Morgan:

O extrator desenvolvido por Morgan em 1937 se constitui de acetato de sódio $0,735 \text{ mol l}^{-1}$ em ácido acético $0,5 \text{ mol l}^{-1}$ a pH 4,8 (Baker & Hall 1967). Neste método, os ânions orgânicos presentes na solução têm influência sobre a extração através de dois mecanismos: a) os ânions acetato formam complexos com os cátions de superfície das partículas liberando P; b) os ânions orgânicos substituem o P adsorvido no solo, reduzindo sua readsorção por bloquear os sítios de adsorção (Kamprath & Watson, 1980).

b) Extrator Lactato de Cálcio:

Este extrator se constitui de Lactato de Ca $0,02 \text{ mol l}^{-1}$ + HCl $0,02 \text{ mol l}^{-1}$ ajustado a pH 3,7 (Steffens, 1994). A extração do P por esse método se dá pela acidez da solução e presença de ânions orgânicos, os quais têm influência sobre a extração através de dois mecanismos: a) os ânions lactato formam complexos com os cátions de superfície das partículas liberando P; b) os ânions orgânicos substituem o P adsorvido no solo, reduzindo sua readsorção por bloquear os sítios de adsorção (Kamprath & Watson, 1980).

c) Extrator Texas:

A extração por esse método é feita adicionando-se NH_4Ac $1,43 \text{ mol l}^{-1}$ (pH 4,2) + EDTA $0,025 \text{ mol l}^{-1}$ à uma alíquota de solo (Sharpley et al., 1987). A extração do P se dá pela acidez da solução e presença de ânions orgânicos, os quais têm influência sobre a extração através de dois mecanismos: a) os ânions acetato formam complexos com os cátions de superfície das partículas liberando P; b) os ânions orgânicos substituem o P adsorvido no solo, reduzindo sua readsorção por bloquear os sítios de adsorção (Kamprath & Watson, 1980). Além disso, o EDTA promove a

dessorção do P pelo decréscimo da atividade do Fe devido à formação de complexos Fe-EDTA, ou seja, a molécula do EDTA forma um forte complexo com os íons Fe liberando o P ligado ao metal.

d) EDTA:

A solução de Na₂-EDTA 0,02 mol l⁻¹ em pH 4,8 (Labhsetwar & Soltanpour,1985) é uma solução ácida constituída de moléculas com capacidade complexante. De forma semelhante à extração pelo extrator Texas, o EDTA promove a dessorção do P pelo decréscimo da atividade do Fe devido à formação de complexos Fe-EDTA.

2.2.1.4 Soluções alcalinas tamponadas com a presença ou não de agentes complexantes

a) Extrator Olsen:

No método descrito por Olsen et al. (1954), a OH⁻ e o CO₃²⁻ do NaHCO₃ diminuem a atividade de Ca⁺² e Al⁺³, resultando no acréscimo da solubilidade de P no solo. O extrator é utilizável tanto para solos calcários quanto para solos ácidos. Em solos calcários, o incremento da solubilidade do complexo Ca-P resulta do decréscimo da atividade de Ca pela alta concentração de CO₃²⁻ e a precipitação de CaCO₃. Em solos ácidos ou neutros a solubilidade de fosfatos de Al e fosfatos de Fe aumenta quando altas concentrações de OH⁻ diminuem as atividades de Al⁺³ pela formação do complexo aluminato e de Fe⁺³ pela precipitação como óxi-hidróxidos de Fe. O aumento das cargas negativas de superfície e/ou o número diminuído de sítios de sorção nas superfícies dos óxidos de Fe e Al em altos valores de pH também pode ser responsável pela dessorção do P sorvido (Kuo, 1996).

b) Extrator NaOH:

Este extrator é utilizado em algumas etapas das técnicas de fracionamento descritas por Chang & Jackson (1957) e Heddley et al.

(1982). O princípio de extração é semelhante ao descrito para o método de Olsen, porém com extração preferencial do P ligado ao Fe.

c) Extrator Oxalato:

A solução extratora consiste de oxalato de amônio $((\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O})$ $0,2 \text{ mol l}^{-1}$ + $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ $0,2 \text{ mol l}^{-1}$ (Shahandeh et al., 1994). Este método foi desenvolvido especificamente para prever a disponibilidade de P para a cultura do arroz em solo alagado. A adição do oxalato à alíquota de solo dissolve seletivamente os óxidos de Fe pouco cristalinos ou amorfos, os quais predominam em condições sazonalmente alagadas, liberando, teoricamente, uma quantidade de P que melhor se correlacionaria com as quantidades de P absorvidas pelas plantas de arroz.

2.2.1.5 Resina trocadora de ânions ou tiras de papel filtro impregnadas com óxidos de Fe

a) Resina trocadora de ânions em lâminas

A resina trocadora de ânions (RTA) foi proposta inicialmente por Amer et al. (1955) e consiste basicamente de uma rede tridimensional de cadeias de hidrocarbonetos com grupos funcionais que apresentam cargas elétricas que adsorvem o P da solução e promovem a dessorção do P da fase sólida para o restabelecimento do equilíbrio químico com a solução. A RTA é saturada com o ânion bicarbonato (HCO_3^-) antes do seu uso e desta forma, durante o processo de extração ocorre a “troca” deste ânion pelo H_2PO_4^- do solo. A RTA em suspensão aquosa com solos simula as raízes das plantas pela remoção do P dissolvido na solução do solo (Silva & Raij, 1999). A taxa de adsorção de P é controlada pela difusão, a qual é uma função da concentração de P na solução e outros fatores como temperatura, etc. A resina mantém a concentração de P na solução em um nível baixo facilitando a dessorção contínua do solo. A quantidade e taxa de adsorção de P pela resina corresponde à quantidade e a taxa de

dessorção do solo (Amer et al., 1955).

b) Resina trocadora de ânions em esferas

Esta resina consiste em esferas com 2 mm de diâmetro e o princípio de extração deste método é semelhante ao da resina em lâminas (Miola, 1995), sendo que a diferença consiste no material trocador. Segundo Silva & Rajj (1999), estas esferas formam um sistema poroso devido a um arranjo matricial das cadeias de poliestireno e, em função da presença de grupos funcionais nessas cadeias, o material comporta-se como base forte, estando dissociado em qualquer valor de pH. A reação é de equilíbrio, sendo que há a transferência do H_2PO_4^- da solução para a resina em função da alta capacidade de troca de ânions da resina.

c) Papel filtro impregnado com óxidos de ferro

Esta metodologia consiste em impregnar filtros de papel com óxidos de Fe amorfo, proporcionando sítios para adsorção específica (troca de ligantes) de P da solução do solo. Em presença de uma quantidade suficiente de óxido de Fe impregnado, a concentração de P na solução pode permanecer baixa para facilitar a dessorção contínua de P do solo (Van der Zee et al., 1987). A quantidade de P sorvido no papel impregnado com o óxido de Fe depois de um certo período de tempo é utilizado como um índice de disponibilidade de P em solos. Menon et al., (1988) encontraram boas correlações com a absorção de P por várias espécies de plantas em condições de casa de vegetação. No entanto, este método é de difícil aplicação prática em laboratórios de rotina pela demanda de mão-de-obra para o preparo das tiras de papel e a obtenção de tiras uniformes com boa capacidade de remoção de P da solução (Van der Zee et al., 1987).

2.2.1.6 Troca isotópica com ^{32}P (valor L e E)

A técnica de diluição isotópica com ^{32}P tem sido usada desde a década de 40 para a análise do fósforo no solo (Larsen, 1967). Ela permite estimar o compartimento de P- lábil, o qual inclui ^{31}P adsorvido fracamente e a quantidade de ^{31}P em solução. A determinação do fósforo isotopicamente trocável consiste na adição de moléculas de fósforo marcado ($^{32}\text{PO}_4^{-3}$) ao solo e acompanhamento do seu desaparecimento da solução, já que este é passível de troca com o fósforo lábil da fase sólida (Fardeau & Jappe, 1976). Esta é uma técnica não agressiva aos colóides do solo e permite a obtenção dos valores E e L. O valor E é a medida da quantidade de um nutriente na superfície e na solução do solo que é trocável com um íon quimicamente idêntico (^{32}P), adicionado na solução (McAuliffe et al., 1948). Já o valor L é a quantidade de P no solo e na solução do solo, que é trocável com o íon quimicamente idêntico adicionado ao solo (^{32}P), medida através da absorção do mesmo nutriente pela planta. O método da troca isotópica não tem aplicação prática em laboratórios de rotina em função da complexidade da técnica envolvendo o uso de isótopos radioativos, que exige medidas excepcionais de segurança, além de um longo tempo para a análise, sendo útil apenas no entendimento da dinâmica do P no solo (Silva & Raij, 1999). Além disso, essa técnica tem se mostrada inadequada para solos com altas capacidades de sorção de P e baixas concentrações de P na solução (Kuo, 1996; Gatiboni, 2003).

2.2.1.7 P-remanescente

O P-remanescente é a concentração de P na solução de equilíbrio após 1h de agitação do solo com a solução extratora de CaCl_2 0,001 mol l^{-1} em 60 mg L^{-1} P. Os valores obtidos apresentam estreita correlação com a capacidade tampão (CT) e com a capacidade máxima de adsorção de

fosfatos (CMAP). Permite estimar o nível crítico de P disponível e a declividade do P disponível em função do nutriente adicionado ao solo, os quais são dependentes da capacidade tampão do solo (característica intrínseca de cada solo). Então, a estimativa simples e rápida da capacidade tampão de cada solo pelo P-remanescente permite estratificar com maior segurança a interpretação das análises de solos e recomendações de adubação (Novais & Smith, 1999).

2.2.2 Avaliação da disponibilidade de fósforo em solos de várzea

Informações acerca das características dos solos de várzea do RS que controlam quantitativamente e qualitativamente o processo de adsorção de P e a sua liberação com o alagamento ainda são limitadas. Como implicação prática existem problemas na avaliação da disponibilidade de P e recomendação da adubação fosfatada para o arroz irrigado. Vários métodos de extração química de fósforo, que podem ser utilizados para avaliar sua disponibilidade e recomendar adubação fosfatada para culturas de sequeiro, geralmente apresentam baixa eficiência em solos de várzea (Patrick Jr. & Mahapatra, 1968; Chang, 1978). Assim, as relações entre teor de P no solo extraído por um determinado método e os rendimentos relativos obtidos para solos de sequeiro têm pouca aplicabilidade quando este solo é utilizado para o cultivo de arroz sob alagamento (Patrick Jr. & Mahapatra, 1968; Chang, 1978). O principal motivo para este comportamento é o fato que a extração do P em amostras de solo seco não prevê as alterações na quantidade de fósforo disponível com os processos de redução do solo proporcionada pelo alagamento, cuja intensidade varia de solo para solo.

Este parece ser o caso do método Mehlich-1, atualmente empregado para avaliar a disponibilidade de fósforo para as culturas nos Estados do RS e SC. Segundo Grande et al. (1986), este método realiza

a extração em valores de pH muito baixo (aproximadamente 2,5), ambiente desfavorável para estimar as frações de fósforo disponibilizadas com o alagamento do solo. Este comportamento também estaria relacionado ao fato de que os extratores ácidos dissolvem predominantemente P-Ca e P-Al e a liberação do fósforo ligado ao ferro (P-Fe) é o processo que predominaria com o alagamento do solo (Patrick Jr. & Mahapatra, 1968). Considerando as diferenças entre solos e sua influência sobre as formas e disponibilidade de P, problemas na estimativa da disponibilidade de P em solos de várzea do RS também são reflexo da interpretação dos teores extraídos pelo método (Mehlich-1), já que todos os tipos de solos em que há cultivo de arroz irrigado por alagamento são classificados como Classe 5 no Sistema de Recomendações de Adubação e de Calagem para os Estados do RS e de SC (CQFS-RS/SC, 2004). Tal procedimento significa considerar a mesma interpretação para o teor de fósforo na análise de solo e a mesma resposta a adubação fosfatada para todos os tipos de solos (Anghinoni & Volkweiss, 1995; CQFS-RS/SC, 2004).

Outro fator a ser considerado é que a distribuição e a disponibilidade das diferentes formas de P é alterada em solos sazonalmente alagados. Entre as diversas frações, o P solúvel em agentes redutores fortes (ou P-ocluso) parece ter importância significativa nestes ambientes. Nesta fração, tem-se o revestimento das partículas de argila e silte por óxidos férricos hidratados e oclusão de várias formas de P, as quais, se estivessem em contato com a solução do solo, estariam disponíveis para as culturas. Este fósforo é chamado de P-ocluso pela exigência em agentes redutores fortes para a solubilização deste revestimento e liberação do P. Acredita-se que frações como o Fe-P, o qual divide com o Al-P a importância na adsorção de P em condições de sequeiro, apresentem maiores contribuições no fornecimento de P após o alagamento dos solos cultivados com arroz irrigado, em função da conversão de parte o P-ocluso até Fe-P. A dinâmica desta fração é,

possivelmente, responsável por muitas das diferenças entre solos de sequeiro e solos alagados quanto à resposta ao fertilizante fosfatado adicionado. Como resultado do processo de redução, haveria a liberação do P contido nesta fração através da redução dos óxidos férricos a hidróxidos ferrosos mais solúveis, aumentando a disponibilidade de P para as plantas arroz (Patrick & Mahapatra, 1968).

A estimativa da disponibilidade de P em solos de várzea provavelmente seria melhorada com o desenvolvimento de metodologia que considerasse as características dos solos que determinam a intensidade dos processos que ocorrem com o fósforo e suas frações durante o alagamento e aqueles que afetam a nutrição das plantas. A obtenção de parâmetros como a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) e a energia de ligação do fósforo com a fase sólida e a sua correlação com as demais características intrínsecas de cada um dos diferentes solos de várzea (teor de argila, MO, teor e grau de cristalinidade dos óxidos de Fe) podem fornecer informações interessantes sobre o caráter dreno de P (ou equilíbrio sorção/dessorção) destes solos. O conhecimento das formas de P inorgânico predominante nos solos de várzea do RS também seria uma importante ferramenta para o desenvolvimento de metodologias de extração de P que dissolvessem as mesmas formas de P que são disponíveis ao arroz após o alagamento. Possivelmente, a utilização desses parâmetros na escolha do método (princípio de extração) e/ou inclusão na interpretação dos teores extraídos podem fornecer bons resultados para o aperfeiçoamento da recomendação de adubação fosfatada para o arroz irrigado.

Dessa forma, a separação dos solos em grupos com características que estão relacionadas à adsorção de P (Novais & Smith, 1999) e com as reações de oxi-redução de solos alagados, as quais afetam a disponibilidade de fósforo, como teor de argila, de matéria orgânica e de fósforo total (Grande et al. 1986), também poderiam ser utilizadas como alternativa para aprimorar a eficiência do método Mehlich-

1, produzindo-se diferentes valores de nível crítico para cada grupo de solos. Assim, mesmo que o princípio de extração do método não seja o mais adequado, poderíamos obter boas correlações com os teores absorvidos pelas plantas de arroz. Essa é uma estratégia adotada para a interpretação dos teores extraídos por Mehlich-1 em solos de sequeiro do RS e permitiu a obtenção de uma boa estimativa do P-disponível às culturas nesses solos.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi composto por um experimento instalado e conduzido na casa de vegetação do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no município de Santa Maria, localizado na região fisiográfica da Depressão Central do Rio Grande do Sul, com amostras de solo de diferentes regiões fisiográficas do Estado do Rio Grande do Sul representativas de áreas de produção de arroz do Estado. As coordenadas geográficas do local do experimento (UFSM) são 29°45' de latitude Sul e 53°42' de longitude Oeste (Brasil, 1973). As análises laboratoriais do experimento foram realizadas no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo do Departamento de Solos da UFSM, Santa Maria - RS

3.1 Coleta e preparo dos solos

Foram coletadas 16 amostras de solos de várzea representativas da cadeia produtiva orizícola do RS (Figura 1), com ampla faixa de variação de características químicas e físicas (Tabela 1) e que apresentaram, em sua maioria, teores médios e baixos de fósforo disponível extraído pelo método Mehlich-1, considerando o sistema de recomendação para o arroz irrigado em vigor atualmente. As amostragens contemplaram um total de 14 municípios: Camaquã, Torres, Dom Pedrito, Uruguaiana, Caçapava do Sul, Santo Antônio da Patrulha, Santa Maria, São Gabriel, Cachoeirinha, Restinga Seca, Cachoeira do Sul, Santa Vitória do Palmar, Rosário do Sul e Paraíso do Sul. No apêndice 01 é apresentada uma aproximação da classificação dos solos objetos de estudo, utilizando-se a correlação entre os locais de coleta e os mapas de Brasil (1973) e a caracterização de Streck et al. (2002). Tendo em vista a semelhança entre algumas classificações, na discussão do presente

trabalho foi utilizada a denominação dos solos pelo município onde foram coletados.

Cada uma das 16 amostras constituiu-se de aproximadamente 150 kg de solo da camada superficial (0-20 cm). Após a coleta (Anexo 1a), as amostras de solo foram secas ao ar (Anexo 1b), moídas em moedor específico para solo e tamisadas em peneira malha 2 mm. Uma sub amostra de cada solo assim preparado foi reservada para posteriores análises físicas e químicas, conforme metodologias descritas por Tedesco et al. (1995). Também foram determinadas as frações de óxidos de Fe extraídas quimicamente por Ditionito-Citrato-Bicarbonato (DCB) e oxalato (Almeida – comunicação pessoal, 2002). Para uniformizar o pH dos solos, aplicou-se calcário dolomítico (PRNT 75%) nas quantidades equivalentes para elevar o pH dos solos a 5,5, baseado nas recomendações da CFS-RS/SC (1995) e estimado pelo índice SMP de cada amostra. Após a aplicação do calcário, dividiu-se o volume de solo coletado em cada local em sacos plásticos contendo 4 kg de solo e as amostras foram umedecidas utilizando-se água destilada (sem saturar o solo) facilitando a reação de dissolução do calcário. Estes sacos foram mantidos fechados e sofreram um processo de incubação na casa de vegetação do Departamento de Solos (Anexo 1c) durante um período de 35 dias (29/11/03 a 03/01/04). Semanalmente os sacos foram abertos e o solo revolvido para repor a umidade e promover as trocas gasosas no intuito de melhorar a reação de dissolução do calcário (Anexo 1d). Para cada local de coleta, preparou-se um total de 10 sacos contendo solo, dos quais 9 foram destinados para a montagem dos vasos do experimento com cultivo de plantas e um foi destinado para análises laboratoriais pós-incubação com corretivo da acidez.

Tabela 1 Atributos físicos e químicos das 16 amostras de solo originais na camada de 0-20 cm

Solo	P	K	Argila	Silte	Areia	M.O.	pH-H ₂ O	Índice SMP	Al	Ca	Mg
	-----mg kg ⁻¹ ----		-----g kg ⁻¹ -----			%			-----cmol _c kg ⁻¹ -----		
Camaquã	13,8	116,7	804	152	44	7,0	4,9	4,7	1,7	12,3	5,8
Torres	3,5	45,3	680	273	47	8,0	4,7	4,7	1,6	10,6	6,8
Dom Pedrito	2,3	102,0	439	486	75	1,9	5,0	5,4	0,5	15,2	6,2
Uruguaiana 01	2,1	92,0	370	374	256	5,5	5,7	5,7	0,1	20,8	9,3
Uruguaiana 02	1,0	186,0	330	570	100	3,6	5,2	5,5	0,0	17,3	6,7
Caçapava do Sul	3,6	64,7	320	500	180	2,9	5,8	6,1	0,1	15,1	6,2
Santo Ant. da Patrulha	8,0	71,3	225	226	548	2,3	4,7	5,4	1,2	3,3	2,1
Santa Maria	8,0	46,7	240	379	380	1,9	4,3	4,9	2,0	4,4	2,6
São Gabriel	1,3	43,3	245	528	227	2,6	4,7	5,3	1,1	7,3	3,3
Cachoeirinha	5,1	43,3	200	437	363	2,2	4,6	5,4	1,3	1,8	1,2
Restinga Seca	3,0	132,0	187	301	512	1,6	4,6	5,0	2,6	0,6	0,6
Cachoeira do Sul 01	4,4	57,3	175	308	517	1,3	5,6	6,4	0,0	3,5	2,1
Cachoeira do Sul 02	7,1	64,7	128	462	409	1,0	4,7	6,1	0,5	2,2	1,5
Santa Vit. do Palmar	3,7	33,3	123	160	711	1,9	5,3	6,3	0,4	2,2	1,8
Rosário do Sul	13,6	34,0	83	157	744	1,2	4,7	6,0	1,0	0,8	0,7
Paraíso do Sul	8,9	49,3	88	175	739	1,4	5,2	5,8	0,4	1,1	1,0



Figura 1 Mapa do RS representando materiais de origem dos solos e locais de coleta das amostras (Adaptado de Sousa, 2004).

3.2 Aplicação dos tratamentos

Em 03/01/04, ao término do período de incubação com calcário, transferiu-se o solo contido nos sacos plásticos para baldes plásticos com capacidade de 8 L (Anexo 2a). Neste momento, realizou-se a aplicação dos tratamentos que consistiram em 3 níveis de P para cada um dos solos coletados nos 16 locais. Os tratamentos foram estruturados em um fatorial 16x3 (16 solos, 3 níveis de P) e os vasos dispostos em delineamento inteiramente casualizado com três repetições por tratamento, totalizando 144 unidades experimentais. As unidades experimentais, nesta etapa, consistiram de amostras de 4 kg de solo acondicionados nos baldes plásticos.

A fonte de P utilizada para a obtenção dos níveis de P foi o fosfato de potássio monobásico (KH_2PO_4) e a sua aplicação deu-se logo após a transferência do solo para os baldes. No intuito de facilitar a manipulação das pequenas quantidades de P aplicadas em cada balde, diluiu-se as respectivas quantidades de KH_2PO_4 em água destilada e, com o auxílio da adição de mais água destilada até a saturação do solo, foi distribuído o P na massa de solo,

Os níveis de P foram estabelecidos com base na Capacidade Máxima de Adsorção de P (CMAP), seguindo a metodologia informada por Gatiboni (2003, comunicação pessoal). As amostras de cada solo foram colocadas em contato com níveis crescentes de P (0, 50, 100, 200, 300, 600, 900 e 1800 mg kg^{-1} de P) durante 16 horas. Após este período, determinou-se o P na solução, possibilitando o cálculo da CMAP pela diferença entre os teores adicionados e os restantes após as 16 horas de contato.

Os dados de P-sorvido e P-solução foram aplicados na equação de Langmuir: $P_{\text{SORVIDO}} = (a * b * P_{\text{SOLUÇÃO}}) / (1 + a * P_{\text{SOLUÇÃO}})$, onde:

$P_{SORVIDO}$ = quantidade de fósforo sorvido, em mg kg^{-1} ;

$P_{SOLUÇÃO}$ = quantidade de fósforo na solução do solo, em mg L^{-1} ;

a = constante relacionada a energia de adsorção de P pelo solo, em L mg^{-1} ; e

b = capacidade máxima de adsorção de P, em mg kg^{-1} .

Para a obtenção dos valores de a e b utilizou-se o programa estatístico SAS.

Considerando os parâmetros a e b variáveis de acordo com o solo e o valor de $P_{SOLUÇÃO}$ fixado em $0,2 \text{ mg L}^{-1}$, foram calculadas as quantidades de P adicionado em cada nível para cada solo, da seguinte forma:

- N_0 (sem aplicação de P);
- N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2);
- N_2 ($0,2 \text{ mg L}^{-1}$ de P na solução do solo).

O estabelecimento do N_2 em $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ apoiou-se em dados de Novais & Smyth (1999) que apontam este valor de P na solução como um teor suficiente para o crescimento satisfatório das culturas. Como os parâmetros a e b dos solos em estudo tem uma ampla diversidade, o estabelecimento de um valor fixo de P na solução para todos os 16 solos resultou na aplicação de diferentes quantidades de P para cada nível, conforme apresentado na tabela 2.

Considerando-se o fato de que a fonte de P utilizada no estudo (KH_2PO_4) contém K em sua molécula e que a aplicação de diferentes doses de P utilizando-se esta fonte implica automaticamente na adição de diferentes doses de K, utilizou-se cloreto de potássio (KCl) nos tratamentos que receberam menos ou não receberam K, igualando-os com o solo que recebeu a maior quantidade de P.

Tabela 2 Doses de P_2O_5 aplicadas para obtenção dos níveis de P dos solos em estudo com base na manutenção de um teor de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ na solução do solo.

Solos	Doses de P_2O_5 aplicadas		
	N_0	N_1	N_2
	----- mg kg^{-1} solo-----		
Camaquã	0	35,4	70,8
Torres	0	75,0	149,9
Dom Pedrito	0	16,1	32,2
Uruguaiana - 1	0	16,8	33,6
Uruguaiana - 2	0	12,8	25,6
Caçapava do Sul	0	13,9	27,8
Santo Antônio da Patrulha	0	18,2	36,4
Santa Maria	0	18,7	37,4
São Gabriel	0	11,1	22,3
Cachoeirinha	0	7,8	15,5
Restinga Seca	0	31,9	63,7
Cachoeira do Sul - 1	0	8,1	16,2
Cachoeira do Sul - 2	0	4,9	9,8
Santa Vitória do Palmar	0	3,0	5,9
Rosário do Sul	0	3,6	7,2
Paraíso do Sul	0	5,9	11,9

3.3 Condução do experimento

Logo após a transferência do solo para os baldes e a aplicação dos tratamentos (conforme descrição do item 3.2), iniciou-se o cultivo do arroz na casa de vegetação. Utilizaram-se sementes da variedade IRGA 417, as quais foram pré-germinadas durante um período de 5 dias em bandejas com papel toalha sob alta umidade e temperatura na faixa de 20-25°C. No dia 03/01/04 foram transplantadas 8 plântulas para cada vaso (Anexo 2b) e, quatro dias após o transplante, realizou-se a aplicação de uma lâmina de água de aproximadamente 5cm (Anexo 2d), a qual foi mantida constante durante o período de cultivo através de irrigações diárias utilizando-se água destilada.

Nove dias após o transplante realizou-se um desbaste para a manutenção de uma população de 6 plantas por vaso. Neste dia aplicou-se a primeira dose de N em cobertura que foi equivalente a 17 mg de N kg⁻¹ solo na forma de uréia. Para facilitar a aplicação nos vasos, em função das pequenas quantidades, diluiu-se a uréia em água destilada e aplicou-se esta solução com uma seringa calibrada. Realizaram-se mais 3 aplicações de N em cobertura (24/01/04, 09/02/04 e 12/02/04), com a mesma dosagem de N, totalizando uma aplicação de 68 mg de N kg⁻¹ solo durante o período de cultivo. Realizou-se também a aplicação de micronutrientes no intuito de garantir uma nutrição adequada para o arroz. A aplicação dos micronutrientes foi realizada no dia 17/01/04 da mesma forma como a aplicação da uréia, e as fontes e doses aplicadas foram: ácido bórico (4 mg kg⁻¹ solo), sulfato de cobre (3 mg kg⁻¹ solo), cloreto de zinco (1 mg kg⁻¹ solo) e molibdato de amônio (0,15 mg kg⁻¹ solo).

Cultivou-se o arroz até 17/02/04, totalizando 45 dias após o transplante (Anexo 3), quando se colheu a parte aérea das plantas através do corte rente ao solo (Anexo 4). Imediatamente após o corte, pesou-se a massa verde da parte aérea das plantas com balança de precisão (0,01g),

levou-se o material vegetal para estufa a 60°C com ventilação forçada, onde permaneceu durante dias até peso constante. Determinou-se a matéria seca através de pesagem do material com balança de precisão (0,01g) e, posteriormente, realizou-se a moagem do material em moinho tipo Willey, já preparando o material para as análises laboratoriais.

3.4 Análises laboratoriais

3.4.1 Análises químicas e físicas de solo

Utilizou-se uma alíquota de cada solo original, moída e tamisada a 2 mm, para análises físicas e químicas de caracterização dos solos em estudo. Caracterizou-se o solo quanto ao pH-H₂O, índice SMP, Ca, Mg e Al trocáveis e P e K disponíveis, seguindo-se a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Além disso, determinou-se o carbono orgânico por digestão úmida (EMBRAPA, 1997), textura pelo método da pipeta (EMBRAPA, 1997) e fósforo total por Sommers e Nelson (1972). Após a incubação dos solos com calcário, retirou-se uma alíquota de cada solo para as análises quanto ao pH-H₂O, Al, Ca, Mg, K e P, seguindo-se a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

3.4.2 Fracionamento químico do fósforo inorgânico do solo

O fracionamento químico do fósforo inorgânico do solo foi realizado em amostras de solo corrigidas com calcário, secas, moídas e tamisadas a 1 mm. Utilizaram-se amostras de dois níveis de P: N₀ (sem aplicação de P) e N₂ (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) para cada um dos 16 solos (item 3.2). Uma alíquota de 200g de cada solo foi acondicionada em potes plásticos com capacidade de 0,5 L e adicionou-se água destilada (~300 mL) até a

obtenção de uma lâmina de aproximadamente 4 cm no intuito de manter o ambiente anaeróbico. Estas amostras permaneceram alagadas durante 30 dias em temperatura constante de $30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Os tratamentos ficaram estruturados em um fatorial 16×2 (16 solos, 2 níveis de P) e os potes dispostos em um delineamento inteiramente casualizado com três repetições por tratamento, totalizando 96 unidades experimentais. Aos 30 dias após o alagamento drenou-se o solo dos potes com o auxílio de um sifão e coletou-se em cada pote um cilindro de solo através de um dispositivo que se constituiu de uma seringa plástica descartável com a extremidade cortada. Estes cilindros de solo saturado foram pesados e secos em estufa a 105°C até peso constante. Então, conhecendo-se a umidade de cada solo, coletou-se outro conjunto de cilindros de solo conforme metodologia acima e pesou-se uma quantidade de solo correspondente a 0,2g de solo seco em tubos de centrífuga com capacidade para 15 mL.

Para o fracionamento químico do fósforo inorgânico do solo seguiu-se a metodologia descrita por Kuo (1996) com algumas adaptações (Figura 2). Amostras de 0,2g de solo seco e solo após 30 dias de alagamento equivalentes a 0,2g de solo seco sofreram extração, seqüencialmente, com NH_4Cl 1 mol l^{-1} ; NH_4F $0,5 \text{ mol l}^{-1}$ pH 8,2; NaOH $0,1 \text{ mol l}^{-1}$; DCB a 85°C e H_2SO_4 $0,25 \text{ mol l}^{-1}$. A primeira extração remove o P solúvel e fracamente adsorvido. Na etapa seguinte o fracionamento utiliza a habilidade complexadora do F^{-} contido no NH_4F para separar as formas Al-P e Fe-P, seguida da remoção do Fe-P com NaOH e do P-ocluso por DCB. O Ca-P, o qual é insolúvel em DCB, é extraído com H_2SO_4 . O fósforo inorgânico dos extratos alcalinos de NaOH foi determinado pelo método de Dick & Tabatabai (1977). O P dos demais extratos foi determinado segundo a metodologia de Murphy & Riley (1962).

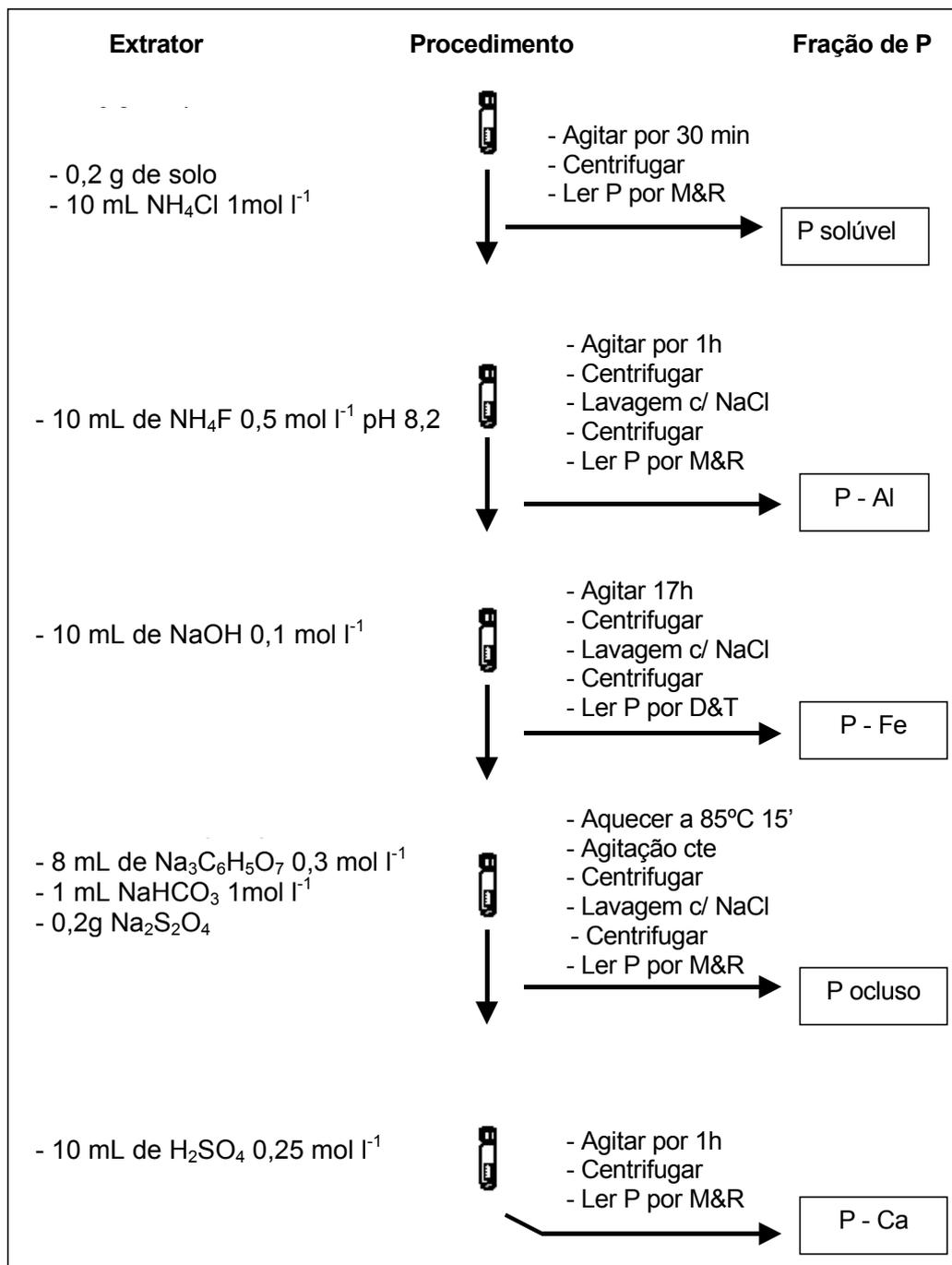


Figura 02 Esquema da técnica do fracionamento do fósforo inorgânico do solo adaptado de Kuo (1996).

Nota: M&R = Murphy & Riley
D&T = Dick & Tabatabai

3.4.3 Metodologias de estimativa de fósforo disponível

Extraíu-se o P dos solos utilizados no cultivo do arroz irrigado por diversas metodologias, buscando-se a mais adequada para a estimativa do P disponível ao arroz em solo alagado. Foram realizadas extrações com os métodos: Mehlich-1 (Mehlich, 1953), Mehlich-2 (Mehlich, 1978), Mehlich-3 (Mehlich, 1984), Resina em lâminas (Gatiboni, 2003), Bray-1 (Bray & Kurtz, 1945), Bray-2 (Bray & Kurtz, 1945), Olsen (Tran et al., 1990), Morgan (Baker & Hall, 1967), Lactato de Ca (Steffens, 1994), Texas (Sharpley et al., 1987), Oxalato (Shahandeh et al., 1994), EDTA (Labhsetwar & Soltanpour, 1985), H₂SO₄ (Catani & Gargantini, 1954), P-Remanescente (Novais & Smith, 1999) e NaOH (Chang & Jackson, 1957) (Apêndices 2 a 19). Quando necessário, fizeram-se ajustes nas quantidades de solo preconizadas pela literatura, mantendo-se as devidas proporções com a solução extratora, no intuito de uniformizar e facilitar algumas etapas do processo de extração. A tabela 3 contém um resumo da composição química dos extratores e procedimentos utilizados na extração do P disponível por estas metodologias.

Durante o processo de extração utilizaram-se tubos de centrífuga com capacidade para 15 mL para acomodar o solo + solução extratora, observando para que a quantidade de solução extratora não ultrapassasse 10 mL, facilitando assim a agitação mecânica. Com o objetivo de obter um extrato limpo após o processo de extração, realizou-se decantação por 16 h com centrifugação a 2500 rpm por 5 min para Mehlich-1, Mehlich-2, Mehlich-3, Bray-1, Bray-2, Morgan, Lactato de Ca, Texas, EDTA, H₂SO₄. Para os demais extratores realizou-se apenas a centrifugação a 2500 rpm por 5 min, quando ela se fez necessária. O fósforo inorgânico dos extratos alcalinos, como aqueles obtidos por Olsen e NaOH, foi determinado pelo método de Dick & Tabatabai (1977). O fósforo dos demais extratos foi determinado segundo a metodologia de Murphy & Riley (1962).

As quantidades de P recuperadas para o conjunto de solos foram calculadas pela seguinte fórmula:

$$P \text{ recuperado} = \left[\frac{P \text{ extraído no N2} - P \text{ extraído no N0}}{P \text{ adicionado N2}} * 100 \right]$$

3.4.4 Análises de tecido vegetal

Determinou-se os teores de P na matéria seca após digestão ácida seguindo a metodologia descrita por Tedesco et al., (1995). As quantidades deste elemento acumuladas na parte aéreas das plantas foram calculadas a partir das quantidades de matéria seca produzida por vaso e os respectivos teores na matéria seca.

3.4.5 Estudos de correlações

A eficiência dos extratores foi avaliada através da análise de correlação linear simples de Pearson, empregando-se a quantidade total de fósforo absorvida pelo arroz e os teores de fósforo extraídos pelos diferentes métodos testados. Foram consideradas correlações com níveis de significância maiores que 99% ($\alpha < 0,01$) e o programa estatístico utilizado foi o SAS.

Tabela 3 Resumo da composição química dos extratores e procedimento de extração do P disponível por diferentes métodos.

Método	Solução extratora ou processo	Relação ¹	Tempo ²	Referência
Mehlich-1	H ₂ SO ₄ 0,0125 mol l ⁻¹ + HCl 0,05 mol l ⁻¹	1:10	5 min	Mehlich (1953)
Mehlich-2	NH ₄ Cl 0,2 mol l ⁻¹ + CH ₃ COOH 0,2 mol l ⁻¹ + NH ₄ F 0,015 mol l ⁻¹ + HCl 0,012 mol l ⁻¹	1:10	5 min	Mehlich (1978)
Mehlich-3	NH ₄ F 0,015 mol l ⁻¹ + NH ₄ NO ₃ 0,25 mol l ⁻¹ + CH ₃ COOH 0,2 mol l ⁻¹ + HNO ₃ 0,013 mol l ⁻¹ + EDTA 0,001 mol l ⁻¹	1:10	5 min	Mehlich (1984)
Resina Lâminas	Adsorção de P pela RTA saturada com bicarbonato	1:20	16h	Gatiboni (2003)
Bray-1	HCl 0,025 mol l ⁻¹ e NH ₄ F 0,03 mol l ⁻¹	1:7	1 min	Bray & Kurtz (1945)
Bray-2	HCl 0,1 mol l ⁻¹ e NH ₄ F 0,03 mol l ⁻¹	1:7	40 s	Bray & Kurtz (1945)
Olsen	NaHCO ₃ 0,5 mol l ⁻¹ a pH 8,5	1:20	30 min	Tran et al. (1990)
Morgan	NaC ₂ H ₂ O ₂ 0,735 mol l ⁻¹ + CH ₃ COOH 0,5 mol l ⁻¹ a pH 4,8	1:5	30 min	Baker & Hall (1967)
Lactato de Ca	Lactato de Ca 0,02 mol l ⁻¹ + HCl 0,02 mol l ⁻¹ a pH 3,7	1:50	90 min	Steffens (1994)
Texas	NH ₄ Ac 1,43 mol l ⁻¹ (pH 4,2) + EDTA 0,025 mol l ⁻¹	1:10	30 min	Sharpley et al. (1987)
Oxalato	(NH ₄) ₂ C ₂ O ₄ .H ₂ O 0,2 mol l ⁻¹ + H ₂ C ₂ O ₄ 0,2 mol l ⁻¹	1:40	4h	Shahandeh et al. (1994)
EDTA	Na ₂ -EDTA 0,02 mol l ⁻¹ pH 4,8	1:25	60 min	Labhsetwar & Soltanpour (1985)
H ₂ SO ₄	H ₂ SO ₄ 0,025 mol l ⁻¹	1:25	15 min	Catani & Gargantini (1954)
P-remanescente	CaCl ₂ 0,001 mol l ⁻¹ em 60 mg L ⁻¹ P	1:10	1h	Novais & Smith (1999)
NaOH	NaOH 0,1 mol l ⁻¹	1:50	17h	Chang & Jackson (1957)

¹ Massa de solo : volume de solução ²Corresponde ao tempo de agitação, o qual foi seguido de período de decantação e/ou centrifugação, em função da metodologia, para a obtenção de extrato limpo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Adsorção de fósforo nos solos de várzea do RS

A CMAP foi estimada a partir das isotermas de adsorção de P de cada solo em estudo (Anexos 7 e 8). Observa-se nos anexos 7 e 8 que as isotermas de adsorção de P 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). Houve uma ampla variação na CMAP dos solos em estudo (Tabela 4). Em alguns casos, a magnitude da variação entre solos foi superior a 10 vezes (solos dos municípios de Camaquã e Rosário do Sul, por exemplo). Ferreira & Magalhães (1974), estudando a adsorção de fósforo em solos do RS, testaram a aplicabilidade da isoterma de Langmuir na descrição da adsorção de fósforo no solo. Em 12 solos do Estado, contemplando solos bem drenados que predominam na metade Norte e solos de várzea, predominantes na metade Sul, os autores verificaram uma ampla variação na CMAP, também superior a 10 vezes entre solos que apresentaram valores extremos. Estas diferenças devem estar associadas com a variável distribuição de materiais de origem dos solos do RS, aliado a ação dos agentes intemperizantes ao longo do tempo, originando solos com características físicas e químicas diversas e, naturalmente, possuindo colóides que interagem diferentemente com os diversos elementos químicos e dentre eles, o fósforo.

Os demais parâmetros de solo avaliados também apresentaram uma ampla variação. A energia de ligação (parâmetro a da equação de Langmuir) mostrou-se bastante variável quando comparamos os diferentes solos em estudo. Bahia Filho et al. (1982), afirmam que a variação na energia de ligação deve estar relacionada ao histórico de fertilizações dos solos, ou seja, à medida que se vai enriquecendo o solo com P, como consequência das fertilizações, o solo se aproxima

gradualmente do seu caráter fonte de P e a energia de ligação diminui gradualmente, tendendo para zero. Estas variações também podem estar associadas com os fatores que determinaram a ampla variação na CMAP destes solos, como os teores de argila e óxidos de ferro.

As diferenças de matéria orgânica (M.O.) e, especialmente, as diferenças texturais, a qual é pouco variável em função da atividade humana, são bons indicativos de que estes solos se desenvolveram em ambientes bastante distintos. Se considerarmos as características texturais dos solos em estudo, observa-se que o teor de argila variou de 83 g kg⁻¹ no solo de Rosário do Sul para 804 g kg⁻¹ no solo de Camaquã; o teor de silte variou de 152 g kg⁻¹ no solo de Camaquã para 528 g kg⁻¹ no solo de São Gabriel; e o teor de areia variou de 44 g kg⁻¹ no solo de Camaquã para 744 g kg⁻¹ no solo de Rosário do Sul. Já o teor de M.O. variou de 80 g kg⁻¹ no solo de Torres para 10 g kg⁻¹ no solo de Cachoeira do Sul-02. A coleta de solos com ampla variação nas características químicas e físicas é interessante quando se objetiva avaliar a eficiência de metodologias laboratoriais em prever a disponibilidade de P para uma determinada cultura em uma determinada região com grande diversidade de solos como o RS.

A diferente CMAP dos solos de várzea do RS se refletiram sobre a necessidade de P₂O₅ a aplicar para obtenção de um nível de P de 0,2 mg L⁻¹ na solução, considerado pela literatura como um teor de P suficiente para um desenvolvimento adequado da maioria das culturas (Novais & Smyth, 1999). A dose de P₂O₅ foi inferior a 20 kg ha⁻¹ para os solos menos ávidos por P e chegou a 300 kg ha⁻¹ no solo mais ávido (Tabela 5). Este aspecto também é visualizado quando observarmos a quantidade de P₂O₅ necessária para a elevação de uma unidade no teor de P disponível por Mehlich-1, onde o incremento de uma unidade na disponibilidade de P pôde ser dada pela aplicação de uma dose que variou de 2,2 a 48,1 kg de P₂O₅ mg⁻¹ de P extraído pelo método.

Tabela 4 Capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) e atributos químicos e físicos dos solos coletados nos 16 municípios do RS.

Municípios	CMAP (b)	Energia de Ligação (a)	Argila	M.O.	Fe extraível		Fe _o /Fe _d
					Fe _d	Fe _o	
	mg kg ⁻¹	L mg ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----				
Camaquã	933	0,171	804	70	10,4	8,5	0,82
Torres	696	0,519	680	80	13,2	9,7	0,74
Dom Pedrito	351	0,209	439	19	12,6	8,2	0,65
Uruguaiana - 01	630	0,119	370	55	34,2	11,8	0,35
Uruguaiana - 02	396	0,146	330	36	13,5	8,7	0,64
Caçapava do Sul	117	0,579	320	29	6,1	5,1	0,83
Santo Antônio da Patrulha	231	0,370	225	23	4,6	4,0	0,88
Santa Maria	347	0,247	240	19	7,6	6,1	0,80
São Gabriel	593	0,083	245	26	18,1	9,3	0,52
Cachoeirinha	252	0,138	200	22	3,9	3,4	0,86
Restinga Seca	494	0,299	187	16	10,2	3,8	0,37
Cachoeira do Sul - 01	220	0,166	175	14	8,8	4,9	0,55
Cachoeira do Sul - 02	140	0,158	129	10	2,9	2,6	0,89
Santa Vitória do Palmar	90	0,149	123	19	1,4	1,1	0,78
Rosário do Sul	71	0,230	83	12	1,1	0,6	0,60
Paraíso do Sul	236	0,112	88	14	3,1	1,8	0,58

Tabela 5 Fósforo aplicado para a obtenção de 0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo, P disponível antes e após aplicação do P, ΔP disponível e fator dreno (P aplicado para o acréscimo no P disponível) em solos de várzea do RS.

Solo	Atributos				
	P ₂ O ₅ aplicado ¹	P Mehlich-1 antes	P Mehlich-1 após	Fator dreno (P ₂ O ₅ aplicado/ P acréscido)	
	-----kg ha ⁻¹ -----	-----mg kg ⁻¹ -----		-----kg mg ⁻¹ -----	
Camaquã	142	13,8	24,2	10,4	13,6
Torres	300	3,5	11,2	7,7	39,0
Dom Pedrito	64	2,3	6,5	4,2	15,3
Uruguaiana - 01	67	2,1	3,5	1,4	48,1
Uruguaiana - 02	51	1,0	3,2	2,2	23,3
Caçapava do Sul	56	3,6	15,3	11,7	4,8
Santo Antônio da Patrulha	73	8,0	16,8	8,8	8,3
Santa Maria	75	8,0	18,3	10,3	7,3
São Gabriel	45	1,4	3,4	2,1	21,2
Cachoeirinha	31	5,1	12,3	7,2	4,3
Restinga Seca	127	3,0	13,7	10,7	11,9
Cachoeira do Sul -01	32	4,4	10,1	5,7	5,7
Cachoeira do Sul -02	20	7,1	13,2	6,1	3,2
Santa Vitória do Palmar	12	3,7	9,2	5,5	2,2
Rosário do Sul	14	13,6	18,7	5,1	2,8
Paraíso do Sul	24	8,9	13,2	4,3	5,5

¹ Considerou-se a camada de 0 a 20 cm e uma densidade do solo = 1g cm⁻³

Na tabela 6, verificam-se correlações significativas entre a CMAP e alguns atributos químicos e físicos dos solos estudados. A correlação positiva e significativa entre o teor de argila e a CMAP (0,81) demonstra a dependência do processo de adsorção de P e da dinâmica deste elemento com a presença de colóides no solo. Ou seja, a magnitude da sorção depende da quantidade de constituintes com capacidade de sorver moléculas de fosfato. Assim, mesmo em solos menos intemperizados, como os solos de várzea do RS, o aumento do teor de argila do solo proporciona um aumento do caráter dreno (adsorção) do P, embora de maneira muito menos expressiva do que em solos mais intemperizados como os solos do cerrado (Novais & Smith, 1999). Provavelmente, com o aumento do teor de argila em solos pouco intemperizados, pouco se perde com o aumento caráter dreno e bastante se ganha com o aumento do caráter fonte de P, já que os minerais que compõem a fração argila (reserva de P lábil e não lábil) não apresentam tantos grupos funcionais ávidos por P.

A correlação da CMAP com o Fe_d (ferro extraído c/ DCB), o qual representa os óxidos e hidróxidos de Fe livres cristalinos e mal cristalizados, foi positiva e significativa, com um coeficiente de correlação de 0,64. Da mesma forma, houve correlação com o Fe_o (oxalato), porém com um coeficiente de correlação maior (0,81), demonstrando que a adsorção de P nesses solos está mais bem relacionada aos óxidos de ferro pouco cristalinos, provavelmente ferridrita e lepidocrocita (Schwertmann & Taylor, 1989), os quais predominam na fase coloidal dos solos em ambientes mal drenados. Moorman & van Breemen (1978) atribuem a predominância destas formas de óxidos e hidróxidos de Fe à alternância nas condições de oxidação e redução que ocorre em ambientes sazonalmente alagados, como os solos de várzea, a qual dificulta o processo de cristalização dos minerais de Fe. Então, em solos mal drenados, ou sazonalmente drenados, nos deparamos com uma condição diferente daquela relatada por Kämpf (1988) que, ao descrever

as relações entre a CMAP e diversas características de latossolos, apontam que o teor de óxidos de Fe cristalinos (Fe_2O_3) é a variável que melhor se correlaciona com a CMAP. Estes dados concordam com os de Khalid et al. (1977) que, estudando as características determinantes da adsorção de P para alguns solos onde se cultiva o arroz nos Estados Unidos, encontraram o Fe_o como o principal responsável pela sorção do P adicionado em solos alagados.

Tabela 6 Equações e coeficientes de correlação linear simples entre a CMAP e as variáveis estudadas para 16 solos de várzea do RS.

Correlação	Equação	Coefficiente de correlação (r)
Argila vs CMAP	$\text{CMAP} = 77,01 + 0,98 \text{ Argila}$	0,81*
M.O. vs CMAP	$\text{CMAP} = 88,13 + 9,45 \text{ MO}$	0,81*
Feo vs CMAP	$\text{CMAP} = 77,01 + 0,98 \text{ Feo}$	0,81*
Fator dreno vs CMAP	$\text{CMAP} = 191,03 + 12,65 \text{ Fator dreno}$	0,68*
P aplicado vs CMAP	$\text{CMAP} = 196,14 + 2,34 \text{ P}_2\text{O}_5 \text{ Aplicado}$	0,68*
Fed vs CMAP	$\text{CMAP} = 178,74 + 19,36 \text{ Fed}$	0,64*
Feo/Fed vs CMAP	$\text{CMAP} = 619,30 - 378,58 \text{ Feo/Fed}$	0,27 ^{NS}
E. de Ligação vs CMAP	$\text{CMAP} = 381,8 - 84,38 \text{ E. de Ligação}$	0,05 ^{NS}
ΔP disponível vs CMAP	$\text{CMAP} = 357,32 + 0,78 \Delta\text{P disponível}$	0,01 ^{NS}

*Significativo a 5%; ^{NS}= não significativo; N = 16.

Apesar da M.O. apresentar um coeficiente de correlação positivo e significativo com a CMAP, a adsorção de P não deve ser dependente deste parâmetro e sim da quantidade, tipo e grau de cristalinidade dos colóides inorgânicos presentes no solo. Isto porque a alta correlação da M.O. com a CMAP pode ser explicada pela importância do teor de argila como principal controlador dos níveis de MO que podem ser mantidos em cada solo, em função da proteção física e química que ela proporciona à

M.O. (Coleman et al, 1989). Entretanto, em função da correlação obtida podemos atribuir uma importância relativamente pequena aos colóides orgânicos como competidores do P no acesso aos sítios de adsorção da argila, que se fosse de grande magnitude, se refletiria em correlações negativas e significativas com a CMAP. As informações sobre a influência da MO na adsorção de P ainda são discordantes, pois alguns autores afirmam que os compostos orgânicos podem adsorver fósforo, formando complexos ternários, intermediados por pontes de cátions, como o Fe e o Al. Haveria também a possibilidade da MO aumentar a adsorção de P pela sua interação com os óxidos de Fe, a qual impede a sua cristalinização, aumentando assim a relação Fe_o/Fe_d e proporcionando uma maior superfície ativa para a adsorção de P (Schwertman et al., 1986). Por outro lado, trabalhos têm mostrado que a interação da MO com os colóides inorgânicos diminui a área superficial destes para a adsorção de P, havendo, portanto, uma competição com o P pelos sítios de adsorção. Deste modo, o incremento no teor de MO aumentaria a disponibilidade de P (Hue, 1991).

O índice Fe_o/Fe_d representa a proporção de óxidos de Fe mal cristalizados sobre o total de óxidos de Fe cristalinos e mal cristalizados (Kampf, 1988). A relação do índice Fe_o/Fe_d com CMAP foi positiva, mas não significativa. Isso demonstra que a utilização isolada de cada atributo nas correlações é mais eficiente do que sua relação. Observando-se a correlação entre a CMAP e a energia de ligação, verifica-se que a mesma não é significativa. Holford & Mattingly (1976) consideram que essa correlação pode ser baixa dependendo do “status” de P do solo. À medida que se vai enriquecendo o solo com P, como consequência das fertilizações, o solo se aproxima gradualmente do seu caráter fonte e a energia de ligação diminui gradualmente, tendendo para zero (Bahia Filho et al., 1982). Então, quando se trabalha com uma grande diversidade de solos, cada qual com um histórico de fertilizações

diferente, será difícil encontrar boas correlações entre a CMAP e a energia de ligação.

Na correlação entre o P_2O_5 aplicado e a CMAP também se obteve um coeficiente positivo e significativo, pois as quantidades aplicadas foram calculadas com a utilização da CMAP (fator *b*) e da energia de ligação (fator *a*). A correlação entre variação no P disponível em números absolutos (ΔP) e a CMAP não foi significativa e o fator dreno teve uma correlação positiva e significativa com a CMAP, possivelmente resultante das correlações positivas e significativas da argila, Fe_d , e Fe_o com a CMAP. Esta última correlação ilustra bem a importância da argila, tanto quantitativamente como qualitativamente, na adsorção de P e a sensibilidade de extratores ácidos como o Mehlich-1 à capacidade tampão de P.

As grandes quantidades de P a serem adicionadas para a elevação de uma unidade no P disponível por Mehlich-1 em solos bastante argilosos, como aqueles coletados em Torres e Uruguaiana, podem então ser reflexo do caráter dreno de P destes solos ou da incapacidade da metodologia em prever o P disponível, mesmo quando a extração é feita com solo seco. A capacidade tampão de P, que é uma característica inerente ao solo, é definida como a proporção da mudança da quantidade de P sorvido em relação a mudança do P na solução (ΔP na solução), a qual reflete a habilidade do solo em moderar mudanças de concentração do P da solução quando se adiciona P ou ele é retirado pelas plantas do sistema solo. Provavelmente, o Mehlich-1 está subestimando o P disponível, em razão de seu poder de extração ser desgastado pelo próprio solo. Novais & Smith (1999) afirmam que nesses solos mais argilosos, com acidez mais tamponada, o pH inicial de 2,5 do Mehlich-1 é rapidamente elevado para valores de pH próximos ao do solo. Igualmente, o SO_4^{-2} do extrator, que atua na troca com o fosfato adsorvido, é também rapidamente adsorvido pelo solo em sítios ainda não ocupados pelo P, perdendo o poder de extração. Conseqüentemente,

deveriam ser adotados níveis críticos menores nos solos argilosos do que nos solos arenosos porque nos últimos o extrator é bem menos desgastado (Novais & Kamprath, 1979). No entanto, todos os tipos de solos em que há cultivo de arroz irrigado por alagamento são classificados como Classe 5 no Sistema de Recomendações de Adubação e de Calagem para os Estados do RS e de SC.

Na tabela 7 estão apresentados os teores extraídos por Mehlich-1 nas amostras de solo originais, as doses de P_2O_5 a serem aplicadas para a cultura do arroz quando se utilizam os parâmetros a e b da equação de Langmuir no cálculo da dose para manutenção do teor na solução do solo de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ e a interpretação dos teores extraídos pela consulta à tabela da CFS-RS/SC (1995). Percebe-se uma ampla variação (Δ) entre as doses estimadas pelos dois procedimentos. O cálculo da necessidade de P_2O_5 pela equação de Langmuir indica a necessidade de aplicação de P em todos os solos ($12 \text{ a } 300 \text{ kg de } P_2O_5 \text{ ha}^{-1}$) e as doses foram superiores às resultantes da interpretação da CFS-RS/SC em 9 das 16 amostras coletadas, embora tenham sido observadas semelhanças nas quantidades recomendadas em 8 dos 16 solos, com variações de até 10 kg ha^{-1} de P_2O_5 para mais ou para menos. A consulta à tabela da CFS-RS/SC indicou que as necessidades de adubação fosfatada variaram de ≤ 20 (para teores extraídos por Mehlich-1 superiores a 12 mg kg^{-1}) a 60 kg ha^{-1} de P_2O_5 (para teores extraídos por Mehlich-1 inferiores a 3 mg kg^{-1}).

Estas diferenças, quando comparamos as formas de quantificação da dose a aplicar, podem estar relacionadas ao fato de que a consulta às tabelas da CFS-RS/SC e aplicação destas quantidades prevê a obtenção da MEE, diferente da manutenção de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$, que desconsidera aspectos econômicos e busca garantir condições para uma MET. Além disso, alguns pesquisadores têm demonstrado a possibilidade de obtenção de um desenvolvimento satisfatório de plantas com teores de P na solução do solo inferiores a $0,2 \text{ mg L}^{-1}$, principalmente em solos com alta capacidade tampão de P, ou seja, solos com maiores possibilidades

de repor o P removido da solução do solo, como ocorre nos solos mais argilosos (Novais & Smith, 1999). Conseqüentemente, não haveria a necessidade de doses tão altas de P e as quantidades aplicadas seriam mais próximas às recomendadas pela CFS-RS/SC.

A aplicação das quantidades preconizadas pela CFS-RS/SC resultaria em teores bastante variáveis de P na solução, de 0,10 a 1,61 mg L⁻¹, como pode ser observado na tabela 7. A dúvida que fica é como as plantas de arroz responderão em condições de campo, nesta diversidade de solos e condições climáticas. Em casa de vegetação, isolando os fatores, observamos bons acréscimos percentuais na produção de MS quando se aplicou as doses para a manutenção de 0,2 mg L⁻¹ na solução do solo, na maioria dos solos. Um aspecto interessante é que se observa uma tendência de baixos acréscimos em MS quando a dose recomendada pela CFS-RS/SC foi média ou baixa, e tendência a altas respostas ao P quando as doses recomendadas pela CFS-RS/SC são altas.

Tabela 7 P disponível nas amostras originais, dose de P estimada para a obtenção do N₂ (0,2 mg L⁻¹ na solução do solo) (Langmuir) , P recomendado pela CFS-RS/SC, Δ entre as doses estimadas, P solução c/ dose da CFS-RS/SC e acréscimo na produção de MS do arroz comparando a não aplicação e aplicação de P no N₂.

Solo	P Mehlich-1	Dose P (Langmuir) ¹	Dose P (CFS)	Δ entre doses ²	P _{sol} (CFS)	↑ na MS
	mg kg ⁻¹	----- kg de P ₂ O ₅ ha ⁻¹ -----			mg L ⁻¹	%
Camaquã	13,8	142	≤ 20	122	0,05	1
Torres	3,5	300	40	260	0,05	59
Dom Pedrito	2,3	64	60	4	0,38	122
Uruguaiana - 1	2,1	67	60	7	0,36	98
Uruguaiana - 2	1,0	51	60	-9	0,48	78
Caçapava do Sul	3,6	56	40	16	0,30	13
Sto. Ant. Patrulha	8,0	73	20	53	0,11	4
Santa Maria	8,0	75	20	55	0,10	31
São Gabriel	1,3	45	60	-15	0,55	279
Cachoeirinha	5,1	31	40	-9	0,53	6
Restinga Seca	3,0	128	60	68	0,19	208
Cachoeira do Sul -1	4,4	32	40	-8	0,51	8
Cachoeira do Sul -2	7,1	20	20	0	0,42	21
Sta Vit do Palmar	3,7	12	40	-28	1,61	0
Rosário do Sul	13,6	14	≤ 20	-6	0,60	1
Paraíso do Sul	8,9	24	20	4	0,34	44

¹ Considerou-se a camada de 0 a 20 cm e uma densidade do solo = 1g cm⁻³

² Onde a dose era ≤ 20 usou-se 20.

4.2 Fracionamento do fósforo inorgânico dos solos de várzea do RS

Os resultados de fósforo total, formas de fósforo inorgânico e a sua participação em relação ao fósforo total para os solos sem aplicação de P, antes e após 30 dias de alagamento, estão apresentadas nas Tabelas 8 e 9, respectivamente. Quanto ao fósforo total observa-se valores bastante variáveis entre os solos estudados, os quais estão na faixa de 69 a 596 mg kg⁻¹, sendo que o teor médio de fósforo total para o conjunto de solos estudado foi de 163 mg kg⁻¹. Machado et al. (1993) estabeleceram uma classificação arbitrária para solos do RS quanto ao teor de fósforo total, considerando-se aqueles que se situam no intervalo de 0 a 500 mg L⁻¹ como pobres; de 500 a 1.000 mg L⁻¹ como médios; e, acima de 1.000 mg L⁻¹, como solos com alto conteúdo de P total. Baseado nesta classificação, percebe-se que apenas o solo coletado no município Camaquã entraria na classe de teores médios de fósforo total, o solo de Torres está muito próximo a esta faixa, e os demais seriam considerados como solos pobres em fósforo total. Estes dados concordam com aqueles obtidos por Machado et al. (1993), que estudando as formas de fósforo na camada arável de solos do RS, observaram baixos teores de fósforo total em solos da metade Sul do Estado.

O conteúdo de fósforo total de cada solo deve estar relacionado a fatores como o material de origem e ao grau de desenvolvimento deste solo (Fassbender, 1980). Existe uma variedade muito grande de rochas que deram origem aos solos do Estado do Rio Grande do Sul (Brasil, 1973). Na metade Sul, onde tradicionalmente se cultiva o arroz, os solos são originados, principalmente, de basalto e sedimentos de basalto na região da Fronteira Oeste; de arenitos, de siltitos, de argilitos e de folhelhos na Campanha e Depressão Central; e de sedimentos de granito, na região Litoral Sul (Sousa, 2004). Assim, como o basalto é o material dos solos do RS de maior riqueza em P, espera-se que solos originados desta rocha ou de seus sedimentos apresentem um conteúdo maior de

fósforo total. Para os solos originados dos demais materiais, espera-se o desenvolvimento de solos com menores conteúdos de fósforo total.

Para o fracionamento químico do fósforo inorgânico realizaram-se extrações seqüenciais com NH_4Cl 1 mol l^{-1} , NH_4F 0,5 mol l^{-1} pH 8,2, NaOH 0,1 mol l^{-1} , DCB a 85°C e H_2SO_4 0,25 mol l^{-1} . A primeira extração remove o P solúvel e fracamente ligado. Na etapa seguinte o fracionamento utiliza a habilidade complexadora do F^- contido no NH_4F para separar as formas Al-P e Fe-P, seguida da remoção do Fe-P com NaOH e do P-ocluído por DCB. O Ca-P, o qual é insolúvel em DCB, foi extraído com H_2SO_4 (Kuo, 1996). Na determinação da fração de fósforo solúvel em NH_4Cl não foram detectadas concentrações de fósforo dentro da sensibilidade do método empregado. Resultado semelhante foi encontrado por Williams et al. (1967), os quais verificaram que esta fração foi insignificante para a maioria dos solos em estudo, sendo que quantidades mensuráveis de P facilmente solúvel, até uma concentração de 10 mg L^{-1} , foram incluídas na estimativa do Al-P por NH_4F .

Na determinação do P ligado ao Al também não se obteve concentrações de P detectáveis tanto pelo método de Murphy & Riley (1962) quanto pelo método de Dick & Tabatabai (1977). Fife (1962) sugere que a extração com NH_4F durante 24h ao invés de 1h, como proposto por Chang & Jackson (1957), permitiria uma remoção mais apropriada do fósforo ligado ao Al. No entanto, mesmo com esta modificação, este autor afirma que há dificuldades na determinação do Al-P através do NH_4F , pois os compostos férricos do solo sorvem parte do fósforo solubilizado durante a extração. Smith (1965) propôs um procedimento para superar esta dificuldade, o qual também não se mostrou inteiramente adequado para obtenção desta fração (Williams et al., 1967).

Como neste trabalho utilizou-se o procedimento original de Chang & Jackson (1957), esta seria uma das hipóteses que explica a não extração e quantificação do P-Al nos solos estudados (Tabelas 8 e 9). A

outra hipótese seria a maior contribuição relativa das formas de P com os demais componentes do solo (Fe, Ca), diminuindo a importância relativa das formas de P com Al em solos de várzea.

Observando-se as formas de fósforo inorgânico e a sua participação em relação ao fósforo total, percebe-se que as formas inorgânicas mais lábeis (Fe-P + Ca-P), consideradas as mais importantes para a nutrição das plantas, representam, em média 31% do conteúdo de P total dos solos em estudo antes do alagamento (Tabela 8). Os demais 69% correspondem ao fósforo orgânico e ao fósforo ocluso, os quais são conceitualmente considerados como fósforo não lábil. Estes dados se assemelham aos obtidos por Machado et al. (1993), onde, da totalidade do fósforo nos solos da região Sul do Estado, as formas inorgânicas ativas ou lábeis constituíam 30%, em média. Este percentual de formas lábeis de P pode privilegiar a nutrição do arroz cultivado nesses solos, comparativamente às espécies cultivadas em solos do planalto do RS, onde estes autores verificaram que apenas 13% do fósforo total era constituído pelas formas lábeis. A forma Fe-P foi a forma de P inorgânico mais abundante entre as formas ativas antes do alagamento, com uma contribuição média de 82% para o P lábil, seguido do Ca-P, que, em média, contribuiu com 18% do P lábil dos solos. Isto reforça o fato de que os minerais de Fe sejam os principais controladores da dinâmica do P em ambientes sazonalmente alagados, como os solos de várzea (Patrick & Mahapatra, 1968).

Após o período de 30 dias de alagamento (Tabela 9), observou-se um percentual médio ainda maior das formas inorgânicas ativas ou lábeis em relação ao fósforo total (49%). Este fato pode contribuir para a obtenção de respostas consideravelmente menores à adubação fosfatada em solos alagados comparativamente a culturas cultivadas no mesmo solo em condição de sequeiro. Com esta modificação na natureza e distribuição das formas de P em função do alagamento, o arroz pode ter acesso a outras formas de P não disponíveis em condições aeróbicas.

Provavelmente, este aumento na proporção de formas ativas é resultante da liberação de P anteriormente ocluso pelo revestimento das partículas de argila e silte por óxidos férricos hidratados (Patrick & Mahapatra, 1968), os quais são parcial ou totalmente dissolvidos pela redução do ferro devido ao alagamento e passam a ser acessadas pelo procedimento de fracionamento.

Dessa forma, após o alagamento, o Fe-P foi novamente a forma de maior contribuição ao P lábil, com um aumento médio de 5 pontos percentuais na sua contribuição em relação ao solo seco, representando 87% nestas condições. Todas estas modificações no ambiente onde se desenvolve o arroz fazem com que vários métodos de extração química de fósforo, os quais podem ser utilizados para avaliar sua disponibilidade em solos e recomendar adubação fosfatada para culturas de sequeiro, geralmente apresentam baixa eficiência na estimativa da disponibilidade de P ao arroz (Patrick Jr. & Mahapatra, 1968). Este pode ser o caso da metodologia atualmente empregada para avaliar a disponibilidade de fósforo para as culturas no RS e SC, o extrator Mehlich-1, que além de extrair o P em valores de pH muito baixo, diferente da condição de absorção de nutrientes pelas raízes das plantas, dissolve predominantemente fósforo ligado ao cálcio e alumínio, enquanto que a liberação do fósforo ligado ao ferro é o processo que predominaria com o alagamento do solo (Patrick Jr. & Mahapatra, 1968). Assim, parece ser indispensável a avaliação da disponibilidade de P através de uma metodologia que considere a relevância desta forma de P para a nutrição do arroz e sua dinâmica em função do alagamento.

Tabela 8 Formas de P inorgânico nas amostras de solo seco sem a aplicação de P.

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

nd = não detectado

Tabela 9 Formas de P inorgânico nas amostras após 30 dias de alagamento sem a aplicação de P.

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

nd = não detectado

Considerando as amostras de solo sem e com aplicação de P e antes e após o alagamento, as quantidades de Fe-P foram bastante variáveis entre os solos (Tabela 10), com amplitude de 11 a 105 mg kg⁻¹ no solo seco e de 21 a 222 mg kg⁻¹ após o alagamento por 30 dias. Em todos os solos, exceto naqueles coletados em Dom Pedrito e Uruguaiana-02, houve aumentos expressivos na quantidade de Fe-P em função do alagamento, cujo aumento médio da fração foi próximo a 100%.

Tabela 10 Modificações na fração Fe-P decorrentes do alagamento durante 30 dias dos solos sem e com aplicação de P.

Solo	Nível de P aplicado	Fração Fe-P		Variação em função do alagamento
		Antes do alagamento	Após o alagamento	
		-----mg kg ⁻¹ -----		%
Camaquã	N ₀	88	196	+123
	N ₂	98	222	+127
Torres	N ₀	47	84	+79
	N ₂	60	135	+125
Dom Pedrito	N ₀	99	98	-1
	N ₂	105	101	-4
Uruguaiana - 1	N ₀	29	48	+66
	N ₂	31	53	+71
Uruguaiana - 2	N ₀	67	48	-28
	N ₂	68	51	-25
Caçapava do Sul	N ₀	19	54	+184
	N ₂	23	72	+213
Sto. Ant. Patrulha	N ₀	29	69	+138
	N ₂	34	75	+121
Santa Maria	N ₀	35	69	+97
	N ₂	39	78	+100
São Gabriel	N ₀	24	39	+63
	N ₂	44	45	+2
Cachoeirinha	N ₀	19	55	+189
	N ₂	25	57	+128
Restinga Seca	N ₀	17	30	+76
	N ₂	23	42	+83
Cachoeira do Sul -1	N ₀	26	45	+73
	N ₂	29	45	+55
Cachoeira do Sul -2	N ₀	20	42	+110
	N ₂	22	44	+100
Sta Vit do Palmar	N ₀	11	23	+109
	N ₂	12	21	+75
Rosário do Sul	N ₀	18	23	+28
	N ₂	18	22	+22
Paraíso do Sul	N ₀	23	51	+122
	N ₂	26	48	+85

Sah & Mikkelsen (1986) também verificaram aumento na fração Fe-P durante o alagamento. A magnitude do incremento na fração foi bastante variável em função dos solos, sendo que o maior aumento ocorreu no 1° mês com tendência posterior de estabilização. Estes autores atribuem os aumentos nesta fração com o alagamento a possível transformação da variscita e strengita em vivianita $[\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}]$, o qual se torna o mineral mais estável com o decréscimo do potencial redox durante o alagamento. Também haveria a possibilidade de liberação de P ocluso com a dissolução dos óxidos de Fe e Al que revestem a argila em função do aumento de pH resultante do alagamento.

Na seqüência das extrações buscou-se quantificar o P solúvel em agentes redutores ou P-occluso, possivelmente relevante na nutrição do arroz em solos alagados (Patrick & Mahapatra, 1968). No entanto, a extração com DCB a 85°C não detectou esta forma de P, pois não se constataram concentrações de fósforo dentro da sensibilidade do método empregado. Isto pode estar relacionado a uma possível incapacidade do DCB em extrair esta forma ou a problemas posteriores a extração, como a readsorção ao solo ou interferências na leitura por Murphy & Riley (1962) e Dick & Tabatabai (1977). Embora relativamente de simples execução, diversos problemas do esquema proposto inicialmente por Chang & Jackson (1957) conduziram ao desenvolvimento de novos esquemas de fracionamento. No esquema de fracionamento de Hedley et al. (1982), a extração do P inorgânico química e fisicamente protegido nas superfícies internas dos microagregados é realizada com a utilização de ultrasonificação mais NaOH 0,1 mol l⁻¹ ou, na ausência de ultra-som, Condon et al. (1995) propôs a substituição desta etapa simplesmente por extração com NaOH 0,5 mol l⁻¹. Novais & Smith (1999), comentam que esta é uma forma de grande estabilidade e, por ser de mais difícil extração que as outras, o P-occluso freqüentemente não é determinado em diversos trabalhos. Além disso, estes autores afirmam que, de um modo geral, o P-occluso não contribui, em curto prazo, para o fornecimento de P

às plantas e que é pouco variável, em curto prazo, em função de alterações no pH do solo ou adições de fertilizantes. Machado et al. (1993), usando o método de Chang & Jackson em solos do RS, relatam que os solos da região Sul do Estado, os quais são pouco intemperizados, possuem mais fósforo inorgânico ativo (Al-P, Ca-P e Fe-P) que os solos da região do Planalto, os quais apresentam mais fósforo em formas oclusas, de pouca participação na disponibilidade às plantas. Possivelmente, este fato também tenha contribuído para a não detecção do P-ocluído.

Na Tabela 11 encontra-se a mudança na forma Ca-P, a qual é insolúvel em DCB e foi extraída com H_2SO_4 , finalizando o esquema de fracionamento. Observa-se que, analogamente a forma Fe-P, houve uma variação expressiva quando comparamos os diferentes solos de várzea. Antes do alagamento, os teores extraídos variaram de 1,2 a 31 $mg\ kg^{-1}$ e, após o período de 30 dias de alagamento, a amplitude foi de 1,3 a 38 $mg\ kg^{-1}$ para os solos estudados. Para a grande maioria dos solos, houve um aumento da forma Ca-P após 30 dias de alagamento, sendo que para estes solos os aumentos médios foram de aproximadamente 36%. Embora os aumentos percentuais tenham sido elevados para alguns solos, as mudanças quantitativas foram pequenas se considerarmos as magnitudes dos compartimentos Ca-P e Fe-P nos solos. Sah & Mikkelsen (1986) comentam que em função do grande acréscimo na pressão de CO_2 no solo alagado, aumenta a solubilidade do $CaCO_3$ e outros sais de Ca, levando a um acréscimo da atividade do Ca^{+2} . Como a concentração de fosfato na solução também aumenta com o alagamento, haveria a possibilidade de precipitação de Ca^{+2} e fosfato, proporcionando um acréscimo na fração Ca-P.

Tabela 11 Modificações na fração Ca-P decorrentes do alagamento durante 30 dias dos solos sem e com aplicação de P.

Solo	Nível de P aplicado	Fração Ca-P		Variação em função do alagamento
		Antes do alagamento	Após o alagamento	
		-----mg kg ⁻¹ -----		%
Camaquã	N ₀	19	16	-16
	N ₂	19	17	-11
Torres	N ₀	14	15	+7
	N ₂	17	17	0
Dom Pedrito	N ₀	5	6	+20
	N ₂	5	6	+20
Uruguaiana – 1	N ₀	19	22	+16
	N ₂	18	23	+28
Uruguaiana – 2	N ₀	3	12	+300
	N ₂	4	18	+350
Caçapava do Sul	N ₀	29	37	+28
	N ₂	31	38	+23
Santo Ant. Patrulha	N ₀	5	4	-20
	N ₂	4	4	0
Santa Maria	N ₀	5	6	+20
	N ₂	6	6	0
São Gabriel	N ₀	4	6	+50
	N ₂	4	6	+50
Cachoeirinha	N ₀	3	4	+33
	N ₂	3	3	0
Restinga Seca	N ₀	7	9	+29
	N ₂	6	9	+50
Cachoeira do Sul -1	N ₀	4	5	+25
	N ₂	4	5	+25
Cachoeira do Sul -2	N ₀	2	2	0
	N ₂	2	3	+50
Santa Vit. do Palmar	N ₀	2	2	0
	N ₂	2	2	0
Rosário do Sul	N ₀	1	1	0
	N ₂	1	2	+100
Paraíso do Sul	N ₀	5	4	-20
	N ₂	5	5	0

Mesmo antes do alagamento, alguns solos apresentaram quantidades consideráveis de P na forma P-Ca. Isto pode estar relacionado ao grau de intemperismo destes solos. Conforme Novais & Smith (1999), solos menos intemperizados, ricos em Ca trocável e de pH elevado, deverão ser mais ricos em P-Ca e pobres em P-Fe e P-Al. Um outro aspecto a considerar, segundo estes autores, é a realização de calagem. Para os solos em estudo houve a correção da acidez buscando a elevação do pH a 5,5 e, desta maneira, é possível que parte do P-Ca extraído com H_2SO_4 teve influência da adição de calcário, em função do acréscimo da atividade de Ca^{+2} e possibilidade de precipitação com o fosfato.

4.3 Metodologias para a avaliação da disponibilidade de P em solos de várzea do RS

4.3.1 Absorção de fósforo pelas plantas de arroz

Utilizou-se a quantidade de fósforo acumulada pela parte aérea das plantas de arroz como uma medida da real disponibilidade do elemento no solo. Os valores de produção de matéria seca e dos teores de P na parte aérea do arroz de cada tratamento encontram-se nos anexos 5 e 6, respectivamente. Assim, a eficiência dos métodos de análise de solo em prever a disponibilidade de P para a cultura foi medida pelo grau de associação, medido pela correlação linear simples (r), entre os teores de P extraídos do solo pelos métodos (Anexos 9 a 23) e as quantidades do elemento absorvidas no experimento em casa de vegetação (Tabela 12).

Os teores de fósforo absorvidos pelo arroz foram bastante variáveis entre os solos, para cada um dos níveis de fósforo aplicado. Sem a aplicação de fósforo, os teores absorvidos variaram entre 0,36 a 12,24 mg kg⁻¹ solo, correspondente a uma variação de até 34 vezes entre os solos. Com a aplicação de fósforo no intuito de manter o teor de 0,2 mg L⁻¹ na solução do solo e garantir um bom desenvolvimento das plantas, os contrastes entre os teores absorvidos perderam a intensidade, 1,83 a 26 mg kg⁻¹, com variação de até 14 vezes entre aqueles solos que obtiveram os valores extremos. Provavelmente, esta grande amplitude de teores de P absorvido esteja relacionada a grande diversidade de características químicas e físicas do conjunto de solos em estudo (Tabela 1). Esta variabilidade é interessante em estudos de calibração de métodos, onde se busca uma boa estimativa da disponibilidade de P para todos os solos da região de abrangência do sistema de recomendação.

Para facilitar a interpretação dos resultados das metodologias avaliadas, a análise de eficiência dos métodos foi realizada agrupando aqueles que apresentavam princípios de extração de P semelhantes.

Tabela 12 Fósforo absorvido pelas plantas de arroz em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 ($0,2 \text{ mg L}^{-1}$ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais

Municípios	Fósforo absorvido		
	N_0	N_1	N_2
	----- mg kg^{-1} de solo -----		
Camaquã	12,24	15,09	13,00
Torres	10,02	18,18	26,00
Dom Pedrito	1,19	2,68	4,17
Uruguaiana - 01	1,28	2,14	3,06
Uruguaiana - 02	2,32	3,66	4,79
Caçapava do Sul	9,11	10,34	10,76
Santo Ant da Patrulha	8,17	8,89	8,75
Santa Maria	5,86	6,82	7,70
São Gabriel	0,36	1,44	1,83
Cachoeirinha	7,17	7,61	8,15
Restinga Seca	0,65	2,25	4,04
Cachoeira do Sul - 01	3,29	4,46	5,02
Cachoeira do Sul - 02	4,57	6,76	5,19
Santa Vit. do Palmar	7,31	8,36	7,47
Rosário do Sul	6,05	6,24	6,24
Paraíso do Sul	1,29	2,55	2,47

4.3.2 Fósforo extraível por ácidos fortes diluídos com a presença ou não de agentes complexantes

Os teores de fósforo extraídos por Mehlich-1, Mehlich-2, Mehlich-3, Bray-1, Bray-2 e H₂SO₄ SP encontram-se nos Anexos 9 a 14. Na Figura 3 estão apresentadas as correlações estabelecidas entre os teores de fósforo obtidos pelos extratores e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz para todo o conjunto de solos em estudo. Os resultados obtidos demonstram variados coeficientes de correlação para este grupo de extratores, os quais extraem o P do solo em meio ácido. A maior correlação entre P extraído e P absorvido foi verificada com o extrator H₂SO₄ SP ($r = 0,61^{**}$), seguido por Mehlich-3 ($r = 0,47^{**}$), Mehlich-1 ($r = 0,45^{**}$), Mehlich-2 ($r = 0,44^{**}$) e Bray-2 ($r = 0,44^{**}$) com coeficientes de correlação linear simples menores, embora todos tenham sido significativos ($p < 0,01$). O método Bray-1 ($r = 0,25^{NS}$) foi o único extrator ácido forte cujos teores extraídos não se correlacionaram significativamente com o P absorvido pelo arroz.

Estes resultados concordam com Patrick Jr. & Mahapatra (1968), os quais afirmam que 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 alagados. Este comportamento estaria relacionado ao fato de que os extratores ácidos dissolvem predominantemente fósforo ligado ao cálcio e alumínio e a liberação do fósforo ligado ao ferro é o processo que predominaria com o alagamento do solo (Patrick Jr. & Mahapatra, 1968).

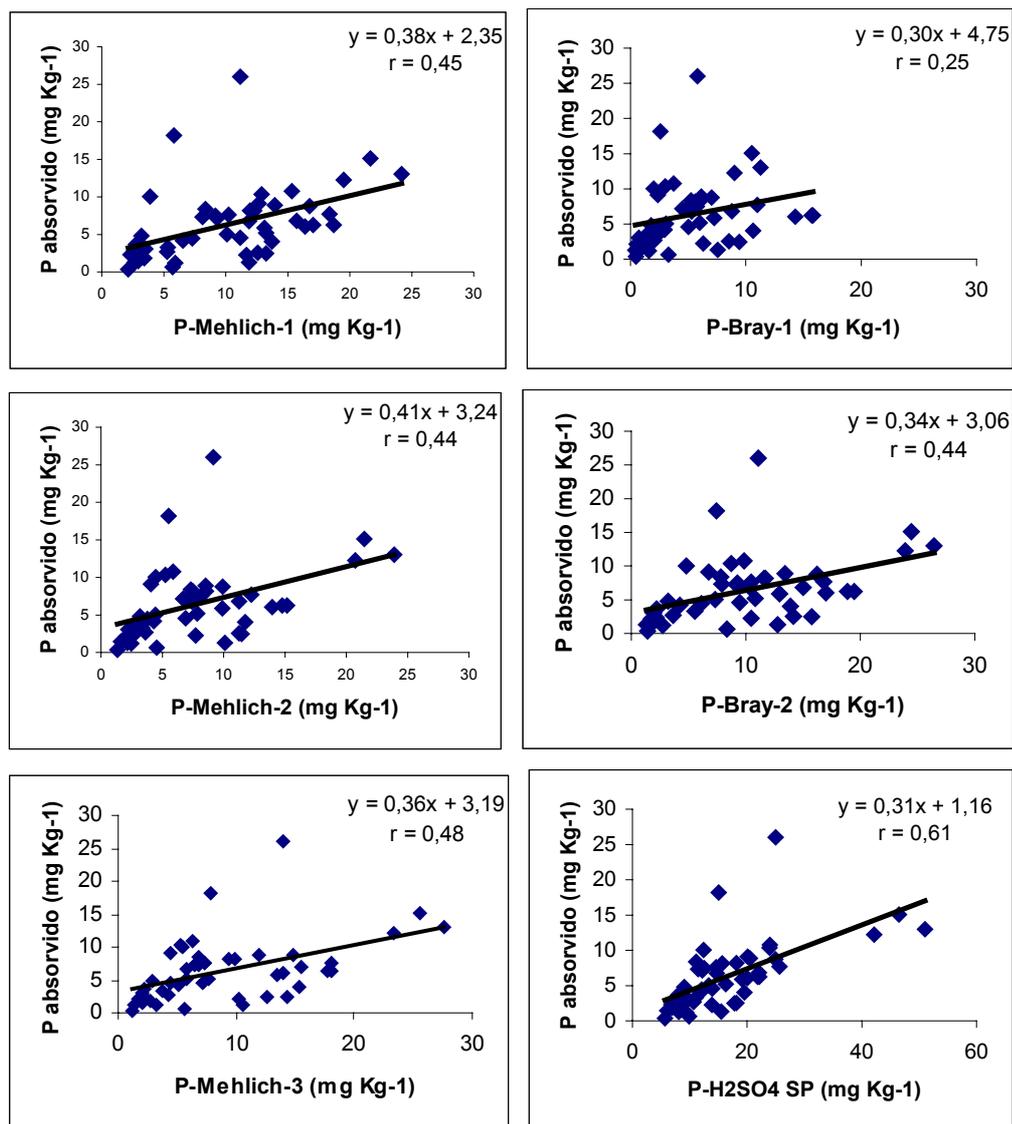


Figura 3 Correlações estabelecidas entre os teores de fósforo pelos extratores Mehlich-1, Mehlich-2, Mehlich-3, Bray-1, Bray-2 e H_2SO_4 SP e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz (N = 48).

Observa-se que, neste grupo de metodologias, apenas o método H_2SO_4 SP foi superior ao Mehlich-1, método atualmente empregado para avaliar a disponibilidade de fósforo para as culturas nos Estados do RS e SC. Os demais métodos (Mehlich-2, Mehlich-3 e Bray-2) apresentaram coeficientes de correlação semelhantes ao obtido com o Mehlich-1 Segundo Grande et al. (1986), este método realiza a extração em valores

de pH muito baixo, ambiente desfavorável para estimar as frações de fósforo disponibilizadas com o alagamento do solo. A presença de íons com poder complexante, como ocorre com o Mehlich-2, Mehlich-3, Bray-1 e Bray-2, não melhorou a correlação com o P absorvido, em relação à utilização simplesmente de soluções ácidas.

Analisando-se a distribuição dos pontos nos gráficos da Figura 3, percebe-se que existem alguns pontos com um grande afastamento em relação às retas ajustadas. Estes pontos correspondem ao solo coletado no município de Torres e contribuem para os baixos coeficientes de correlação obtidos. Esta distribuição diferenciada é fruto dos altos teores de P absorvido pelas plantas de arroz cultivadas neste solo, os quais chegaram a superar em 14 vezes a quantidade absorvida pelo arroz cultivado em outros solos, mesmo quando se aplicou o maior nível de P (Tabela 12). Possivelmente, as alterações na quantidade de fósforo que se tornou disponível com os processos de redução deste solo, proporcionada pelo alagamento, ocorreram em uma intensidade bastante diferenciada dos demais solos e a determinação do teor de fósforo pelos métodos a partir do solo seco não refletiu tais alterações e o aumento do teor de fósforo disponível após o alagamento (Chang, 1978).

Dessa forma, a exclusão deste solo do estudo de correlações para ácidos fortes permitiu a obtenção de melhores coeficientes de correlação linear simples entre os teores extraídos e absorvidos, os quais passaram para 0,74** no Mehlich-1; 0,65** no Mehlich-2; 0,62** no Mehlich-3; 0,43** no Bray-1; 0,67** no Bray-2; e 0,80** no H₂SO₄ SP, todos eles significativos ($p < 0,01$). Este procedimento é adotado algumas vezes em estudos de calibração de métodos (Menon et al., 1990) quando temos, no conjunto de solos em estudo, algum que apresente um comportamento totalmente distinto dos demais. Os métodos ácidos se mostraram sensíveis ao Fator Capacidade de P (FCP), ou poder tampão, recuperando menores quantidades de P nos solos mais argilosos e com maior CMAP (Tabela 13).

A recuperação de P por cada método correlacionou-se negativamente com o teor de argila dos solos de várzea, com coeficientes de correlação de -0,62*, -0,63*, -0,50*, -0,61*, -0,66* e -0,58* para Mehlich-1, Mehlich-2, Mehlich-3, Bray-1, Bray-2 e H₂SO₄ SP, respectivamente, todos significativos (p<0,05). Isto ocorreu devido ao esgotamento da capacidade de extração do método e readsorção de P durante o processo de extração, aspecto amplamente conhecido e discutido em solos bem drenados (Novais & Smith, 1999). Bahia Filho et al., (1983) comentam que, no caso do Mehlich-1, há um consumo de íons hidrogênio e sulfato do extrator pelos grupos funcionais não ocupados pelo fósforo nos colóides inorgânicos e uma readsorção de fósforo aos colóides durante a extração. Este comportamento é um indicativo de que a separação dos solos de várzea em grupos em função da argila ou de outro fator relacionado a CMAP pode ser uma alternativa para aprimorar a eficiência do método em predizer a disponibilidade de P.

Tabela 13 Teor de argila, fósforo adicionado, percentagem de fósforo recuperado por Mehlich-1, Mehlich-2, Mehlich-3, Bray-1, Bray-2 e H₂SO₄ e percentagem de P absorvida em relação ao fósforo aplicado no N₂.

Municípios	Argila	P adicionado	P recuperado						P absorvido
			Mehlich-1	Mehlich-2	Mehlich-3	Bray-1	Bray-2	H ₂ SO ₄	
	-g kg ⁻¹ -	--mg kg ⁻¹ --	-----%-----						
Camaquã	804	30,9	15,1	10,3	13,8	7,2	8,1	28,8	42,1
Torres	680	65,5	11,1	7,2	13,1	5,8	9,6	19,2	39,7
Dom Pedrito	439	14,1	4,6	13,0	13,4	9,6	10,9	18,9	29,7
Uruquaiana 01	370	14,7	5,7	0,6	4,8	2,0	4,3	10,3	20,8
Uruquaiana 02	330	11,2	8,0	4,9	6,8	7,5	9,2	19,9	42,8
Caçapava do Sul	320	12,2	22,0	14,9	15,2	11,3	25,6	32,1	88,5
Sto Ant. da Patrulha	225	15,9	30,3	15,5	31,1	9,0	29,1	42,8	55,0
Santa Maria	240	16,3	32,0	14,4	27,9	22,9	23,7	39,7	47,1
São Gabriel	245	9,7	13,4	7,5	16,3	6,1	6,6	12,5	18,8
Cachoeirinha	200	6,8	44,4	27,7	38,0	21,8	36,9	51,3	120,3
Restinça Seca	187	27,8	28,8	25,9	35,0	26,4	19,9	34,7	14,5
Cachoeira do Sul 01	175	7,1	67,5	15,3	29,3	11,5	25,0	32,5	71,0
Cachoeira do Sul 02	128	4,3	48,6	22,6	10,0	22,6	31,6	53,9	120,6
Santa Vit. do Palmar	123	2,6	40,0	31,9	33,8	17,3	51,5	41,9	287,4
Rosário do Sul	83	3,2	73,3	37,8	130,2	48,6	78,7	64,8	198,0
Paraíso do Sul	88	5,2	26,2	26,4	72,4	36,0	57,4	44,9	47,5
MÉDIA	290	15,5	29,4	17,2	30,7	16,6	26,8	34,3	77,7

Os métodos Mehlich-1, Mehlich-2, Mehlich-3, Bray-1, Bray-2 e H_2SO_4 SP recuperaram em média, para o conjunto de solos em estudo, 29, 17, 31, 17, 27 e 34% do P adicionado no N_2 , respectivamente. Observa-se que H_2SO_4 SP foi o método que apresentou a melhor habilidade de recuperação do P aplicado, enquanto que o Bray-1 foi o método de menor capacidade de recuperação. Esta habilidade de recuperação do P aplicado parece apresentar relação com a eficiência dos métodos em predizer a disponibilidade de P para o arroz, já que o H_2SO_4 SP apresentou os maiores valores de r e o Bray-1 apresentou os menores valores de r , tanto quando se considera todo o conjunto de solos ou quando se exclui o solo coletado no município de Torres. No entanto, o maior benefício obtido com a utilização de métodos com maior habilidade extração de P seria a maior amplitude no valor da análise entre o solo com teor *baixo* e o solo com teor *alto*, a fim de evitar que o erro de leitura e/ou a contaminação da amostra prejudique demasiadamente a interpretação dos resultados (Mielniczuk, 1995). Dessa forma, não se teria uma dificuldade tão grande na interpretação dos resultados como ocorre no atual sistema de recomendações para o arroz irrigado, onde a separação entre o limite superior da classe *baixo* e o limite inferior da classe *alto* com o método Mehlich-1 é muito estreita (apenas 3 mg L^{-1}) (CQFS-RS/SC, 2004).

Em função desses e outros aspectos, nos estados do RS e SC, é crescente o número de pesquisadores que defendem o uso de outros métodos em substituição ao Mehlich-1 para a avaliação da disponibilidade de fósforo às plantas (Gatiboni, 2003), mesmo para culturas de sequeiro. Entre os métodos mais cogitados pela CFS-RS/SC (2001) como substituintes ao Mehlich-1 estão a RTA e o Mehlich-3. No entanto, os dados obtidos neste trabalho para o Mehlich-3 não apontam melhoras na capacidade de extração em relação ao Mehlich-1, como também foi observado por Gatiboni (2003). Isto é discordante de trabalhos cujos resultados mostram uma quantidade extraída por Mehlich-3 de 150 a

200% maior que por Mehlich-1 (Wolf & Baker, 1985; Sims, 1989).

Na Tabela 13, ainda podemos observar que as percentagens de P absorvido em relação ao P aplicado nos diferentes solos foram normalmente superiores às quantidades extraídas pelos métodos. Isto não deve comprometer a avaliação da disponibilidade de P, pois os métodos de avaliação da disponibilidade de P não precisam, necessariamente, extrair todo o fator Q do solo (fração do P total ligado com baixa energia aos colóides do solo), desde que seja mantida a proporcionalidade da fração extraída em diferentes tipos de solo e estoques de fósforo (Novais & Smith, 1999). Isto determina a necessidade de calibração do método a campo para relacionar os teores extraídos pelo método com a produtividade das culturas.

Na tabela 14 estão apresentados os coeficientes de correlação linear simples entre os teores obtidos pelos métodos constituídos de ácidos fortes com a presença ou não de agentes complexantes. Podemos observar que todos eles se correlacionam significativamente uns com os outros, o que é esperado tendo em vista os princípios de extração bastante semelhantes entre si. Novais & Smith (1999) comentam que isto também pode estar relacionado ao fato de que há uma maior chance de encontrar correlações mais altas entre extratores semelhantemente sensíveis ao FCP, quando diferentes solos são envolvidos.

Tabela 14 Coeficientes de correlação linear (r) entre os teores obtidos pelos extratores ácidos fortes diluídos com a presença ou não de agentes complexantes.

Métodos	Mehlich-1	Mehlich-2	Mehlich-3	Bray-1	Bray-2	H ₂ SO ₄ SP
Mehlich-1	-	0,90**	0,91**	0,84**	0,96**	0,89**
Mehlich-2		-	0,98**	0,87**	0,97**	0,90**
Mehlich-3			-	0,87**	0,97**	0,89**
Bray-1				-	0,89**	0,64**
Bray-2					-	0,89**
H ₂ SO ₄ SP						-

**Significativo a 1%: N = 48

4.3.3 Fósforo extraível por ácidos fracos diluídos com a presença ou não de agentes complexantes

Os teores de fósforo extraídos por Morgan, Texas, Lactato e EDTA encontram-se nos Anexos 15 a 18. Na Figura 4 estão apresentadas as correlações estabelecidas entre os teores de fósforo obtidos pelos extratores e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz para todo o conjunto de solos em estudo. Os resultados obtidos demonstram coeficientes de correlação bastante variáveis para este grupo de extratores, os quais também extraem o P do solo em meio ácido, semelhantemente aos anteriormente discutidos. As maiores correlações entre P extraído e P absorvido foram verificadas com os extratores EDTA ($r = 0,71^{**}$) e Texas ($r = 0,66^{**}$), seguido do Lactato de Ca ($0,46^{**}$), todos significativos ($p < 0,01$). Os teores de P obtidos pelo extrator Morgan não se correlacionaram com o P absorvido ($r = 0,20^{ns}$) para o conjunto de solos em estudo.

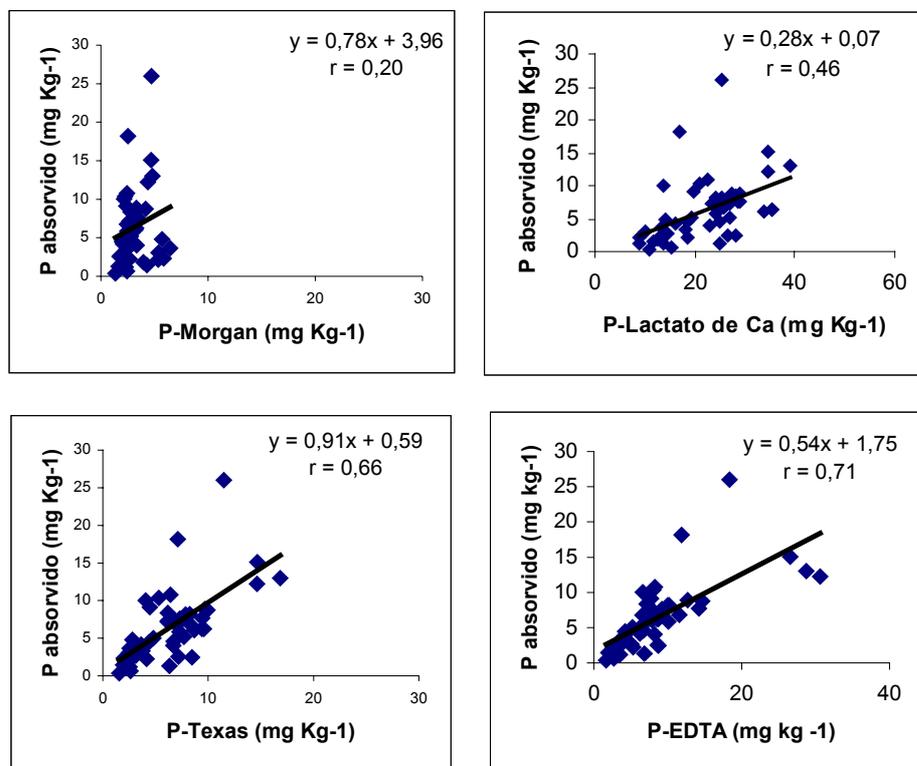


Figura 4 Correlações estabelecidas entre os teores de fósforo pelos extratores Morgan, Texas, Lactato de Ca e EDTA e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz (N = 48).

Embora os extratores EDTA e Texas apresentem os maiores coeficientes de correlação dentre as metodologias discutidas até o momento, ainda percebe-se a existência de alguns pontos com um grande afastamento em relação à reta ajustada, comportamento atribuído ao solo de Torres. A exclusão deste solo permitiu a obtenção de melhores coeficientes de correlação linear simples entre os teores extraídos e absorvidos neste grupo de métodos, os quais passaram a 0,80** para EDTA; 0,79** para Texas; 0,70** para Lactato de Ca; e 0,18^{NS} para Morgan, todos eles significativos ($p < 0,01$) com exceção do último. Os métodos EDTA e Texas, os quais já se mostravam os mais promissores deste grupo, considerando todos os solos, continuaram

apresentando os maiores valores de r . Este melhor desempenho em ambos os casos pode estar relacionado ao princípio de extração destes métodos, os quais, em função da presença do EDTA, devem ter extraído, preferencialmente, moléculas de fosfato adsorvidas aos átomos de Fe dos colóides inorgânicos, em função do forte efeito complexante do EDTA sobre os átomos de Fe, liberando assim o fosfato ligado ao metal. Este princípio está mais bem associado às formas de P afetadas pelo alagamento do solo, cuja fração Fe-P controla a maior parte do P disponível nos solos. Entretanto, os valores de correlação obtidos por este grupo de métodos quando se retira o solo de Torres não são tão superiores ao Mehlich-1 nesta mesma condição, o que poderia não justificar uma substituição dos procedimentos de análise de rotina em laboratórios. Outro aspecto a ser considerado está relacionado com a facilidade de operação, treinamento de funcionários, custos, disponibilidade de equipamentos.

Na Tabela 15 estão apresentadas as percentagens de P recuperado pelos extratores ácidos fracos. A recuperação de P por EDTA, Texas, Lactato de Ca correlacionou-se negativamente com o teor de argila dos solos de várzea, com coeficientes de correlação de $-0,40^{\text{NS}}$, $-0,61^*$ ($p < 0,05$), e $-0,59^*$ ($p < 0,05$), respectivamente, significativos apenas para Texas e Lactato. Os teores recuperados por Morgan praticamente não foram influenciados pelo teor de argila, com um valor de r de $-0,07^{\text{NS}}$. Percebe-se que a sensibilidade ao FCP ou poder tampão foi maior para os extratores Texas e Lactato de Ca, o que evidencia que há necessidade de enquadramento dos teores de fósforo extraídos nos solos de várzea por estes extratores em classes de disponibilidade baseado no teor de argila ou algum outro parâmetro de solo, que permita a obtenção de diferentes níveis críticos.

Tabela 15 Teor de argila, fósforo adicionado, percentagem de fósforo recuperado por EDTA, Texas, Lactato e Morgan e percentagem de P absorvida em relação ao fósforo aplicado no N2.

Municípios	Argila	P adicionado	P recuperado				P absorvido
			EDTA	Texas	Lactato	Morgan	
	g kg ⁻¹	--mg kg ⁻¹ --	-----%-----				
Camaquã	804	30,9	-6,0	7,2	14,1	1,4	42,1
Torres	680	65,5	17,9	11,3	17,9	3,9	39,7
Dom Pedrito	439	14,1	19,4	7,8	17,6	-1,8	29,7
Uruquaiana 01	370	14,7	6,7	2,0	8,3	25,2	20,8
Uruquaiana 02	330	11,2	15,0	7,3	7,9	-1,2	42,8
Cacapava do Sul	320	12,2	4,5	15,9	23,5	2,1	88,5
Santo Ant. da Patrulha	225	15,9	28,3	10,5	29,9	7,6	55,0
Santa Maria	240	16,3	25,5	13,2	28,0	4,6	47,1
São Gabriel	245	9,7	9,1	7,5	16,0	26,5	18,8
Cachoeirinha	200	6,8	42,9	24,5	34,2	6,2	120,3
Restinga Seca	187	27,8	19,8	14,6	26,5	3,2	14,5
Cachoeira do Sul 01	175	7,1	17,4	14,8	14,8	-0,3	71,0
Cachoeira do Sul 02	128	4,3	-6,7	23,0	46,0	8,4	120,6
Santa Vit. do Palmar	123	2,6	16,5	24,2	80,0	2,3	287,4
Rosário do Sul	83	3,2	20,6	29,2	49,5	2,2	198,0
Paraíso do Sul	88	5,2	36,4	41,0	60,7	3,8	47,5
MÉDIA	290	15,5	16,7	15,9	29,7	5,9	77,7

Os métodos EDTA, Texas, Lactato de Ca e Morgan recuperaram em média, para o conjunto de solos em estudo 16,7; 15,9; 29,7 e 5,9% do P adicionado no N₂, respectivamente. Observa-se que Lactato de Ca foi o método que apresentou a melhor habilidade de recuperação do P aplicado, superando EDTA e Texas, os quais apresentaram maiores coeficientes de correlação com o P absorvido, enquanto que Morgan foi o método de menor capacidade de recuperação, mostrando-se falho também na estimativa de absorção. Assim, no caso da utilização de metodologias como EDTA e Texas, apesar do r ser superior ao Mehlich-1, não estaríamos resolvendo um dos problemas da metodologia atualmente preconizada pela CFS-RS/SC, que é a pequena amplitude no valor da análise entre o solo com teor baixo e o solo com teor alto, permanecendo tal dificuldade na interpretação dos seus resultados.

Correlacionando-se os teores de P obtidos pelos extratores ácidos fracos entre si (Tabela 16), percebe-se que qualquer combinação com os teores obtidos pelo extrator Morgan não se mostrou significativa, diferente do que aconteceu entre os demais métodos. Possivelmente, os extratores Texas e EDTA estiveram melhor correlacionados pela sua maior semelhança quanto ao princípio de extração, ambos com a presença de moléculas complexantes. A boa correlação entre Lactato de Ca e Texas pode estar relacionada ao fato de que ambos recuperaram percentuais do P aplicado que se correlacionaram negativamente e significativamente com o teor de argila e, segundo Novais & Smith (1999), há uma maior chance de encontrar correlações mais altas entre extratores semelhantemente sensíveis ao FCP, quando diferentes solos são envolvidos. Desse modo, os teores extraídos pelo EDTA, cujos percentuais de recuperação não se mostraram significativamente influenciados pelo teor de argila, apresentou um coeficiente de correlação um pouco menor quando relacionado com os teores extraídos pelo Lactato de Ca.

Tabela 16 Coeficientes de correlação linear (r) entre os teores obtidos pelos extratores ácidos fracos diluídos com a presença ou não de agentes complexantes.

Métodos	Morgan	Texas	Lactato de Ca	EDTA
Morgan	-	0,09 ^{NS}	0,06 ^{NS}	0,23 ^{NS}
Texas		-	0,92 ^{**}	0,92 ^{**}
Lactato de Ca			-	0,74 ^{**}
EDTA				-

**Significativo a 1%; ^{NS}= não significativo; N = 48.

4.3.4 Fósforo extraível por soluções alcalinas tamponadas com a presença ou não de agentes complexantes

Os teores de fósforo extraídos por Olsen, NaOH e Oxalato encontram-se nos Anexos 19 a 21. Na Figura 5 estão apresentadas as correlações estabelecidas entre os teores de fósforo obtidos pelos extratores e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz para todo o conjunto de solos em estudo. A maior correlação entre P extraído e P absorvido foi verificada com o extrator NaOH ($r = 0,71^{**}$), seguido por Olsen ($r = 0,64^{**}$) e Oxalato ($r = 0,60^{**}$) ($p < 0,01$). Embora o Extrator NaOH tenha apresentado um valor de r superior ao obtido por Olsen, este último não apresentou uma boa distribuição dos pontos (Figura 5), o que também pode ser observado para o extrator oxalato, dificultando seus empregos como metodologias adequadas para estimativa da disponibilidade de P dos solos.

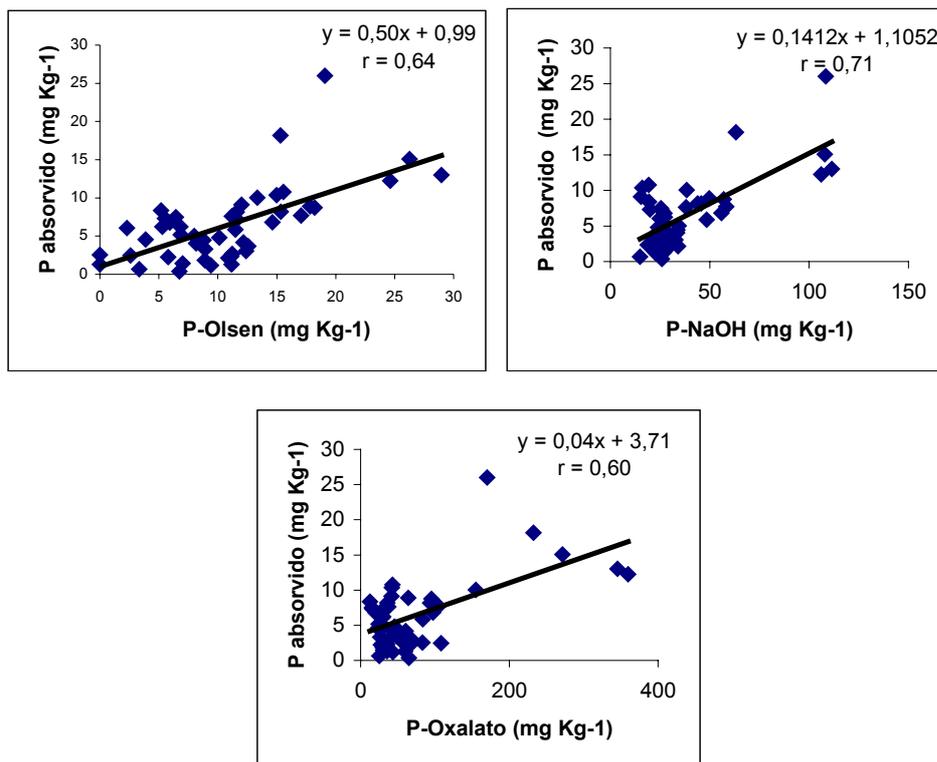


Figura 5 Correlações estabelecidas entre os teores de fósforo pelos extratores Olsen, NaOH e Oxalato e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz.

A exclusão dos pontos relativos ao solo de Torres permitiu a obtenção de melhores coeficientes de correlação linear simples entre os teores extraídos e absorvidos apenas para o extrator Olsen ($r = 0,70^{**}$) ($p < 0,01$). No caso dos extratores NaOH e Oxalato os coeficientes de correlação baixaram para $0,64^{**}$ ($p < 0,01$) e $0,55^{**}$ ($p < 0,01$), respectivamente, sem perder, no entanto, a significância. Estes resultados não confirmam a eficiência esperada para este grupo de extratores na predição da disponibilidade de fósforo para o arroz cultivado em solos alagados. Teoricamente, como a extração por estes métodos ocorre em pH bastante elevado, o que é favorável à extração do fósforo ligado ao ferro (fração predominante) e com pH mais semelhante ao de equilíbrio dos solos de várzea após o alagamento (condição na qual ocorre a absorção de P pelo arroz) (Mahapatra & Patrick, 1969),

estes métodos deveriam apresentar maiores coeficientes de correlação com o P absorvido. O trabalho de Ekpete (1976) mostra bons resultados com o extrator Olsen quanto à estimativa da disponibilidade de P para o arroz irrigado por alagamento, mesmo analisando-se o solo seco. Shahandeh et al. (1994) obtiveram bons resultados com o extrator Oxalato, preconizando a sua utilização para a predição da disponibilidade de P em função da dissolução seletiva do P ligado a óxidos de ferro pouco cristalinos. Esta incapacidade na obtenção de uma estimativa adequada da disponibilidade de P por este grupo de metodologias, a qual já foi verificada para os extratores ácidos fortes e fracos, pode estar relacionada à dificuldade existente em se encontrar uma metodologia eficiente para um conjunto de solos bastante diversos quanto a características químicas e físicas, como os aqui utilizados. Provavelmente, os resultados satisfatórios obtidos pelos autores acima citados estejam relacionados à utilização, em seus trabalhos, de uma menor quantidade e diversidade de solos.

Correlacionando-se os teores de P obtidos pelos extratores alcalinos entre si (Tabela 17) percebemos que qualquer combinação entre os mesmos se mostrou significativa ($p < 0,01$), confirmando a semelhança dos mesmos quanto ao princípio de extração.

Tabela 17 Coeficientes de correlação linear (r) entre as soluções alcalinas tamponadas com a presença ou não de agentes complexantes.

Métodos	Olsen	NaOH	Oxalato
Olsen	-	0,79**	0,76**
NaOH		-	0,92**
Oxalato			-

**Significativo a 1%; N = 48.

4.3.5 Fósforo extraível por resina trocadora de ânions (RTA)

Os teores de fósforo extraídos pela RTA encontram-se no Anexo 22. Na Figura 6 está apresentada a correlação estabelecida entre os teores de fósforo obtidos pela RTA e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz para todo o conjunto de solos em estudo, cujo coeficiente foi significativo ($r= 0,70^{**}$) ($p<0,01$). Este extrator, teoricamente, extrai o P do solo de uma maneira semelhante à absorção das plantas (Silva & Raij, 1999). A exclusão dos pontos correspondentes ao solo de Torres pouco modificou a magnitude do coeficiente de correlação linear simples para a RTA, que aumentou para $0,73^{**}$ ($p<0,01$).

A recuperação de P pela RTA correlacionou-se negativamente e significativamente com o teor de argila dos solos de várzea, com um coeficiente de correlação de $-0,66^{**}$ ($p<0,01$). Percebe-se que a RTA foi sensível ao FCP ou poder tampão, recuperando quantidades menores em solos mais argilosos, como observado por Rheinheimer et al., (2003). Estes dados discordam de Novais & Smith (1999), os quais apontam que não é necessário incluir uma medida do FCP, como argila, CMAP, P-remanescente, etc., na interpretação de níveis críticos (ou faixas de disponibilidade) para os teores extraídos pela RTA, como se faz para extratores ácidos, como o Mehlich-1 em solos de sequeiro. Provavelmente, a RTA não esteja representando a real capacidade dos solos mais argilosos em sustentar a absorção das plantas. Rheinheimer (2000), encontrou uma subestimação de 63% no fósforo lábil (fator Q) com uma única extração em um solo de textura argilosa.

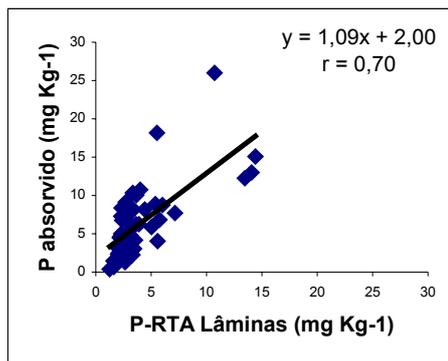


Figura 6 Correlação estabelecida entre os teores de fósforo pelo extrator resina trocadora de ânions (RTA) em lâminas e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz.

A RTA recuperou, em média, 10,7% do P aplicado para a obtenção de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ na solução dos solos em estudo. Assim, no caso da adoção da RTA, metodologia cogitada para utilização em substituição ao Mehlich-1, atualmente preconizado pela CFS-RS/SC, provavelmente também não se resolveria o problema da pequena amplitude no valor da análise entre o solo com teor *baixo* e o solo com teor *alto*, e permaneceriam dificuldades na interpretação dos seus resultados para os solos sob cultivo de arroz irrigado.

4.3.6 P-Remanescente

Os teores de fósforo remanescentes na solução de equilíbrio após 1h de contato com a solução extratora contendo 60 mg L^{-1} de P em CaCl_2 0,001M encontram-se no Anexo 23. Na Figura 7 estão apresentadas as correlações estabelecidas entre os teores de fósforo remanescentes na solução e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz para todo o conjunto de solos em estudo. O coeficiente de correlação foi baixo, $r = -0,33^{\text{NS}}$, e não significativo. A exclusão do solo de Torres do estudo de correlações não melhorou a correlação para os métodos. Possivelmente, deverão ser estabelecidos níveis críticos para grupos de solos, a exemplo

da interpretação dos teores de P-remanescente do estado de Minas Gerais, buscando uma melhoria destas correlações, pois os teores fósforo remanescentes estão estreitamente relacionados com o teor de argila e com CMAP dos solos (Novais & Smith, 1999).

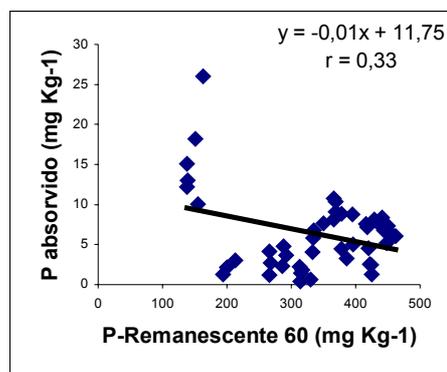


Figura 7 Correlações estabelecidas entre os teores de fósforo remanescentes na solução com a aplicação de 60 mg L⁻¹ de P e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz.

Considerando que nenhuma das metodologias avaliadas supera o método Mehlich-1, utilizando-se todo o conjunto de solos, a separação destes solos em grupos com características que estão relacionadas à adsorção de P (Novais & Smith, 1999) ou com as reações de oxi-redução de solos alagados e que afetam a disponibilidade de fósforo, como teor de argila, de matéria orgânica e de fósforo total (Grande et al., 1986), parece ser inevitável para aprimorar a eficiência do Mehlich-1 ou dos outros métodos avaliados. Assim, mesmo que o princípio de extração destes métodos não seja o mais adequado, poderíamos obter boas correlações com os teores absorvidos pelas plantas de arroz, produzindo-se diferentes valores de nível crítico para cada grupo de solos. Essa é uma estratégia adotada para a interpretação dos teores extraídos por Mehlich-1 em solos de sequeiro do RS e permitiu a obtenção de uma boa estimativa do P-disponível às culturas nesses solos.

4.3.7 Separação dos solos em grupos com base em características que estão relacionadas à adsorção de P e/ou com as reações de oxi-redução.

Em função dos coeficientes de correlação relativamente baixos entre P acumulado e os teores de P determinados nos solos por cada um dos métodos, quando se considera um único conjunto com todos os solos, buscou-se agrupa-los de acordo com características relacionadas à adsorção de P e/ou com as reações de oxi-redução. Para tal poderiam ser utilizados os valores de CMAP, teores de argila, teores de ferro extraídos por oxalato, P total, etc, os quais influenciam direta ou indiretamente a disponibilidade de P após o alagamento do solo e poderiam influenciar o diagnóstico da disponibilidade do P no solo seco. Dessa forma, optou-se pela utilização dos teores de argila das amostras, de maneira semelhante como é feito para os solos de sequeiro, especialmente pelo fato de que esse parâmetro já é determinado em análises de rotina em laboratórios de análises de solo.

Para a realização deste agrupamento, avaliou-se a separação em diferentes faixas de teores de argila no intuito de integrar em um mesmo grupo os solos com comportamento semelhante quanto ao fornecimento de P à cultura do arroz. A partir desta avaliação preliminar, chegou-se a uma proposta de agrupamento, a qual utiliza as seguintes faixas:

Classe 1: > 400 g kg⁻¹ de argila. Corresponde aos solos coletados nos municípios de Camaquã e Dom Pedrito.

Classe 2: entre 260 e 400 g kg⁻¹ de argila. Corresponde aos solos coletados nos municípios de Uruguaiana e Caçapava do Sul.

Classe 3: entre 110 e 250 g kg⁻¹ de argila. Corresponde aos solos coletados nos municípios de Santo Antônio da Patrulha, Santa Maria, São Gabriel, Cachoeirinha, Restinga Seca, Cachoeira do Sul e Santa Vitória do Palmar.

Classe 4: < 100 g kg⁻¹ de argila. Corresponde aos solos coletados nos municípios de Rosário do Sul e Paraíso do Sul.

De um modo geral, a adoção deste procedimento proporcionou um aumento dos coeficientes de correlação linear entre os teores extraídos pelos métodos e os teores absorvidos pelas plantas de arroz para os solos mais argilosos (Classe 1) e para os solos mais arenosos (Classe 4) (Tabela 18). No entanto, os coeficientes de correlação para os solos das Classes 2 e 3 apresentaram um comportamento variável de acordo com o método de análise, ora com valores superiores e ora com valores inferiores comparativamente ao valor de r dos solos em estudo como integrantes de um único grupo.

Considerando-se o efeito do agrupamento dos solos sobre a estimativa da disponibilidade de P por Mehlich-1, verifica-se uma nítida melhoria no coeficiente de correlação linear entre o P-extraído por este método e o P-absorvido pelas plantas de arroz. Dentre as quatro classes propostas, três delas apresentaram valores de r bastante superiores, comparativamente ao não agrupamento, e outra classe apresentou um valor inferior, embora bastante próximo daquele obtido sem agrupamento. Estes dados demonstram mais uma vez a grande diversidade de solos em que se cultiva arroz no RS e a necessidade de interpretação diferenciada dos teores de fósforo extraídos por este método. O método Mehlich-3, apresentado por alguns pesquisadores como um possível substituto ao Mehlich-1 para a estimativa da disponibilidade de P nos solos do RS e SC, apresentou um comportamento semelhante ao Mehlich-1 quando os solos foram separados em grupos, melhorando a sua correlação com o P absorvido em 3 das 4 classes propostas. A RTA, embora tenha se mostrado sensível ao poder tampão dos solos, apenas apresentou valores de r superiores para os grupos de solos com valores extremos de textura, como a Classe 1 e a Classe 4. Assim, é possível que as quantidades extraídas pela RTA sejam bastante dependentes também de outros fatores adicionais ao teor de argila dos solos e, desta forma, serão necessários mais estudos no intuito de aprimorar esta proposta inicial de agrupamento de solos para a RTA.

Tabela 18 Coeficientes de correlação linear simples (r) entre os teores de fósforo obtidos pelos extratores e as quantidades de fósforo absorvidas pelo arroz considerando todos os solos como um único conjunto e separando os solos em grupos de acordo com o seu conteúdo de argila.

Métodos	Geral	Classes de solo de acordo com a textura*			
		1	2	3	4
Mehlich-1	0,74	0,97	0,96	0,68	0,96
Mehlich-2	0,65	0,98	0,96	0,59	0,99
Mehlich-3	0,62	0,98	0,98	0,54	0,84
Bray-1	0,43	0,98	0,96	0,57	0,99
Bray-2	0,67	0,98	0,98	0,67	0,93
H ₂ SO ₄ SP	0,80	0,98	0,97	0,65	0,95
Morgan	0,18	0,96	-0,55	0,24	0,99
Texas	0,79	0,97	0,68	0,86	0,86
Lactato de Ca	0,70	0,97	0,97	0,90	0,99
EDTA	0,80	0,96	0,99	0,83	0,40
Olsen	0,70	0,98	0,78	0,58	0,80
NaOH	0,64	0,98	-0,70	0,54	-0,31
Oxalato	0,55	0,93	-0,53	0,29	0,60
RTA	0,73	0,99	0,56	0,54	0,97
P-Remanescente	0,33	0,97	0,91	0,63	0,96

*Classe 1: > 400 g kg⁻¹ de argila. Corresponde aos solos coletados nos municípios de Camaquã e Dom Pedrito (N = 6).

Classe 2: entre 260 e 400 g kg⁻¹ de argila. Corresponde aos solos coletados nos municípios de Uruguaiana e Caçapava do Sul (N = 9).

Classe 3: entre 110 e 250 g kg⁻¹ de argila. Corresponde aos solos coletados nos municípios de Santo Antônio da Patrulha, Santa Maria, São Gabriel, Cachoeirinha, Restinga Seca, Cachoeira do Sul e Santa Vitória do Palmar (N = 24).

Classe 4: < 100 g kg⁻¹ de argila. Corresponde aos solos coletados nos municípios de Rosário do Sul e Paraíso do Sul (N = 6).

Nota: Os coeficientes de correlação apresentados nesta tabela foram obtidos após a exclusão do solo coletado no município de Torres.

Para os métodos Lactato de Ca e P-remanescente, ambos sensíveis ao poder tampão, conforme discutido nos itens anteriores, o agrupamento dos solos proporcionou a obtenção de valores de r superiores em todas as classes comparativamente ao não agrupamento de solos. É interessante salientar que este agrupamento de solos é uma versão preliminar que precisa ser validada com estudos futuros, especialmente através da utilização de um número maior de solos, de tal modo que tenhamos uma maior representatividade dentro de cada grupo formado.

5. CONCLUSÕES

- 1 – Os solos de várzea do RS apresentam uma grande variação na quantidade de P total e na distribuição das formas de P inorgânico, sendo que a fração Fe-P é a de maior contribuição para o P-lábil antes e após o alagamento. A capacidade máxima de adsorção de P também foi bastante variável entre os solos, resultando em um distinto comportamento quanto à disponibilidade de P à cultura do arroz irrigado por inundação;
- 2 – Dos diversos métodos testados para avaliação da disponibilidade de fósforo nos solos de várzea ao arroz irrigado por inundação, o H₂SO₄ SP, Texas, Lactato de Ca, EDTA, Olsen e RTA se assemelharam à eficiência obtida com o extrator Mehlich-1, atualmente empregado no RS, enquanto que os demais métodos tiveram eficiência inferior. Esses resultados não permitem indicar a substituição pura e simples do método atualmente empregado por algum dos testados;
- 3 – A inclusão de características relacionadas ao poder tampão de fósforo, como o teor de argila, na interpretação dos teores de fósforo extraído, aumenta a capacidade preditiva dos métodos dentro de algumas das classes empregadas, com destaque para o Mehlich-1, Bray-1, Bray-2, Lactato de Ca e P-remanescente.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGHINONI, I.; VOLKWEISS, S. J. Recomendações de uso de fertilizantes no Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1984, Brasília: EMBRAPA-DEP., p. 179-204, 1984.
- ANGHINONI, I.; VOLKWEISS, S. **Fósforo**. In: GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; TEDESCO, M.J. (eds.). Princípios de fertilidade do solo. Porto Alegre: Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, UFRGS, 1995. p. 99-120.
- AMER, F.; BOULDIN, D. R.; BLACK, C. A. et al. Characterization of soil phosphorus by anion exchange resin adsorption and P^{32} equilibration. **Plant and Soil**, The Hague, v. 6 p. 391-408, 1955.
- ASYLING, H.C. Phosphate potencial and phosphate status of soils. **Acta Agric. Scand.**, v. 14, p. 261-285, 1964.
- BAHIA FILHO, A.F.C.; BRAGA, J. M.; RIBEIRO, A.C.; NOVAIS, R.F. Sensibilidade de extratores químicos a capacidade tampão de fósforo. **R. Bras. Ci. Solo**, v.7, p. 243-249, 1983.
- BAHIA FILHO, A.F.C.; VASCONCELLOS, C.A.; SANTOS, H.L.; MENDES, J.F. PITTA, G.V.E.; OLIVEIRA, A.C. Formas de fósforo inorgânico e fósforo "disponível" em um latossolo Vermelho-Escuro, fertilizado com diferentes fosfatos. **R. Bras. Ci. Solo**, v.6, p. 99-104, 1982.
- BAKER, D.E.; HALL, J.K. Measurements of phosphorus availability in acid soils of Pennsylvania. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.** v. 31, p.662-667, 1967.
- BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability**: a mechanistic approach. 2. ed. New York: J. Wiley, 1995. 414 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. Levantamento de reconhecimento dos solos do Rio Grande do Sul. Recife, 1973. 431 p. (Boletim Técnico)
- BRAY, R.H.; KURTZ, L.T. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. **Soil Sci.**, v. 59, p. 39-45, 1945.

- CATANI, R.A.; GARGANTINI, H. Extração do fósforo do solo pelo método de Neubauer e por métodos químicos. **Bragantia**. Campinas. v. 13(4), p.55-62, 1954.
- CHANG, S.C. **Evaluation of the 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 Sci.** Oxford. V. 84, p. 133-144, 1957.
- COLEMAN, D.C.; OADES, J.M.; UEHARA, G. **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Univ. of Hawaii, 1989.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC **Recomendação de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3^o ed. Passo Fundo, SBCS/NRS/EMBRAPA/CNPT. 224 p., 1995.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC **Alterações nas recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre: NRS/SBCS, 2001. 4p. (circular técnica, 2).
- 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**. 10^o ed. Porto Alegre: NRS/SBCS, 2004. 400p.
- CONDRON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. **J. Soil Sci.**, Oxford, v.36(1), p.199-207, 1985.
- DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **J Environ. Qual**, Madison, v 6(1), p. 82-85, 1977.
- EKPETE, D.M. Evaluation of chemical methods for the determination of available phosphorus in waterlogged soils. **Soil Sci.** v. 121(4), 7-221, 1976.
- EMBRAPA – CNPS. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: EMBRAPA. 212 p., 1997.

- FARDEAU, J.C.; JAPPE, J. Nouvelle méthode de détermination du phosphore assimilable par les plantes: extrapolation des cinétiques de dilution isotopique. **CR Academic Science**, Paris, v. 282, p. 1137-1140, 1976.
- FASSBENDER, H.W. **Química de suelos**. San José, Instituto interamericano de ciencias agrícolas, 398 p., 1980.
- FERREIRA, N.C.M.; MAGALHÃES, A.F. Adsorção de fósforo em solos do Rio Grande do Sul. I – Aplicabilidade da isoterma de Langmuir na descrição da adsorção de fósforo no solo. **Agron. Sulriograndense**, Porto Alegre, V. 10(2), p. 281-288, 1974.
- FIFE, C.V. An evaluation of ammonium fluoride as a selective extractant for aluminum-bound soil phosphate. **Soil Sci.** v. 93, p. 113-123, 1962.
- FOX, R.L.; KAMPRATH, E.J. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v. 34, p. 902-907, 1970.
- FRIED, M.; SHAPIRO, R.E. Phosphate supply pattern of various soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** v. 20, p. 471-475, 1956.
- 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.
- 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.
- HARTER, R.B.; BAKER, D.E. Applications and misapplications of the Langmuir equation to soil adsorption phenomena. **Soil sci. Soc. Am. J.** Madison. v 41, p. 1077-1080, 1977.
- HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil sci. Soc. Am. J.** Madison. v 46, p. 970-976, 1982.
- HOLFORD, I.C.R.; MATTINGLY, G.E.G. Phosphate adsorption and plant availability of phosphate. **Plant Soil**, v. 44, p. 377-389, 1976.

- HUE, N. V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. **Soil Sci.** Oxford. v 152, p. 463-471, 1991.
- IRGA – Instituto Riograndense do Arroz. Disponível na internet via www. URL:
http://irga.rs.gov.br/index.php?action=dados_safra . Acesso em 15 de novembro de 2004.
- KÄMPF, N. O ferro no solo. In: 1º Reunião sobre ferro em solos inundados. **Anais.** Goiânia: CNAF/EMBRAPA, p. 35-71, 1988.
- KAMPRATH, E.J.; WATSON, M. E. Conventional soil and tissue tests for assessing the phosphorus status of soils. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J.(eds) **The role of phosphorus in agriculture.** Madison, American Society of Agronomy, 1980. p. 433-469.
- KHALID, R.A.; PATRICK Jr, W.H.; DELAUNE, R.D. Phosphorus sorption characteristics of flooded soils. **Soil sci. Soc. Am. J.** Madison. v 41, 305-309, 1977.
- KUO, S. Phosphorus. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C.T.; SUMNER, M.E. (eds) **Methods of Soil Analysis: Chemical Methods.** SSSA, Madison, p. 869-920, 1996.
- LABHSETWAR, V.K.; SOLTANPOUR, P.N. A comparison of NH_4HCO_3 -DTPA, NaHCO_3 , CaCl_2 , and Na_2 -EDTA soil tests for phosphorus. **Soil sci. Soc. Am. J.**, Madison. v 49, p. 1437-1440, 1985.
- LARSEN, S. Soil phosphorus. **Advances in Agronomy**, v. 19, p. 151-210, 1967.
- MACHADO, M. I. C. S.; BRAUNER, J. L.; VIANNA, A. C. T. Formas de fósforo na camada arável de solos do Rio Grande do Sul. **R. bras. Ci. Solo**, Campinas, v. 17, p. 331-336, 1993.
- MAHAPATRA, I.C.; PATRICK JR, W.H. Inorganic phosphate transformation in waterlogged soils. **Soil Sci.** v. 107, p. 281-288, 1969.

- McAULIFFE, C.D.; HALL, N.S.; DEAN, L.A.; HENDRICKS, S.B. Exchange reactions between phosphates and soils; Hydroxylic surfaces of soil minerals. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v. 12, p. 119-123, 1948.
- McBRIDE, M.B. **Environmental chemistry of soils**. New York, Oxford University Press, 1994. 406p.
- MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄ by North Carolina Soil Testing Laboratoris**. Raleigh: University of North Carolina, 1953. (mimeografado).
- MEHLICH, A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, New York. v 9, p. 477-492, 1978.
- MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, New York. v 15, p. 1409-1416, 1984.
- MENON, R.G.; HAMMOND, L.L.; SISSINGH, H.A. Determination of plant-available phosphorus by the iron hidroxide-impregnated filter paper (Pi) soil test. **Soil sci. Soc. Am. J.** v. 52, p. 110-115, 1988.
- 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.
- MIELNICZUK, J. **Análises de solo e sua interpretação**. In: GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; TEDESCO, M.J. (eds.). **Princípios de fertilidade do solo**. Porto Alegre: FA/DS, UFRGS, p. 33-46, 1995.
- MIOLA, G.R. **Extração de P, K, Ca e Mg do solo por diferentes métodos e avaliação da disponibilidade de P para as plantas**. Porto Alegre, 1995. 127p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.
- MOORMANN, F.R.; VAN BREEMEN, N. **Rice: soil, water, land**. Los Banös, Int. Rice Res. Inst., p. 140-142, 1978.
- MURRMANN, R.P.; PEECH, M. Effect of pH on labile and soluble phosphate in soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** v. 33, p. 205-210, 1969.

- MURPHY, J. RILEY, J. P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**. v 27, p. 31-36, 1962.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV. 399 p., 1999.
- NOVAIS, R. F.; KAMPRATH, E.J. Fósforo recuperado em três extratores químicos como função do fósforo aplicado no solo e do “fator capacidade”. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 3, p. 41-46, 1979.
- OLSEN, S.R.; COLE, C.V.; WATANABE, F.S.; DEAN, L.A. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. Washington: USDA, 1954. (USDA Circ., 939)
- PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**. San Diego. v 30, p. 01-46, 1978.
- 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.
- PINTO, L.F.S.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A.S. et al. **Caracterização dos solos de várzea**. In: GOMES, A.S.; PAULETTO, E.A. (Eds.) Manejo do solo e da água em áreas de várzea. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p.11-36.
- PONNAMPERUMA, F.N. The chemical of submerged soils. **Advances in Agronomy**. v. 24, p. 29-96, 1972.
- RHEINHEIMER, D.S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- 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. V. 33, p. 1053-1059, 2003.
- RYDEN, J.C.; SYERS, J.K. Origin of the labile pool of phosphate in soils. **Soil Sci**. v. 123, p. 353-361, 1977.
- SAH, R.N.; MIKKELSEN, D.S. Transformations of inorganic phosphorus during the flooding and draining cycles of soil. **Soil Sci. Am. J.**, Madison. v 50, p. 62-67, 1986.

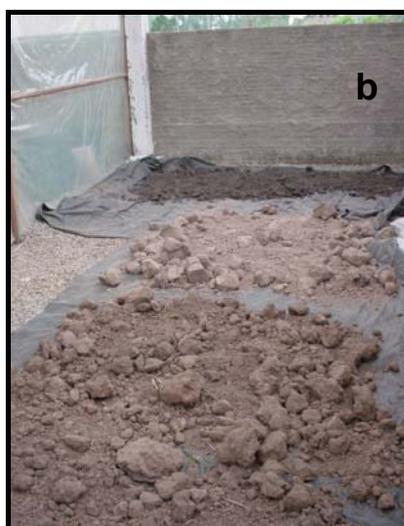
- SAS System Institute. Sas procedure guide, Release 6.03 Edition. Cary, NC: SAS Institute Inc., 441 p., 1988.
- SHOFIELD, R.K. Can a precise meaning be given to "available" soil phosphorus? **Soils Fert.**, v. 18, p. 373-375, 1955.
- SCHWERTMANN, U.; KOMADA, H.; RISCHER, W.R. Mutual interaction between organics and iron oxides. In: HUANG, P.M.; SCHNITER, M. (Eds) **Interaction of soil minerals with natural organics and microbes**. Madison: SSSA, 1986. Special publication n° 17. Chapter 7, p. 223-250.
- SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R.E. Iron oxides. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. **Minerals in soil environments**. Madison: SSSA, p. 379-438, 1989.
- SHARPLEY, A.N.; CURTIN, D.; SYERS, J.K. Changes in water-extractability of soil inorganic phosphate induced by sodium saturation. **Soil sci. Soc. Am. J.** v. 52, p. 637-640, 1988.
- SHARPLEY, A. N.; TIESSEN, H.; COLE C.V. Soil phosphorus forms extracted by soil tests as a function of pedogenesis. **Soil Sci. Am. J.**, Madison. v 51, p. 362-365, 1987.
- SHAHANDEH, H.; HOSSNER, L.R.; TURNER, F.T. Phosphorus relationships in flooded rice soils with low extractable phosphorus. **Soil sci. Soc. Am. J.** Madison. v 58, p. 1184-1189, 1994.
- SILVA, F. C.; RAIJ, B. V. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília. v 34, p. 267-288, 1999.
- SIMS, J.T. Comparison of Mehlich 1 and Mehlich 3 extractants for P, K, Ca, Mg, Mn, Cu and Zn in atlantic coastal plain soils. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, New York. v 20, p. 1707-1726, 1989.
- SMITH, A.N. Distinction between iron and aluminum phosphate in Chang and Jackson's procedure for fractionating inorganic soil phosphorus. **Agrochimica**, v. 9, p. 162-168, 1965.
- SOMMERS, L.E.; NELSON, D.W. Determination of total phosphorus in soils: A rapid perchloric acid digestion procedure. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, v. 36, p.902-904, 1972.

- SOUSA, R.O.; GOMES, A.S.; VAHL, L.C. **Toxidez por ferro em arroz irrigado**. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES Jr, A. M. (Ed) Arroz irrigado no sul do Brasil, 1º ed. Brasília, DF, EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004, p.305-337.
- SPARKS, D. **Environmental soil chemistry**. San Diego: Academic Press, 1995. 267 p.
- SPOSITO, G. **Chemical equilibria and kinetics in soil**. New York: Oxford University Press, 1994. 268p.
- STEFFENS, D. Phosphorus release kinetics and extractable phosphorus after long-term fertilization. **Soil sci. Soc. Am. J.** Madison. v 58, p. 1702-1708, 1994.
- STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C.; SCHNEIDER, P. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 2002. 107 p.
- 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. 174 p.
- TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. et al. **Soil fertility and fertilizers**. 5. ed. New York: MacMillan Publishing Company, 1995. 634 p.
- TRAN, T.S.; FARDEAU, J.C.; GIROUX, M. Effects of soil properties on plant-available phosphorus determined by the isotopic dilution phosphorus-32 method. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 52, p. 1383-1390, 1988.
- TRAN, T.S.; GIROUX, M.; GUILBEAULT, J.; AUDESSE, P. Evaluation of Mehlich-3 extractant to estimate the available P in Quebec soils. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, New York. v 21, p. 1-28, 1990.
- WILLIAMS, J.D.H.; SYERS, J.K.; WALKER, T.W. Fractionation of soil inorganic phosphate by a modified Chang & Jackson's procedure. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, v. 31, p.736-739,1967.
- WOLF, A .M.; BAKER, D.E. Comparisons of soil test phosphorus by Olsen, Bray 1, Mehlich 1 and Mehlich 3 methods. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, New York. v 16, p. 467-484, 1985.

- VAN DER ZEE, S.E.A.T.M.; FOKKINK, L.G.J.; VAN RIEMSDIJK, W.H. A new technique for assessment of reversibly adsorbed phosphate. **Soil Sci. Soc. Am. J.** v. 51, p. 599-604, 1987.
- VAHL, L.C. **Toxidez de ferro em genótipos de arroz irrigado por alagamento**. Porto Alegre, 1991. 173 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.
- VAHL, L.C. **Fertilidade de solos de várzea**. In: GOMES, A.S.; PAULETTO, E.A. (Eds.) Manejo do solo e da água em áreas de várzea. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p. 119-162.

7. ANEXOS

Anexo 01 Ilustração demonstrando a coleta do solo (a), secagem ao ar (b), incubação com calcário em sacos plásticos (c) e abertura semanal dos sacos plásticos (d).



Anexo 02 Ilustração demonstrando o solo acomodado dentro de baldes (a), as plântulas de arroz logo após o trasplante (b) e as plantas de arroz antes e após o alagamento(c, d).



Anexo 03 Esquema demonstrando desenvolvimento das plantas de arroz na casa de vegetação.



Anexo 04 Coleta da parte aérea (massa fresca) do experimento de casa de vegetação realizada 45 dias após o transplante para os baldes.



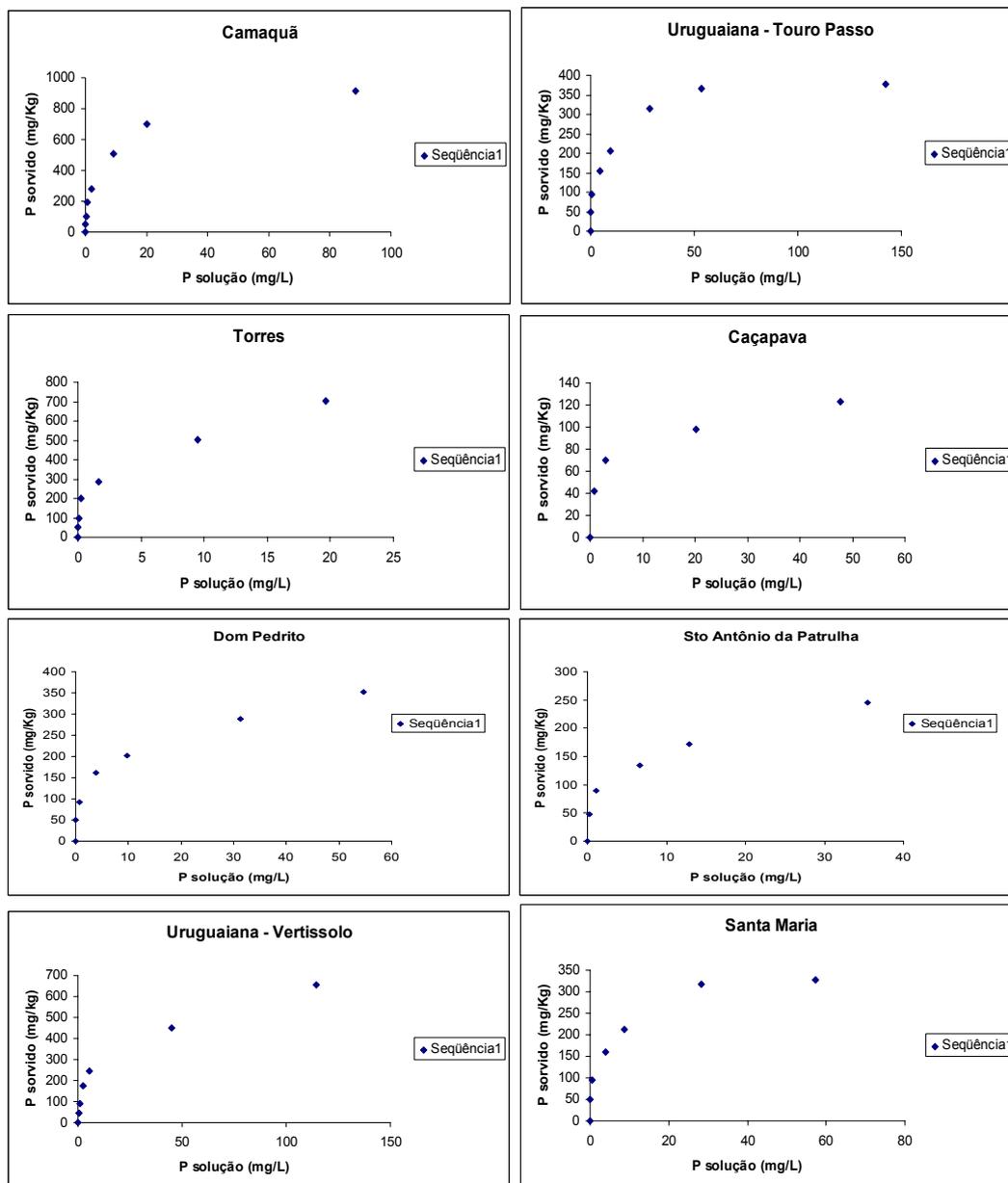
Anexo 05 Produção de massa seca em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 ($0,2 \text{ mg L}^{-1}$ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Massa seca		
	N_0	N_1	N_2
	----- g vaso ⁻¹ -----		
Camaquã	16,57	18,51	16,77
Torres	24,85	33,26	39,47
Dom Pedrito	5,07	9,18	11,24
Uruguaiana 01	6,62	9,66	13,13
Uruguaiana 02	8,14	11,84	14,52
Caçapava do Sul	14,94	16,61	16,86
Sto Antônio da Patrulha	13,71	14,30	14,29
Santa Maria	10,18	11,90	13,29
São Gabriel	2,00	5,61	7,58
Cachoeirinha	13,51	13,24	14,28
Restinga Seca	3,24	7,5	9,97
Cachoeira do Sul 01	8,29	8,47	8,99
Cachoeira do Sul 02	8,55	12,54	10,30
Santa Vitória do Palmar	15,61	16,93	13,71
Rosário do Sul	11,46	11,01	11,53
Paraíso do Sul	4,98	6,88	7,18

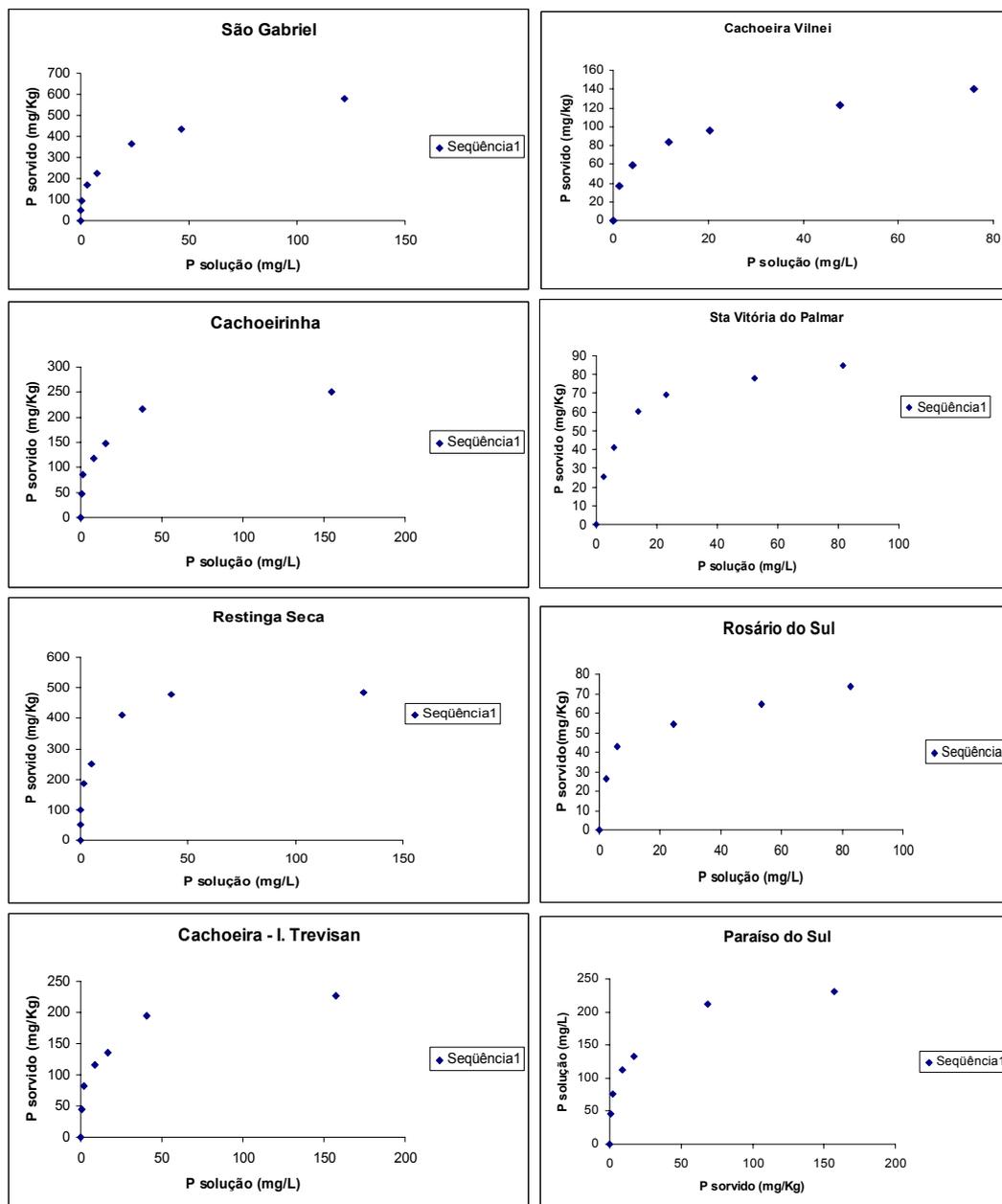
Anexo 06 Teor de P na massa seca em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 ($0,2 \text{ mg L}^{-1}$ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Teor de P		
	N_0	N_1	N_2
	----- % -----		
Camaquã	0,30	0,33	0,31
Torres	0,16	0,22	0,26
Dom Pedrito	0,09	0,12	0,15
Uruguaiana 01	0,08	0,09	0,09
Uruguaiana 02	0,11	0,12	0,13
Caçapava do Sul	0,24	0,25	0,26
Sto Antônio da Patrulha	0,24	0,25	0,24
Santa Maria	0,23	0,23	0,23
São Gabriel	0,07	0,10	0,10
Cachoeirinha	0,21	0,23	0,23
Restinga Seca	0,08	0,12	0,16
Cachoeira do Sul 01	0,16	0,21	0,22
Cachoeira do Sul 02	0,21	0,22	0,20
Santa Vitória do Palmar	0,19	0,20	0,22
Rosário do Sul	0,21	0,23	0,22
Paraíso do Sul	0,10	0,15	0,14

Anexo 07 Adsorção de P em função da aplicação de níveis crescentes de P (0, 50, 100, 200, 300, 600, 900 e 1800 mg Kg⁻¹ de P) aos solos coletados nos diferentes municípios.



Anexo 08 Adsorção de P em função da aplicação de níveis crescentes de P (0, 50, 100, 200, 300, 600, 900 e 1800 mg Kg⁻¹ de P) aos solos coletados nos diferentes municípios.



Anexo 09 Fósforo disponível pós-incubação por Mehlich-1 em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Fósforo disponível por Mehlich-1		
	N_0	N_1	N_2
	----- mg kg ⁻¹ de solo -----		
Camaquã	19,51	21,67	24,17
Torres	3,89	5,81	11,18
Dom Pedrito	5,91	5,28	6,55
Uruguaiana 01	2,66	3,17	3,50
Uruguaiana 02	2,31	2,75	3,20
Caçapava do Sul	12,64	12,89	15,32
Sto Antônio da Patrulha	11,95	13,94	16,76
Santa Maria	13,13	15,72	18,35
São Gabriel	2,13	2,93	3,43
Cachoeirinha	9,29	10,22	12,30
Restinga Seca	5,71	11,66	13,71
Cachoeira do Sul 01	5,33	7,31	10,10
Cachoeira do Sul 02	11,16	11,87	13,25
Santa Vitória do Palmar	8,13	8,35	9,17
Rosário do Sul	16,40	17,05	18,71
Paraíso do Sul	11,88	12,56	13,24

Anexo 10 Fósforo disponível por Mehlich-2 pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Fósforo disponível por Mehlich-2		
	N_0	N_1	N_2
	----- mg kg ⁻¹ de solo -----		
Camaquã	20,73	21,48	23,92
Torres	4,46	5,52	9,15
Dom Pedrito	2,47	3,63	4,30
Uruguaiana 01	2,15	2,08	2,24
Uruguaiana 02	2,63	2,82	3,18
Caçapava do Sul	4,06	5,25	5,87
Sto Antônio da Patrulha	7,47	8,54	9,93
Santa Maria	9,90	11,27	12,26
São Gabriel	1,34	1,63	2,07
Cachoeirinha	6,68	7,43	8,56
Restinga Seca	4,55	7,71	11,76
Cachoeira do Sul 01	3,36	3,77	4,44
Cachoeira do Sul 02	6,89	7,43	7,86
Santa Vitória do Palmar	7,30	7,34	8,13
Rosário do Sul	13,97	14,78	15,16
Paraíso do Sul	10,10	11,26	11,47

Anexo 11 Fósforo disponível por Mehlich-3 pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Fósforo disponível por Mehlich-3		
	N_0	N_1	N_2
	----- mg kg ⁻¹ de solo -----		
Camaquã	23,28	25,55	27,55
Torres	5,37	7,82	13,94
Dom Pedrito	3,28	4,21	5,17
Uruguaiana 01	1,34	1,76	2,05
Uruguaiana 02	2,14	2,30	2,90
Caçapava do Sul	4,48	5,36	6,33
Sto Antônio da Patrulha	9,91	11,90	14,86
Santa Maria	13,53	15,51	18,09
São Gabriel	1,11	2,00	2,70
Cachoeirinha	6,75	7,33	9,33
Restinga Seca	5,60	10,30	15,34
Cachoeira do Sul 01	3,74	4,47	5,81
Cachoeira do Sul 02	7,21	5,73	7,64
Santa Vitória do Palmar	6,48	6,81	7,36
Rosário do Sul	14,05	17,69	18,15
Paraíso do Sul	10,59	12,56	14,35

Anexo 12 Fósforo disponível por Bray-1 pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Fósforo disponível por Bray-1		
	N_0	N_1	N_2
	----- mg kg ⁻¹ de solo -----		
Camaquã	9,03	10,53	11,26
Torres	2,02	2,60	5,80
Dom Pedrito	1,59	2,07	2,94
Uruguaiana 01	0,42	0,54	0,71
Uruguaiana 02	0,94	1,53	1,78
Caçapava do Sul	2,37	3,01	3,74
Sto Antônio da Patrulha	5,61	6,13	7,04
Santa Maria	7,24	8,78	10,98
São Gabriel	0,47	0,85	1,06
Cachoeirinha	4,49	5,18	5,97
Restinga Seca	3,30	6,32	10,64
Cachoeira do Sul 01	2,25	2,29	3,06
Cachoeira do Sul 02	5,02	5,32	5,99
Santa Vitória do Palmar	5,30	5,24	5,75
Rosário do Sul	14,30	15,70	15,83
Paraíso do Sul	7,57	8,53	9,44

Anexo 13 Fósforo disponível por Bray-2 pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Fósforo disponível por Bray-2		
	N_0	N_1	N_2
	----- mg kg ⁻¹ de solo -----		
Camaquã	23,93	24,47	26,44
Torres	4,80	7,44	11,10
Dom Pedrito	2,73	3,65	4,26
Uruguaiana 01	1,32	1,74	1,95
Uruguaiana 02	2,19	2,21	3,22
Caçapava do Sul	6,76	8,72	9,87
Sto Antônio da Patrulha	11,58	13,42	16,21
Santa Maria	12,96	15,01	16,83
São Gabriel	1,40	1,57	2,04
Cachoeirinha	9,22	10,46	11,72
Restinga Seca	8,34	10,48	13,89
Cachoeira do Sul 01	5,56	6,10	7,33
Cachoeira do Sul 02	9,47	10,39	10,83
Santa Vitória do Palmar	7,91	7,82	9,25
Rosário do Sul	16,98	18,88	19,46
Paraíso do Sul	12,78	14,17	15,76

Anexo 14 Fósforo disponível por H₂SO₄ SP pós-incubação em função da aplicação dos níveis N₀(sem aplicação de P), N₁(1/2 da quantidade de P aplicada no N₂) e N₂ (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Fósforo disponível por H ₂ SO ₄ SP		
	N ₀	N ₁	N ₂
	----- mg kg ⁻¹ de solo -----		
Camaquã	42,14	46,50	51,04
Torres	12,39	15,05	24,98
Dom Pedrito	9,36	10,64	12,01
Uruguaiana 01	8,06	8,50	9,58
Uruguaiana 02	6,81	7,96	9,04
Caçapava do Sul	20,09	23,93	23,99
Sto Antônio da Patrulha	18,14	20,49	24,94
Santa Maria	19,14	22,08	25,62
São Gabriel	5,68	6,07	6,90
Cachoeirinha	12,20	14,61	15,68
Restinga Seca	9,88	13,85	19,54
Cachoeira do Sul 01	11,03	12,08	13,33
Cachoeira do Sul 02	13,94	14,69	16,26
Santa Vitória do Palmar	11,43	11,10	12,52
Rosário do Sul	20,05	21,81	22,09
Paraíso do Sul	15,47	18,16	17,80

Anexo 15 Fósforo disponível por Morgan pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Fósforo disponível por Morgan		
	N_0	N_1	N_2
	----- mg kg ⁻¹ de solo -----		
Camaquã	4,39	4,70	4,81
Torres	2,15	2,52	4,72
Dom Pedrito	2,32	1,82	2,07
Uruguaiana 01	1,67	5,35	5,37
Uruguaiana 02	5,86	6,46	5,72
Caçapava do Sul	2,19	2,24	2,45
Sto Antônio da Patrulha	2,97	3,30	4,18
Santa Maria	2,48	2,81	3,24
São Gabriel	1,37	3,75	3,95
Cachoeirinha	2,68	3,40	3,10
Restinga Seca	2,44	2,66	3,33
Cachoeira do Sul 01	2,29	1,98	2,27
Cachoeira do Sul 02	2,42	2,43	2,78
Santa Vitória do Palmar	2,84	2,76	2,90
Rosário do Sul	3,21	3,10	3,28
Paraíso do Sul	1,65	1,76	1,85

Anexo 16 Fósforo disponível por Texas pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 ($0,2 \text{ mg L}^{-1}$ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Fósforo disponível por Texas		
	N_0	N_1	N_2
	----- mg kg ⁻¹ de solo -----		
Camaquã	14,62	14,68	16,84
Torres	4,06	7,13	11,47
Dom Pedrito	2,53	3,11	3,63
Uruguaiana 01	2,16	2,16	2,46
Uruguaiana 02	1,98	2,54	2,80
Caçapava do Sul	4,47	5,31	6,41
Sto Antônio da Patrulha	8,25	9,69	9,92
Santa Maria	7,28	8,30	9,44
São Gabriel	1,56	1,93	2,29
Cachoeirinha	6,18	7,30	7,84
Restinga Seca	2,63	4,14	6,69
Cachoeira do Sul 01	3,74	4,35	4,79
Cachoeira do Sul 02	6,71	7,03	7,70
Santa Vitória do Palmar	6,16	6,16	6,79
Rosário do Sul	8,69	9,40	9,61
Paraíso do Sul	6,32	7,18	8,45

Anexo 17 Fósforo disponível por Lactato de Ca pós-incubação em função da aplicação dos níveis N₀(sem aplicação de P), N₁(1/2 da quantidade de P aplicada no N₂) e N₂ (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Fósforo disponível por Lactato de Ca		
	N ₀	N ₁	N ₂
	----- mg kg ⁻¹ de solo -----		
Camaquã	34,74	34,63	39,10
Torres	13,64	16,97	25,36
Dom Pedrito	13,51	14,57	15,98
Uruguaiana 01	8,76	8,75	9,98
Uruguaiana 02	13,31	13,44	14,20
Caçapava do Sul	19,63	21,08	22,49
Sto Antônio da Patrulha	24,14	27,22	28,90
Santa Maria	24,19	25,62	28,77
São Gabriel	10,98	11,85	12,54
Cachoeirinha	23,21	24,29	25,53
Restinga Seca	15,47	18,60	22,86
Cachoeira do Sul 01	18,14	18,51	19,19
Cachoeira do Sul 02	25,01	25,67	26,99
Santa Vitória do Palmar	27,00	28,21	29,08
Rosário do Sul	33,78	35,47	35,34
Paraíso do Sul	24,88	26,39	28,03

Anexo 18 Fósforo disponível por EDTA pós-incubação em função da aplicação dos níveis N₀(sem aplicação de P), N₁(1/2 da quantidade de P aplicada no N₂) e N₂ (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Fósforo disponível por EDTA		
	N ₀	N ₁	N ₂
	----- mg kg ⁻¹ de solo -----		
Camaquã	30,61	26,58	28,74
Torres	6,65	11,85	18,38
Dom Pedrito	3,52	5,04	6,24
Uruguaiana 01	2,87	3,12	3,85
Uruguaiana 02	3,36	3,95	5,04
Caçapava do Sul	7,70	8,01	8,25
Sto Antônio da Patrulha	10,15	12,69	14,65
Santa Maria	10,07	11,55	14,24
São Gabriel	1,65	1,95	2,54
Cachoeirinha	7,10	9,19	10,01
Restinga Seca	2,70	5,31	8,20
Cachoeira do Sul 01	3,98	4,23	5,21
Cachoeira do Sul 02	6,71	6,57	6,42
Santa Vitória do Palmar	7,46	7,15	7,89
Rosário do Sul	7,87	8,71	8,52
Paraíso do Sul	6,85	8,62	8,74

Anexo 19 Fósforo disponível por Olsen pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Fósforo disponível por Olsen		
	N_0	N_1	N_2
	----- mg kg ⁻¹ de solo -----		
Camaquã	24,61	26,25	28,95
Torres	13,34	15,31	19,08
Dom Pedrito	9,40	11,23	12,17
Uruguaiana 01	11,15	10,90	12,39
Uruguaiana 02	11,15	11,69	10,13
Caçapava do Sul	12,01	15,00	15,55
Sto Antônio da Patrulha	15,33	17,81	18,20
Santa Maria	11,49	14,64	17,07
São Gabriel	6,75	7,02	8,89
Cachoeirinha	11,63	11,20	11,61
Restinga Seca	3,32	5,77	8,16
Cachoeira do Sul 01	8,94	8,79	7,99
Cachoeira do Sul 02	3,88	5,91	6,85
Santa Vitória do Palmar	5,53	5,19	6,45
Rosário do Sul	2,30	5,29	6,83
Paraíso do Sul	0,00	0,00	2,60

Anexo 20 Fósforo disponível por NaOH 0,1mol l⁻¹ pós-incubação em função da aplicação dos níveis N₀(sem aplicação de P), N₁(1/2 da quantidade de P aplicada no N₂) e N₂ (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Fósforo disponível por NaOH 0,1mol l ⁻¹		
	N ₀	N ₁	N ₂
	----- mg kg ⁻¹ de solo -----		
Camaquã	106,12	107,83	111,37
Torres	38,38	63,17	108,42
Dom Pedrito	22,90	24,30	28,00
Uruguaiana 01	26,90	34,00	32,77
Uruguaiana 02	18,85	22,09	23,97
Caçapava do Sul	15,36	16,06	19,29
Sto Antônio da Patrulha	45,75	49,72	57,00
Santa Maria	48,48	55,91	58,33
São Gabriel	25,87	24,19	28,70
Cachoeirinha	25,88	38,01	43,90
Restinga Seca	14,83	22,44	33,61
Cachoeira do Sul 01	29,59	33,69	34,28
Cachoeira do Sul 02	26,25	27,20	27,46
Santa Vitória do Palmar	19,85	19,46	25,42
Rosário do Sul	24,75	27,39	26,39
Paraíso do Sul	25,34	27,94	30,63

Anexo 21 Fósforo disponível por Oxalato pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Fósforo disponível por Oxalato		
	N_0	N_1	N_2
	----- mg kg ⁻¹ de solo -----		
Camaquã	359,74	271,30	345,32
Torres	155,04	232,51	170,07
Dom Pedrito	43,20	55,84	60,57
Uruguaiana 01	59,84	65,63	67,81
Uruguaiana 02	35,81	44,02	45,61
Caçapava do Sul	41,56	41,94	42,77
Sto Antônio da Patrulha	93,54	64,23	95,16
Santa Maria	83,64	97,25	104,85
São Gabriel	64,91	30,25	29,93
Cachoeirinha	29,26	37,09	36,10
Restinga Seca	24,92	27,12	44,42
Cachoeira do Sul 01	26,42	28,00	29,13
Cachoeira do Sul 02	23,21	20,19	24,16
Santa Vitória do Palmar	15,90	12,51	15,14
Rosário do Sul	29,03	30,29	26,29
Paraíso do Sul	35,40	83,17	108,42

Anexo 22 Fósforo disponível por RTA-lâminas pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Fósforo disponível por RTA-lâminas		
	N_0	N_1	N_2
	----- mg kg ⁻¹ de solo -----		
Camaquã	14,00	14,41	14,07
Torres	3,68	5,53	10,73
Dom Pedrito	1,95	2,66	3,56
Uruguaiana 01	2,65	3,11	3,45
Uruguaiana 02	2,01	2,66	3,12
Caçapava do Sul	2,70	3,35	4,03
Sto Antônio da Patrulha	4,41	5,37	6,02
Santa Maria	5,03	5,76	7,14
São Gabriel	1,24	1,60	1,98
Cachoeirinha	2,63	2,80	3,40
Restinga Seca	1,63	3,32	5,57
Cachoeira do Sul 01	1,89	2,19	2,30
Cachoeira do Sul 02	2,19	2,38	2,81
Santa Vitória do Palmar	2,30	2,32	2,70
Rosário do Sul	3,31	3,65	3,89
Paraíso do Sul	1,72	2,08	2,37

Anexo 23 Fósforo disponível por P-remanescente pós-incubação em função da aplicação dos níveis N_0 (sem aplicação de P), N_1 (1/2 da quantidade de P aplicada no N_2) e N_2 (0,2 mg L⁻¹ de P na solução do solo) de P ao solo coletado nos 16 locais.

Solos	Fósforo disponível por P-remanescente		
	N_0	N_1	N_2
	----- mg kg ⁻¹ de solo -----		
Camaquã	137,75	137,52	138,91
Torres	154,59	151,17	163,07
Dom Pedrito	265,69	268,24	266,21
Uruguaiana 01	193,97	200,30	212,90
Uruguaiana 02	285,67	292,40	288,22
Caçapava do Sul	368,65	369,41	366,33
Sto Antônio da Patrulha	365,98	377,83	394,79
Santa Maria	333,75	335,32	349,95
São Gabriel	313,89	314,88	316,50
Cachoeirinha	417,61	416,04	428,88
Restinga Seca	329,92	313,42	332,88
Cachoeira do Sul 01	386,31	378,18	395,77
Cachoeira do Sul 02	420,40	444,50	448,21
Santa Vitória do Palmar	449,67	441,07	437,01
Rosário do Sul	461,92	456,17	457,22
Paraíso do Sul	424,87	422,49	424,40

8. APÉNDICES

Apêndice 01 Associação entre os locais de coleta dos solos objetos de estudo e as unidades de mapeamento e classificação brasileira.

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

Apêndice 02: DETERMINAÇÃO DE FÓSFORO INORGÂNICO EM
EXTRATOS ALCALINOS DO SOLO (Dick & Tabatabai,
1977)

SOLUÇÕES:

Solução A: dissolver 8,80 g de $C_6H_8O_6$ (ácido ascórbico) e 41,00 g de ácido tricloroacético com 400 mL de H_2O destilada em Becker de 500 mL. Transferir para balão volumétrico de 500 mL e ajustar o volume com H_2O destilada. Esta solução deve ser preparada no momento do uso.

Solução B: dissolver 6,20 g de $(NH_4)Mo_7O_{24} \cdot 4 H_2O$ com 400 ml de H_2O destilada em Becker de 500 mL. Transferir para balão volumétrico de 500 ml e ajustar o volume com H_2O destilada.

Solução C: dissolver 29,40 g de citrato de sódio e 26,00 g de arsenito de sódio com 800 mL de H_2O destilada em Becker de 1000 mL. Adicionar 50 mL de ácido acético glacial (99%). Transferir para balão volumétrico de 1000 mL e ajustar o volume com H_2O destilada.

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) adicionar 5 mL de solução A em copo de cafezinho;
- b) adicionar imediatamente uma alíquota de extrato alcalino;
- c) adicionar imediatamente 1 mL de solução B;
- d) adicionar imediatamente 2,5 mL de solução C;
- e) completar o volume até 12,5 mL;
- f) ler a absorvância no fotolorímetro em 700 nm após 15 minutos.

Apêndice 03: DETERMINAÇÃO DE FÓSFORO EM EXTRATOS
ÁCIDOS DO SOLO (Murphy & Riley, 1962)

SOLUÇÕES:

Solução A: dissolver 15,35 g de $(\text{NH}_4)\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$ com 200 mL de H_2O destilada em Becker de 500 mL. Dissolver 0,3511 g de $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{O}_6 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$ com 100 mL de H_2O destilada em Becker de 200 mL. Colocar 300 mL de H_2O destilada em becker de 1000 mL e adicionar lentamente 178 mL de ácido sulfúrico concentrado. Após esfriar, transferir para balão volumétrico de 1000 mL, adicionar as soluções de molibdato de amônio e antimoniato de potássio e ajustar o volume com H_2O destilada.

Solução B: dissolver 1,356 g $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ (ácido ascórbico) com 100 mL de solução A em balão volumétrico. Esta solução deve ser preparada no momento do uso.

$\text{NaOH } 10 \text{ mol l}^{-1}$: dissolver 400 g de NaOH em 600 mL de H_2O destilada em Becker de 1000 mL. Após esfriar, transferir para balão volumétrico de 1000 mL e ajustar o volume com H_2O destilada. Armazenar em frasco plástico.

p-nitrofenol 0,25%: pesar 0,25 g de p-nitrofenol e dissolver em 100 mL de H_2O destilada em balão volumétrico. Armazenar em geladeira em frasco escuro.

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) pipetar uma alíquota do extrato para copo de cafezinho;
- b) adicionar H_2O destilada para atingir volume de 3 mL;
- c) adicionar uma gota de p-nitrofenol 0,25%;
- d) neutralizar a solução com $\text{NaOH } 10 \text{ mol l}^{-1}$;
- e) adicionar 0,5 mL de solução B;
- f) ler a absorbância em 882 nm após 30 minutos.

Apêndice 04: DIGESTÃO DO SOLO PARA ANÁLISE DO FÓSFORO TOTAL
(Sommers & Nelson, 1972)

SOLUÇÕES: - HClO_4 70 %
- HNO_3 + HClO_4 5 : 3 (para solos orgânicos)

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pesar 0,2 g de solo para tubo de digestão;
- b) adicionar 3 mL de ácido perclórico (HClO_4) 70% ;
- c) colocar funis de refluxo;
- d) digira as amostras a 203 °C por 2 horas;
- d) deixar esfriar e completar a 50 mL;
- e) determinar fósforo conforme Murphy & Riley (1962).

OBS: Para solos orgânicos digira a amostra com HNO_3 + HClO_4 na relação 5 : 3 (5mL+3mL) a 130-140 °C até que o HNO_3 evapore. Então coloque os funis de refluxo e aumente a temperatura para 203 °C e digira por 2h.

Apêndice 05: FÓSFORO DISPONÍVEL POR MEHLICH-1
(Adaptado de Mehlich, 1953)

SOLUÇÕES:

Solução extratora: H_2SO_4 0,0125 mol l^{-1} + HCl 0,05 mol l^{-1} (Adicionar 8,10 mL de HCl conc. e 1,40 mL de H_2SO_4 conc. em Becker de 1000 mL contendo 800 ml de H_2O dest. Transferir para balão volumétrico de 2000 mL e completar o volume).

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pesar 1 g de solo para tubo de centrifuga com tampa rosca;
- b) adicionar 10 mL de solução extratora;
- c) agitar por 5 minutos em agitador horizontal;
- d) deixar em repouso por 16 horas;
- e) centrifugar à 2500 rpm por 5 minutos;
- f) determinar fósforo conforme Murphy & Riley (1962).

Apêndice 06: FÓSFORO DISPONÍVEL POR MEHLICH-2
(Adaptado de Mehlich, 1978)

SOLUÇÕES:

Solução extratora: NH_4Cl $0,2 \text{ mol l}^{-1}$ + CH_3COOH $0,2 \text{ mol l}^{-1}$ + NH_4F $0,015 \text{ mol l}^{-1}$ + HCl $0,012 \text{ mol l}^{-1}$

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pesar 1 g de solo para tubo de centrífuga com tampa rosca;
- b) adicionar 10 mL de solução extratora;
- c) agitar por 5 minutos em agitador horizontal;
- d) deixar em repouso por 16 horas;
- e) centrifugar à 2500 rpm por 5 minutos;
- f) determinar fósforo conforme Murphy & Riley (1962).

Apêndice 07: FÓSFORO DISPONÍVEL POR MEHLICH-3
(adaptado de Mehlich, 1984)

SOLUÇÕES:

Solução extratora CH_3COOH $0,2 \text{ mol L}^{-1}$ + NH_4NO_3 $0,25 \text{ mol L}^{-1}$ + NH_4F $0,015 \text{ mol L}^{-1}$ + HNO_3 $0,013 \text{ mol L}^{-1}$ + EDTA $0,001 \text{ mol L}^{-1}$ (Em um Becker de 2000 mL, adicionar 1000 mL de H_2O destilada, 24,1 mL de CH_3COOH , 40,02 g de NH_4NO_3 , 1,11 g de NH_4F , 2,37 mL de HNO_3 e 0,58 g de EDTA. Passar para um balão de 2000 mL e completar o volume).

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pesar 1 g de solo para tubo de centrífuga com tampa rosca;
- b) adicionar 10 ml de solução extratora;
- c) agitar por 5 minutos em agitador horizontal;
- d) deixar em repouso por 16 horas;
- e) centrifugar à 2500 rpm por 5 minutos;
- f) Determinar fósforo conforme Murphy & Riley (1962).

Apêndice 08: FÓSFORO DISPONÍVEL PELA RESINA TROCADORA DE
ÂNIONS (adaptado de Gatiboni, 2003)

1) PREPARO DA RTA

a) Lavagem com HCl 0,5 mol L⁻¹;

- contato com 500 ml de HCl mol L⁻¹ por 10 min , jogar fora o líquido;
- contato com 500 ml de HCl mol L⁻¹ por 30 min (agitar de 10 em 10 min), jogar fora o líquido;
- contato com 500 ml de HCl mol L⁻¹ por 30 min (agitar de 10 em 10 min), jogar fora o líquido;

b) Lavagem com água destilada

- lavar com bastante H₂O dest. e descartar o líquido;
- contato com 500 mL de H₂O dest. por 30 min (agitar de 10 em 10 min), jogar fora o líquido;
- contato com 500 mL de H₂O dest. por 30 min (agitar de 10 em 10 min), jogar fora o líquido;
- contato com 500 mL de H₂O dest. por 30 min (agitar de 10 em 10 min), jogar fora o líquido;

c) Saturação com NaHCO₃ 0,5 mol l⁻¹

- contato com 500 mL de NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ por 10 min , jogar fora o líquido;
- contato com 500 mL de NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ por 30 min (agitar de 10 em 10 min), jogar fora o líquido;
- contato com 500 ml de NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ por 120 min (agitar de 10 em 10 min), jogar fora o líquido;

d) Lavagem do excesso de NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ com água destilada

- lavar com bastante H₂O dest. e descartar o líquido;
- contato com 500 mL de H₂O dest. por 30 min (agitar de 10 em 10 min), jogar fora o líquido;
- contato com 500 mL de H₂O dest. por 30 min (agitar de 10 em 10 min), jogar fora o líquido;
- contato com 500 mL de H₂O dest. por 30 min (agitar de 10 em 10 min), jogar fora o líquido;

2) EXTRAÇÃO DO FÓSFORO DO SOLO

PROCEDIMENTO:

- a) pesar 0,5 gramas de solo para tubo de centrífuga com tampa rosca;
- b) adicionar 10 ml de água destilada;
- c) adicionar 1 lamina de RTA preparada conforme descrição acima;
- d) agitar por 16 horas no "end-over-end" (rotação de 33 rpm);
- e) retirar a RTA do tubo com auxílio de uma pinça;
- f) lavar o excesso de solo da RTA com jato d'água (pisceta);
- g) colocar a RTA em recipiente com tampa contendo 15 ml de HCl 0,5 mol L⁻¹;
- h) deixar em repouso por 90 min (com a tampa aberta);
- i) agitar por 30 min em agitador horizontal;
- j) retirar a RTA com auxílio de pinça e recuperá-la conforme descrição acima;
- k) determinar Pi no extrato de HCl 0,5 mol L⁻¹ conforme Murphy & Riley (1962)

3) RECUPERAÇÃO DA RTA

- submeter a RTA aos passos 1a e 1b do preparo da RTA;
- estocar a RTA em água destilada

Observações: a) quando a RTA estocada passou pelo processo de recuperação no dia anterior, no novo preparo da RTA, esses passos não precisam ser repetidos.

b) o NaHCO₃ deve ser preparado na hora do uso e o pH deve ser regulado à 8,5 com uso de NaOH ou HCl.

Apêndice 09: FÓSFORO DISPONÍVEL POR BRAY-1
(Adaptado de Bray, 1945)

SOLUÇÕES:

Solução extratora: HCl 0,025 mol l⁻¹ e NH₄F 0,03 mol l⁻¹

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pesar 1 g de solo para tubo de centrífuga com tampa rosca;
- b) adicionar 7 mL de solução extratora;
- c) agitar por 1 minuto em agitador horizontal;
- d) deixar em repouso por 16 horas;
- e) centrifugar à 2500 rpm por 5 minutos;
- f) determinar fósforo conforme Murphy & Riley (1962).

Apêndice 10: FÓSFORO DISPONÍVEL POR BRAY-2
(Adaptado de Bray, 1945)

SOLUÇÕES:

Solução extratora: HCl 0,1 mol l⁻¹ e NH₄F 0,03 mol l⁻¹

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pesar 1 g de solo para tubo de centrífuga com tampa rosca;
- b) adicionar 7 mL de solução extratora;
- c) agitar por 40 segundos em agitador horizontal;
- d) deixar em repouso por 16 horas;
- e) centrifugar à 2500 rpm por 5 minutos;
- f) determinar fósforo conforme Murphy & Riley (1962).

APÊNDICE 11: FÓSFORO DISPONÍVEL POR OLSEN
(Adaptado de Tran et al., 1990)

SOLUÇÕES:

Solução extratora: NaHCO_3 0,5 mol l^{-1} a pH 8,5

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pesar 0,5 g de solo para tubo de centrifuga com tampa rosca;
- b) adicionar 10 mL de solução extratora;
- c) agitar por 30 minutos em agitador horizontal;
- d) deixar em repouso por 16 horas;
- e) centrifugar à 5000 rpm por 5 minutos;
- f) determinar fósforo conforme Dick & Tabatabai (1977).

Apêndice 12: FÓSFORO DISPONÍVEL POR MORGAN
(Adaptado de Baker & Hall, 1967)

SOLUÇÕES:

Solução extratora: $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2$ $0,735 \text{ mol l}^{-1}$ + CH_3COOH $0,5 \text{ mol l}^{-1}$ a pH 4,8

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pesar 1 g de solo para tubo de centrífuga com tampa rosca;
- b) adicionar 5 mL de solução extratora;
- c) agitar por 30 minutos em agitador horizontal;
- d) deixar em repouso por 16 horas;
- e) centrifugar à 2500 rpm por 5 minutos;
- f) determinar fósforo conforme Murphy & Riley (1962).

Apêndice 13: FÓSFORO DISPONÍVEL POR LACTATO DE CA
(Adaptado de Steffens, 1994)

SOLUÇÕES:

Solução extratora: Lactato de Ca $0,02 \text{ mol l}^{-1}$ + HCl $0,02 \text{ mol l}^{-1}$ a pH 3,7

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pesar 0,2 g de solo para tubo de centrifuga com tampa rosca;
- b) adicionar 10 mL de solução extratora;
- c) agitar por 90 minutos em agitador horizontal;
- d) deixar em repouso por 16 horas;
- e) centrifugar à 2500 rpm por 5 minutos;
- f) determinar fósforo conforme Murphy & Riley (1962).

Apêndice 14: FÓSFORO DISPONÍVEL POR TEXAS

(Adaptado De Sharpley et al., 1987)

SOLUÇÕES:

Solução extratora: NH_4Ac $1,43 \text{ mol l}^{-1}$ (pH 4,2) + EDTA $0,025 \text{ mol l}^{-1}$

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pesar 1g de solo para tubo de centrifuga com tampa rosca;
- b) adicionar 10 mL de solução extratora;
- c) agitar por 30 minutos em agitador horizontal;
- d) deixar em repouso por 16 horas;
- e) centrifugar à 2500 rpm por 5 minutos;
- f) determinar fósforo conforme Murphy & Riley (1962).

Apêndice 15: FÓSFORO DISPONÍVEL POR OXALATO DE AMÔNIO
(Adaptado de Shahandeh et al., 1994)

SOLUÇÕES:

Solução extratora: $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $0,2 \text{ mol l}^{-1}$ + $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ $0,2 \text{ mol l}^{-1}$

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pesar 0,25g de solo para tubo de centrífuga envolvido com papel alumínio com tampa rosca;
- b) adicionar 10 mL de solução extratora;
- b) agitar por 4 horas em agitador end-over-end;
- c) centrifugar a 2500 rpm durante 5 minutos;
- d) incinerar o extrato (sobrenadante) na mufla a 500 °C durante 1h;
- e) dissolver as cinzas com HCl 1M;
- f) determinar fósforo conforme Murphy & Riley (1962).

Apêndice 16: FÓSFORO DISPONÍVEL POR EDTA

(Adaptado de Labhsetwar & Soltanpour, 1985)

SOLUÇÕES:

Solução extratora: $\text{Na}_2\text{-EDTA}$ $0,02 \text{ mol l}^{-1}$ pH 4,8

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pesar 0,4 g de solo para tubo de centrifuga com tampa rosca;
- b) adicionar 10 mL de solução extratora;
- c) agitar por 60 minutos em agitador horizontal;
- d) deixar em repouso por 16 horas;
- e) centrifugar à 2500 rpm por 5 minutos;
- f) determinar fósforo conforme Murphy & Riley (1962).

Apêndice 17: FÓSFORO DISPONÍVEL POR H₂SO₄

(Adaptado de Catani & Gargantini, 1954)

SOLUÇÕES:

Solução extratora: H₂SO₄ 0,025 mol l⁻¹

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pesar 0,4 g de solo para tubo de centrifuga com tampa rosca;
- b) adicionar 10 mL de solução extratora;
- c) agitar por 15 minutos em agitador horizontal;
- d) deixar em repouso por 16 horas;
- e) centrifugar à 2500 rpm por 5 minutos;
- f) determinar fósforo conforme Murphy & Riley (1962).

Apêndice 18: FÓSFORO DISPONÍVEL POR P-REMANESCENTE
(Adaptado de Novais & Smith, 1999)

SOLUÇÕES:

Solução extratora: CaCl_2 $0,001 \text{ mol l}^{-1}$ em $60 \text{ mg L}^{-1} \text{ P}$

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pesar 1 g de solo para tubo de centrífuga com tampa rosca;
- b) adicionar 10 mL de solução extratora;
- c) agitar por 60 minutos em agitador horizontal;
- d) centrifugar à 2500 rpm por 5 minutos;
- e) determinar fósforo conforme Murphy & Riley (1962).

Apêndice 19: FÓSFORO DISPONÍVEL POR NAOH

(Adaptado de Chang & Jackson, 1957)

SOLUÇÕES:

Solução extratora: NaOH 0,1 mol l⁻¹

PROCEDIMENTO DE ANÁLISE:

- a) Pesar 0,2 g de solo para tubo de centrifuga com tampa rosca;
- b) adicionar 10 mL de solução extratora;
- c) agitar por 17 horas em agitador end-over-end;
- d) centrifugar à 5000 rpm por 5 minutos;
- e) determinar fósforo conforme Dick & Tabatabai (1977).