

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**CALIBRAÇÃO DE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO E ESTIMATIVA  
DE DOSES DE FÓSFORO E POTÁSSIO EM SOLOS  
SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO**

JAIRO ANDRÉ SCHLINDWEIN  
(Tese de doutorado)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**CALIBRAÇÃO DE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO E ESTIMATIVA  
DE DOSES DE FÓSFORO E POTÁSSIO EM SOLOS  
SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO**

JAIRO ANDRÉ SCHLINDWEIN  
Engenheiro Agrônomo (UNIJUÍ)  
Mestre em Ciência do Solo (UFRGS)

Tese apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de  
Doutor em Ciência do Solo.

Porto Alegre (RS), Brasil  
Julho/2003

Dedico esta obra àquela pessoa mais  
importante na minha vida .....

*A ti Léia, minha querida e  
eterna florzinha, ..... com  
muito amor e carinho .....*

## **AGRADECIMENTOS**

Aos professores do departamento de Solos, em especial ao Prof. Clesio Gianello (Orientador), ao Prof. Ibanor Anghinoni e ao Prof. Marino José Tedesco (Comitê de Orientação), pelas orientações.

Às instituições e seus pesquisadores que gentilmente cederam amostras de solo, dados gerais e de rendimento de seus experimentos, pelas discussões e aprofundamento sobre o tema:

UFRGS – Paulo Cezar Cassol (resultados de pesquisa de doutorado).

UFSM – Luciano G. Gatiboni, João Kaminski, Danilo Rheinheimer e seus bolsistas de iniciação científica.

EMBRAPA Trigo – Delmar Pöttker, Sírio Wiethölter, Geraldino Peruzzo, Rainoldo Kochhann e José E. Denardin.

EMBRAPA Pecuária Sul – Odoni L.P. de Oliveira e Valdonir Marinho.

FUNDACEP – Ciro Petrere e Jackson E. Fiorim.

COOPERATIVAS – COTRISA, COTRIJAL, COPALMA, COTREL, COTRISOJA, COTRIJUI, CONTRIBÁ.

Aos colegas da Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela amizade, pelo companheirismo ao longo do tempo e pelo auxílio.

Aos bolsistas de Iniciação Científica Juliana M. Thurow e Amauri c. Pivotto, pelo auxílio nas atividades de campo e de laboratório.

Aos amigos (funcionários) do LAS, pela ajuda e convívio pacífico na utilização dos equipamentos.

Aos meus familiares, pelo apoio e incentivo.

**A todos, meu muito obrigado.**

# **CALIBRAÇÃO DE MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO E ESTIMATIVA DE DOSES DE FÓSFORO E POTÁSSIO EM SOLOS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO <sup>1/</sup>**

Autor: Jairo André Schlindwein

Orientador: Professor Clesio Gianello

## **RESUMO**

O método de análise de solo Mehlich-1 em uso no RS e SC não é adequado para a avaliação da disponibilidade de fósforo em solos adubados recentemente com fosfatos naturais, além de, na comparação com o método da resina de troca iônica, freqüentemente apresentar coeficientes de determinação entre fósforo extraído do solo e parâmetros de plantas menores. Questiona-se também a adequação dos teores críticos de fósforo e potássio do solo e as doses de fertilizantes recomendadas atualmente, com base em calibrações feitas entre as décadas de 1960 a 1980, sob sistema convencional e amostragem da camada 0-20 cm de profundidade, para o sistema plantio direto, com amostragem na camada 0-10 cm. Para equacionar alguns dos aspectos mencionados foram feitos três estudos. No primeiro, correlacionou-se o fósforo extraído, pelos métodos Mehlich-1 e resina de troca iônica, de 100 amostras de solos com diferentes classes de textura e teores de fósforo, com o objetivo de obter um índice de equivalência entre o fósforo determinado por ambos os métodos. No segundo estudo, foram enterradas lâminas de resina para avaliar a capacidade da resina em estimar a disponibilidade de fósforo para as plantas de milho e arroz em diferentes estádios de desenvolvimento. No terceiro estudo, utilizaram-se resultados de experimentos com doses de fósforo e potássio, cultivados com soja, trigo e milho, para re-calibrar os teores críticos de fósforo e potássio do solo pelo método Mehlich-1, e calibrar os resultados obtidos com o método Mehlich-3 e resina. Os resultados obtidos no estudo 1 não permitiram estabelecer um índice de equivalência analítico entre os métodos Mehlich-1 e resina, pois a extração depende também da interação entre teores de fósforo e argila do solo. O método da resina enterrada foi eficiente para determinar a disponibilidade de fósforo para o arroz em solos inundados, mas pode não ser adequado para a cultura do milho. Os teores críticos de fósforo e potássio utilizados atualmente para recomendação de adubação estão subestimados, tanto para as amostras na camada 0-20, como na 0-10 cm de profundidade. As doses de fósforo e potássio, recomendadas para as culturas soja e milho, também estão subestimadas. Os coeficientes de determinação, obtidos entre o fósforo e o potássio determinados pelos métodos Mehlich-1 e resina e o rendimento das culturas soja, milho e trigo, foram maiores do que os obtidos com o Mehlich-3 para mesma relação.

---

<sup>1/</sup>Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (RS). (169p.) Julho, 2003.

# CALIBRATION OF SOIL TESTING METHODS AND ESTIMATE OF PHOSPHORUS AND POTASSIUM RATES IN SOILS UNDER NO-TILLAGE SYSTEM <sup>2/</sup>

Author: Jairo André Schlindwein  
Adviser: Professor Clesio Gianello

## ABSTRACT

The method of soil analysis Mehlich-1, in use in the states of Rio Grande do Sul and Santa Catarina (BR), is not adequate for the evaluation of available phosphorus in soils fertilized recently with rock phosphate. Besides, coefficients of determination between soil available nutrient and plant parameters are frequently lower than with the ionic exchange resin method. It is also questioned if the phosphorus and potassium critical levels and the amount of fertilizer recommend currently, based on calibration studies done in the decades from 1960 to 1980 under conventional plow system and with soil samples taken from the 0-20 cm layer, are suitable for crops grown under no-tillage system with soil samples taken from the 0-10 cm depth layer. To equate some of the above mentioned aspects, three studies were conducted. In the first, a laboratory study using 100 soil samples with a wide range of chemical and physical properties, the Mehlich-1 extracted phosphorus was correlated with the phosphorus extracted by the ionic exchange resin to obtain an equivalence index between both methods. In the second, a greenhouse study, resin sheets were embedded 5 cm in the soil to evaluate the capacity of the resin in estimating the phosphorus availability for the corn and rice plants. In the third, a field study, results of experiments with different doses of phosphorus and potassium, cultivated with soybeans, wheat and corn were used for re-calibration of the critical levels of soil phosphorus and potassium for the method Mehlich-1, and for calibration of the results obtained with the method Mehlich-3 and resin. The results obtained in the study 1 did not allow establishing an analytic equivalence index among the methods Mehlich-1 and resin, because the extraction also depends on the interaction between phosphorus concentration and clay content of the soil. The method of the embedded resin was efficient to determine the available phosphorus for the rice in flooded soils, but it is probably not adequate for the corn and eventually other crops. The critical levels of phosphorus and potassium used currently for fertilizer recommendation in the states of Rio Grande do Sul and Santa Catarina are underestimated, as for soil samples taken from the 0-20 cm layer, as for the ones taken from the 0-10 cm of depth layer. The amount of phosphorus and potassium recommended for the soybeans and corn crops, are also underestimated. The determination coefficients, obtained between the phosphorus and potassium determined by the Mehlich-1 and resin methods and the yield of the soybean, corn and wheat crops, were higher than those obtained with Mehlich-3 for same relationship.

---

<sup>2/</sup>Doctoral Thesis in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (RS) - Brazil. (169p). July, 2003.

## SUMÁRIO

	Página
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>01</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>04</b>
2.1. Necessidade de nutrientes das plantas e a disponibilidade no solo .....	04
2.2. Eficiência da adubação em sistemas de cultivos .....	07
2.3. Mecanismos de suprimento de fósforo e potássio para plantas e de extração pelos métodos de análise do solo .....	09
2.4. Principais métodos de determinação de fósforo e potássio do solo e os estudos de correlação e de calibração .....	12
2.5. Calibração de métodos de análise de solo .....	17
2.5.1. Definição de teor crítico de um nutriente e dose econômica de fertilizantes.....	22
2.5.2. Curvas de resposta e o uso de modelos matemáticos .....	24
2.5.3. Interpretação e recomendação de fertilizantes .....	26
2.6. Histórico das calibrações .....	26
2.7. Histórico das recomendações de corretivos e fertilizantes em uso no Rio Grande do Sul e Santa Catarina .....	29
2.8. Recomendações de fertilizantes baseadas nos estudos de calibração em solos sob sistema convencional de cultivo e a conjuntura atual .....	33
2.8.1. Sistema plantio direto .....	33
2.8.2. Amostragem de solos .....	34
2.8.3. Rendimento das culturas .....	34
2.8.4. Metodologia utilizada .....	35
2.9. Hipóteses .....	36
<b>3. ESTUDO-I - ÍNDICE DE EQUIVALÊNCIA ENTRE O FÓSFORO DETERMINADO PELOS MÉTODOS DA RESINA DE TROCA ANIÔNICA E MEHLICH-1 .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>3.2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>41</b>
<b>3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>42</b>
<b>3.4. CONCLUSÕES .....</b>	<b>50</b>
<b>4. ESTUDO-II – FÓSFORO DISPONÍVEL DETERMINADO POR MEMBRANA DE RESINA ENTERRADA .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>54</b>
4.2.1. Características das resinas .....	54

	Página
4.2.2. Características dos solos .....	54
4.2.3. Procedimentos .....	55
4.2.4. Análises e determinações .....	57
<b>4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>58</b>
<b>4.4. CONCLUSÕES .....</b>	<b>67</b>
<b>4.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>67</b>
<b>5. ESTUDO-III – CALIBRAÇÃO DOS MÉTODOS MEHLICH-1, MEHLICH-3 E RESINA DE TROCA IÔNICA PARA OS NUTRIENTES FÓSFORO E POTÁSSIO EM SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO DE CULTIVO .....</b>	<b>68</b>
<b>5.1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>68</b>
<b>5.2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>72</b>
5.2.1. Caracterização geral.....	73
5.2.2. Descrição dos experimentos .....	73
5.2.2.1. Experimentos com doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	78
5.2.2.2. Experimentos com doses de K <sub>2</sub> O .....	81
5.2.3. Amostragem do solo e rendimento de grãos .....	82
5.2.4. Análises e determinações .....	82
5.2.5. Procedimentos de interpretação .....	83
5.2.5.1. Rendimento relativo .....	84
5.2.5.2. Calibração .....	85
<b>5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>86</b>
5.3.1. Produtividade das culturas .....	87
5.3.2. Calibração de fósforo e potássio determinados pelos métodos Mehlich-1, Mehlich-3 e resina de troca iônica em solos sob sistema plantio direto de cultivo.....	93
5.3.2.1. Teor crítico de fósforo .....	107
5.3.2.2. Teor crítico de potássio .....	111
5.3.2.3. Faixas de fertilidade .....	113
5.3.3. Doses de fertilizantes.....	113
5.3.4. Dose de máxima eficiência técnica e máxima eficiência econômica .....	128
5.3.5. Doses de fertilizantes para o sistema plantio direto vs doses das calibrações anteriores sob sistema convencional de cultivo .....	131
<b>5.4. CONCLUSÕES .....</b>	<b>142</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>143</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>147</b>
<b>8. APÊNDICES .....</b>	<b>159</b>

## RELAÇÃO DE TABELAS

Página

01. Médias dos teores de argila, fósforo determinado pelos métodos resina e Mehlich-1 e amplitude, média e coeficiente de variação da relação fósforo resina:fósforo Mehlich-1 em solos com diferentes classes de argila (média de quatro repetições em 10 solos) .....	48
02. Teor crítico de fósforo Mehlich-1 conforme Comissão... (1995), relação média de fósforo resina:fósforo Mehlich-1, teor crítico de fósforo resina e sua média para solos de diferentes classes texturais .....	48
03. Atributos de alguns solos do RS .....	56
04. Fósforo determinado por diferentes métodos de extração em alguns solos do RS .....	63
05. Coeficiente de determinação ( $r^2$ ) entre o fósforo absorvido pelas plantas cultivadas em alguns solos do RS e a quantidade extraída por diferentes métodos de extração .....	63
06. Coeficiente de determinação ( $r^2$ ) entre o fósforo absorvido por plantas de milho e arroz (média de 10, 20 e 40 dias para o milho e de 20 e 40 dias para o arroz) e a quantidade extraída de fósforo pelas lâminas de resina enterradas, e retiradas ao longo do tempo, em alguns solos do RS .....	66
07. Instituições responsáveis, locais no RS e solos utilizados nos experimentos conduzidos com doses de $P_2O_5$ .....	74
08. Instituições responsáveis, locais no RS e solos utilizados nos experimentos conduzidos com doses de $K_2O$ .....	75
09. Atributos de fertilidade de solos no tratamento sem adição de fósforo dos experimentos com doses de $P_2O_5$ , conduzidos por diferentes instituições no RS .....	76
10. Atributos de fertilidade de solo no tratamento sem adição de potássio dos experimentos com doses de $K_2O$ , conduzidos por diferentes instituições no RS .....	77
11. Instituição condutora dos experimentos, adubação, ano, cultura e doses aplicadas de $P_2O_5$ .....	79
12. Instituição condutora dos experimentos, adubação, ano, cultura e doses aplicadas de $K_2O$ .....	80

13. Instituição condutora dos experimentos no RS, ano de condução, equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação e rendimento relativo de soja cultivada sob sistema plantio direto com doses de $P_2O_5$ .....	88
14. Instituição condutora dos experimentos no RS, ano de condução, equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação e rendimento relativo de trigo cultivado sob sistema plantio direto com doses de $P_2O_5$ .....	89
15. Instituição condutora dos experimentos no RS, ano de condução, equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação e rendimento relativo de milho cultivado sob sistema plantio direto com doses de $P_2O_5$ .....	89
16. Instituição condutora dos experimentos no RS, ano de condução, equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação e rendimento relativo de soja cultivada sob sistema plantio direto com doses de $K_2O$ .....	90
17. Instituição condutora dos experimentos no RS, ano de condução, equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação e rendimento relativo de trigo cultivado sob sistema plantio direto com doses de $K_2O$ .....	91
18. Instituição condutora dos experimentos no RS, ano de condução, equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação e rendimento relativo de milho cultivado sob sistema plantio direto com doses de $K_2O$ .....	91
19. Teor crítico de fósforo estimado por alguns métodos de extração em profundidades de amostragem de solo nos experimentos cultivados com soja, trigo e milho sob sistema plantio direto, em alguns solos do RS com diferentes classes de argila .....	108
20. Teor crítico de potássio estimado por alguns métodos de extração em duas profundidades de amostragem de solo nos experimentos cultivados com soja, trigo e milho sob sistema plantio direto em alguns solos do RS .....	108
21. Coeficiente de determinação entre o fósforo e potássio, determinados por diferentes métodos de extração em amostras de solo, retiradas das camadas 0-20 e 0-10 cm de profundidade, e o rendimento relativo das culturas soja, trigo e milho, sob sistema plantio direto de cultivo .....	112
22. Coeficiente de determinação entre o fósforo, determinado por diferentes métodos de extração em amostras de solo retiradas das camadas 0-20 e 0-10 cm de profundidade, e o rendimento relativo das culturas soja, trigo e milho, sob sistema plantio direto de cultivo.	112

23. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado por diferentes métodos, em amostras de solo da camada de 0-20 cm de profundidade de experimentos localizados no RS .....	114
24. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado por diferentes métodos, em amostras de solo da camada de 0-10 cm de profundidade de experimentos localizados no RS .....	114
25. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado pelo método Mehlich-1, em amostras de solo da camada de 0-20 cm de profundidade de experimentos localizados no RS, em função das classes de argila .....	115
26. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado pelo método Mehlich-1, em amostras de solo da camada de 0-10 cm de profundidade de experimentos localizados no RS, em função das classes de argila .....	115
27. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado pelo método Mehlich-3, em amostras de solo da camada de 0-20 cm de profundidade de experimentos localizados no RS, em função das classes de argila .....	116
28. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado pelo método Mehlich-3, em amostras de solo da camada de 0-10 cm de profundidade de experimentos localizados no RS, em função das classes de argila .....	116
29. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado pelo método resina, em amostras de solo da camada de 0-20 cm de profundidade de experimentos localizados no RS, em função das classes de argila .....	117
30. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado pelo método resina, em amostras de solo da camada de 0-10 cm de profundidade de experimentos localizados no RS, em função das classes de argila .....	117
31. Potássio nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado por diferentes métodos, em amostras de solo da camada de 0-20 cm de profundidade de experimentos localizados no RS .....	118

32. Potássio nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado por diferentes métodos, em amostras de solo da camada de 0-10 cm de profundidade de experimentos localizados no RS .....	118
33. Dose de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> estimada para elevar o fósforo em 1 mg kg <sup>-1</sup> de solo, para o rendimento relativo de 90%, nas culturas soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em solos de diferentes classes texturais, profundidade de amostragem e métodos de análise .....	119
34. Dose de K <sub>2</sub> O estimada para elevar o potássio em 1 mg kg <sup>-1</sup> de solo, para o rendimento relativo de 90%, nas culturas soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em solos de diferentes profundidade de amostragem e métodos de análise .....	119
35. Dose média de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> estimada por diferentes métodos e profundidade de amostragem para a produção de 90% do rendimento máximo de grãos de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo no RS em diferentes faixas de fertilidade e classes de argila .....	121
36. Dose média de K <sub>2</sub> O estimada por diferentes métodos e profundidade de amostragem para a produção de 90% do rendimento máximo de grãos de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo no RS em diferentes faixas de fertilidade ...	121
37. Dose de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> estimada para a produção de 90% do rendimento máximo numa seqüência de três cultivos (soja, trigo e milho) sob sistema plantio direto de cultivo no RS, em solos com diferentes classes texturais e faixas de fertilidade (média dos métodos Mehlich-1, Mehlich-3 e resina e das profundidades 0-20 e 0-10 cm).....	125
38. Dose de K <sub>2</sub> O estimada para a produção de 90% do rendimento máximo numa seqüência de três cultivos (soja, trigo e milho) sob sistema plantio direto de cultivo no RS, em solos com diferentes faixas de fertilidade (média dos métodos Mehlich-1, Mehlich-3 e resina e das profundidades 0-20 e 0-10 cm).....	125
39. Média da dose de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e do rendimento de grãos para a máxima eficiência técnica e econômica e recomendação média da Comissão, de experimentos em diversos locais no RS, cultivados sob sistema plantio direto com soja, trigo e milho .....	127
40. Média da dose de K <sub>2</sub> O e rendimento de grãos para a máxima eficiência técnica e econômica e recomendação média da Comissão para experimentos em diversos locais no RS, cultivados no sistema plantio direto com soja, trigo e milho .....	127

## RELAÇÃO DE FIGURAS

Página

01. Relação entre o rendimento relativo e o teor de fósforo num solo argiloso (> 550g de argila dm <sup>-3</sup> de solo), RS/SC (adaptado de Wiethölter, 2002) .....	21
02. Correlação entre o fósforo determinado pelos métodos resina de troca iônica e Mehlich-1; a) todas as classes de argila; b) argila >550 g dm <sup>3</sup> ; c) argila 550-410 g dm <sup>3</sup> ; d) argila 400-260 g dm <sup>3</sup> ; e) argila 250-110 g dm <sup>3</sup> ; f) argila <110 g dm <sup>3</sup> . .....	43
03. Correlação entre o fósforo determinado pelos métodos resina de troca iônica e Mehlich-1 para classes de argila e teores de fósforo (Comissão..., 1995); a) argila >550 g dm <sup>3</sup> , <6 mg dm <sup>3</sup> , b) argila >550 g dm <sup>3</sup> , P>6 mg dm <sup>3</sup> ; c) argila 550-410 g dm <sup>3</sup> , P<9 mg dm <sup>3</sup> ; d) argila 550-410 g dm <sup>3</sup> , P>9 mg dm <sup>3</sup> ; e) argila 400-260 g dm <sup>3</sup> , P<12 mg dm <sup>3</sup> ; f) argila 400-260 g dm <sup>3</sup> , P>12 mg dm <sup>3</sup> ; g) argila 250-110 g dm <sup>3</sup> , P<18 mg dm <sup>3</sup> ; h) argila 250-110 g dm <sup>3</sup> , P>18 mg dm <sup>3</sup> ; i) argila <110 g dm <sup>3</sup> , P<24 mg dm <sup>3</sup> ; j) argila <110 g dm <sup>3</sup> , P>24 mg dm <sup>3</sup> .....	45
04. Regressão linear entre a relação fósforo resina:fósforo Mehlich-1 (abaixo e acima do teor crítico) e o teor de argila .....	49
05. Disposição das membranas de resina enterradas e das sementes de milho em vasos com capacidade de 40 litros e raio de aproximadamente 150 mm .....	56
06. Relação entre o fósforo absorvido por plantas de milho no primeiro cultivo (média das avaliações aos 10, 20 e 40 dias após a semeadura) e o fósforo no solo determinado por diferentes metodologias (Mehlich-1, Mehlich-3 e resina, resina-cc e resina-sat; média das avaliações aos 2, 5, 10, 20 e 40 dias após terem sido enterradas) em solos do RS, com diferentes características químicas, físicas, mineralógicas e de fertilidade. (A) = solos com teor alto de P; (B) = solos com teor baixo de P .....	59
07. Relação entre o fósforo absorvido por plantas de milho no segundo cultivo (média das avaliações aos 10, 20 e 40 dias após a semeadura) e o fósforo no solo determinado por diferentes metodologias (Mehlich-1, Mehlich-3 e resina, resina-cc e resina-sat; média das avaliações aos 2, 5, 10, 20 e 40 dias após serem enterradas) em solos do RS, com diferentes características químicas, físicas, mineralógicas e de fertilidade. (A) = solos com teor alto de P; (B) = solos com teor baixo de P .....	60

08. Relação entre o fósforo absorvido pelas plantas de arroz (média das avaliações aos 20 e 40 dias após o plantio) e o fósforo no solo determinado por diferentes metodologias (Mehlich-1, Mehlich-3 e resina, resina-sat: média das avaliações aos 2, 5, 10, 20 e 40 e resina-sat média das avaliações aos 2, 5, 10 e 20 dias após serem enterradas) em solos do RS, com diferentes características químicas, físicas, mineralógicas e de fertilidade. (A) = solos com teor alto de P; (B) = solos com teor baixo de P ..... 61
09. Relação entre o fósforo extraído pelas lâminas de resina enterradas e o período de permanência das mesmas no solo (média de 5 solos com dois níveis de fósforo), em solos do RS com diferentes características físicas, químicas, mineralógicas e de fertilidade. Resina-cc: resina em solo com umidade na capacidade de campo, resina-sat: resina em solo saturado com água ..... 66
10. Rendimento relativo ( $RR = [\text{rendimento de grãos sem P} / \text{rendimento máximo com adição de P}] \times 100$ ) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo em função do teor original de fósforo Mehlich-1, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de a) 0-20cm, b) 0-10 cm ..... 95
11. Rendimento relativo ( $RR = [\text{rendimento de grãos sem P} / \text{rendimento máximo com adição de P}] \times 100$ ) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo em função do teor original de fósforo Mehlich-3, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de a) 0-20cm, b) 0-10 cm ..... 96
12. Rendimento relativo ( $RR = [\text{rendimento de grãos sem P} / \text{rendimento máximo com adição de P}] \times 100$ ) de soja, trigo e milho cultivados no sistema plantio direto em função do teor original de fósforo resina, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de a) 0-20cm, b) 0-10 cm ..... 97
13. Rendimento relativo ( $RR = [\text{rendimento de grãos sem P} / \text{rendimento máximo com adição de P}] \times 100$ ) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo em função do teor original de fósforo Mehlich-1, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de 0-20cm, a) classe textura 1, b) classe textural 2, c) classe textural 3 ..... 98
14. Rendimento relativo ( $RR = [\text{rendimento de grãos sem P} / \text{rendimento máximo com adição de P}] \times 100$ ) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo em função do teor original de fósforo Mehlich-1, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de 0-10cm, a) classe textura 1, b) classe textural 2, c) classe textural 3 ..... 99

15. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem P/rendimento máximo com adição de P] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em função do teor original de fósforo Mehlich-3, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de 0-20cm, a) classe textura 1, b) classe textural 2, c) classe textural 3 ..... 100
16. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem P/rendimento máximo com adição de P] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em função do teor original de fósforo Mehlich-3, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de 0-10cm, a) classe textura 1, b) classe textural 2, c) classe textural 3 ..... 101
17. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem P/rendimento máximo com adição de P] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em função do teor original de fósforo resina, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de 0-20cm, a) classe textura 1, b) classe textural 2, c) classe textural 3 ..... 102
18. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem P/rendimento máximo com adição de P] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em função do teor original de fósforo resina, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de 0-10cm, a) classe textura 1, b) classe textural 2, c) classe textural 3 ..... 103
19. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem K/rendimento máximo com adição de K] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em função do teor original de potássio Mehlich-1, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de a) 0-20cm, b) 0-10 cm ..... 104
20. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem K/rendimento máximo com adição de K] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em função do teor original de potássio Mehlich-3, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de a) 0-20cm, b) 0-10 cm ..... 105
21. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem K/rendimento máximo com adição de K] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em função do teor original de potássio resina, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de a) 0-20cm, b) 0-10 cm ..... 106

22. Doses acumuladas de fósforo em solos argilosos para uma seqüência de culturas (soja, trigo e milho) nas faixas de fertilidade (MB: muito baixo, B: baixo, M: médio, A: alto, MA: muito alto, BO: bom, L: limitante, S: suficiente), cultivadas sob SCO (sistema convencional, amostra de solo na profundidade de 0-20 cm) e sob SPD (sistema plantio direto, amostra de solo nas profundidades de 0-20 e 0-10 cm). Mielniczuk et al. (1969) e Universidade... (1973) valores estimados das doses de manutenção mais 3/8 da dose de correção; Siqueira et al. (1987) valores estimados da recomendação dos três cultivos com valor R para rendimentos de 2-3, >2 e 3-6 t ha<sup>-1</sup> para a soja, trigo e milho, respectivamente; sob SPD, valores estimados da recomendação dos três cultivos com valor C para quantidade exportada pelos grãos com base na expectativa de rendimento ..... 133
23. Doses acumuladas de potássio em solos argilosos para uma seqüência de culturas (soja, trigo e milho) nas faixas de fertilidade (MB: muito baixo, B: baixo, M: médio, A: alto, MA: muito alto, BO: bom, L: limitante, S: suficiente), cultivadas sob SCO (sistema convencional, amostra de solo na profundidade de 0-20 cm) e sob SPD (sistema plantio direto, amostra de solo nas profundidades de 0-20 e 0-10 cm). Mielniczuk et al. (1969) e Universidade... (1973) valores estimados das doses de manutenção mais 3/8 da dose de correção; Siqueira et al. (1987) valores estimados da recomendação dos três cultivos com valor R para rendimentos de 2-3, >2 e 3-6 t ha<sup>-1</sup> para a soja, trigo e milho, respectivamente; sob SPD valores estimados da recomendação dos três cultivos com valor C para quantidade exportada pelos grãos com base na expectativa de rendimento ..... 134
24. Doses de fósforo em solos argilosos para o primeiro cultivo da soja, do trigo e do milho nas faixas de fertilidade (MB: muito baixo, B: baixo, M: médio, A: alto, MA: muito alto, BO: bom, L: limitante, S: suficiente), cultivadas sob SCO (sistema convencional, amostra de solo na profundidade de 0-20 cm) e sob SPD (sistema plantio direto, amostra de solo nas profundidades de 0-20 e 0-10 cm). Mielniczuk et al. (1969) e Universidade... (1973) valores estimados das doses de manutenção mais 1/8 da dose de correção, Siqueira et al. (1987) primeiro cultivo da soja, do trigo e do milho; sob SPD primeiro cultivo da soja, do trigo e do milho e valor C a quantidade exportada pelos grãos baseado na expectativa de rendimento ..... 136

25. Doses de potássio em solos argilosos para o primeiro cultivo da soja, do trigo e do milho nas faixas de fertilidade (MB: muito baixo, B: baixo, M: médio, A: alto, MA: muito alto, BO: bom, L: limitante, S: suficiente), cultivadas sob SCO (sistema convencional, amostra de solo na profundidade de 0-20 cm) e sob SPD (sistema plantio direto, amostra de solo nas profundidades de 0-20 e 0-10 cm). Mielniczuk et al. (1969) e Universidade... (1973) valores estimados das doses de manutenção mais 1/8 da dose de correção, Siqueira et al. (1987) primeiro cultivo da soja, do trigo e do milho; no SPD primeiro cultivo da soja, do trigo e do milho e valor C a quantidade exportada pelos grãos baseado na expectativa de rendimento ..... 137
26. Fósforo no solo determinado por Mehlich-1 (seta na horizontal corresponde ao teor inicial, na implantação do experimento) em função do fósforo aplicado menos o exportado pelos grãos da soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo por sete anos em LVdf. Amostras de solo na camada a) 0-20 cm, b) 0-10 cm de profundidade. Aplicação de 0, 30, 60, 90 e 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nas parcelas principais apenas no início do experimento mais aplicações anuais de 0, 1/3, 2/3, 3/3 e 4/3 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> da recomendação para as culturas de grãos (Comissão..., 1995), nas sub-parcelas; aplicações anuais de 0, 1/3, 2/3, 3/3 e 4/3 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> da recomendação para as culturas de grãos (Comissão..., 1995) nas sub-parcelas da parcela principal que não recebeu fósforo ..... 140

## 1. INTRODUÇÃO

Os programas de adubação e calagem têm por finalidade auxiliar na tomada de decisão de aplicação de corretivos e de fertilizantes, necessários para obtenção de rendimentos de máxima eficiência econômica. Além das indicações numéricas das tabelas, é importante considerar o histórico de cultivo da gleba, o histórico de adubação e calagem, os níveis de produtividade obtidos e os almejados, as condições sócio-econômicas do produtor, o tipo de manejo do solo, o clima local e o impacto ambiental da tecnologia a ser implementada. No entanto, o sucesso da utilização das tabelas, de qualquer sistema de recomendação de adubação e calagem, depende da análise do solo calibrada para as condições locais. A determinação analítica é uma das etapas mais importantes para que todo o sistema possa ser corretamente utilizado e os objetivos propostos sejam atingidos.

O programa de recomendações de corretivos e fertilizantes em uso nos estados do RS e SC, para fósforo e potássio, baseia-se em estudos feitos entre o final da década de 1960 e meados da década de 1980, no sistema convencional de cultivo, utilizando o método Mehlich-1 para a determinação de fósforo e potássio do solo e os conhecimentos acumulados durante esse período. Essas recomendações, no entanto, podem estar desatualizadas, pois mudanças significativas ocorreram durante esse período. Entre elas: a) a utilização do sistema plantio direto, que ocupa atualmente mais de 60% da área de cultivo, cuja dinâmica de disponibilidade de nutrientes difere daquela do sistema convencional; b) a amostragem do solo sob sistema plantio direto é feita na camada 0-10 cm de profundidade com maior concentração de alguns nutrientes, podendo, conseqüentemente, subestimar a necessidade de fertilizantes; c) o rendimento de grão de algumas culturas é maior do que aquele utilizado para a calibração, podendo as culturas demandar maior quantidade de

nutrientes; d) o método calibrado para fósforo e potássio, Mehlich-1, eventualmente não estima corretamente a disponibilidade de fósforo em solos fertilizados com fosfatos naturais, subestimando as necessidades de fertilizantes além de extrair pouco fósforo em solos muito argilosos, superestimando as necessidades desse nutriente.

A análise do solo pode ser feita por qualquer método, entretanto, deve ser utilizado aquele que além de uma alta correlação entre os valores do nutriente no solo e os parâmetros de planta (teor no tecido e/ou rendimento), tem baixo custo de análise e praticidade laboratorial. Para a análise de fósforo em solos adubados com fosfato natural, a Comissão de Fertilidade do Solo dos Estados do RS e SC recomenda o uso do método da resina de troca iônica.

O teor de argila do solo não foi considerado no estabelecimento do teor crítico de fósforo e das faixas de fertilidade para as análises feitas com método da resina. Resultados de alguns estudos, no entanto, comprovam que essa também tem influência nos valores de fósforo obtidos com o método da resina, assim como tem nos valores obtidos com o método Mehlich-1. Assumindo que ambos os métodos extraem frações do fósforo disponível para as plantas (fato comprovado pelo coeficiente de determinação em vários estudos) deve ser estudada a relação entre o fósforo extraído pelos métodos resina e Mehlich-1, em solos com diferentes teores de argila e de fertilidade. A obtenção de um índice de equivalência entre o fósforo determinado por ambos os métodos permitiria a utilização do método da resina sem a necessidade de novos estudos de calibração.

O método da resina extrai o fósforo e o potássio pela retirada desses da solução. Isso gera um desequilíbrio ou gradiente com os mesmos elementos ligados à fase sólida do solo. Para restabelecer o equilíbrio há a liberação, por troca iônica, dos elementos da fase sólida. Esse mecanismo, em alguns aspectos, é semelhante ao suprimento desses nutrientes para as plantas. Provavelmente por isso, o método da resina, freqüentemente, tem apresentado coeficientes de determinação maiores do que o método Mehlich-1 entre o fósforo extraído do solo e o absorvido pelas plantas. Para avaliar a extração de fósforo do solo conduziu-se um estudo da correlação do fósforo extraído por membranas de resina enterradas e o fósforo absorvido por plantas, com o objetivo de avaliar a disponibilidade de fósforo às plantas em solos com diferentes

características químicas, físicas e de fertilidade e sob diferentes condições de umidade.

O método da resina tem se mostrado mais eficiente do que o método Mehlich-1 na determinação do fósforo disponível para as plantas (demonstrado em vários estudos), e o método Mehlich-3, de fácil execução e baixo custo, extraem outros nutrientes, além de já terem sido testados e adaptados para análise em rotina no laboratório. Por isso, foi estabelecido um estudo de calibração para esses dois métodos. Foi feita também a re-calibração do método Mehlich-1, com o objetivo de verificar se as alterações no sistema de cultivo, no procedimento de amostragem e no rendimento alteram o teor crítico, as faixas de fertilidade e as doses de fertilizantes para as culturas soja, trigo e milho.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Esta revisão bibliográfica tem por objetivo dar suporte aos estudos que envolvem a obtenção de um índice de equivalência entre o fósforo determinado pelos métodos resina de troca aniônica e Mehlich-1; ao estudo de correlação entre o fósforo disponível determinado por resina aniônica enterrada e o fósforo absorvido pelas culturas de milho e arroz; e aos estudos de calibração de fósforo e de potássio disponíveis no solo sob sistema plantio direto, determinados pelos métodos Mehlich-1, Mehlich-3 e resina de troca iônica.

Os assuntos tratados nesta revisão bibliográfica envolvem discussões sobre: as necessidades de nutrientes das plantas e a disponibilidade no solo; a eficiência da adubação em sistemas de cultivos; os mecanismos de suprimento de fósforo e potássio para as plantas e da extração pelos métodos de análise do solo; os principais métodos de determinação de fósforo e potássio do solo para as plantas e os estudos de correlação e de calibração; a calibração de métodos de análise de solo; o histórico das calibrações e das recomendações de corretivos e fertilizantes em uso no Rio Grande do Sul e Santa Catarina; e as recomendações de fertilizantes baseadas nos estudos de calibração feitos no sistema convencional de cultivo e a conjuntura atual.

### **2.1. Necessidade de nutrientes das plantas e a disponibilidade no solo**

As plantas em geral necessitam de 16 elementos químicos para o seu desenvolvimento, chamados de nutrientes. Desses, destacam-se o carbono, o hidrogênio e o oxigênio fornecidos naturalmente pela água e pelo ar que perfazem mais de 90% da matéria seca das plantas; os elementos

nitrogênio, fósforo e potássio, também chamados de macronutrientes que são utilizados em grandes quantidades pelas plantas e são constituintes dos principais fertilizantes consumidos na agricultura brasileira e mundial. Os nutrientes cálcio, magnésio e enxofre, chamados de macronutrientes secundários são constituintes do calcário e de alguns fertilizantes. Os nutrientes cobre, zinco, manganês, ferro, molibdênio, boro e cloro são chamados de micronutrientes devido à pequena quantidade absorvida pelas plantas, e são constituintes de muitos fertilizantes e do calcário. Em geral, a maioria dos solos agricultáveis do RS, que já foram corrigidos com calcário e adubados com fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos, não apresenta deficiências em macronutrientes secundários e micronutrientes (Comissão..., 1995).

Os nutrientes nitrogênio, fósforo e potássio normalmente são adicionados ao solo na forma de fertilizantes, pois a maioria dos solos agricultáveis do RS apresentam baixa disponibilidade desses nutrientes, segundo os dados de Anghinoni & Bohnen (1975), Tedesco et al. (1984), Drescher et al. (1995) e Rheinheimer et al. (2001). As necessidades de fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos, na forma de N,  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , para as principais culturas de verão no RS, são respectivamente de 267, 424 e 299 mil toneladas anualmente, representando altos investimentos nos setores da indústria, transporte e na agricultura (Rheinheimer et al., 2001). Esses autores verificaram que aproximadamente 30, 80 e 40% das análises de solo feitas no RS de 1998 a 2000 apresentaram teores de matéria orgânica, fósforo e potássio, respectivamente, abaixo dos níveis adequados para rendimentos satisfatórios.

Os custos com fertilizantes na agricultura do RS são de aproximadamente 10 a 20% do total dos investimentos aplicados nos cultivos da soja, trigo e milho sob sistema plantio direto (FECOAGRO/RS, 2002). Por isso, a utilização de doses de fertilizantes deve ser criteriosa, baseada na utilização racional, a partir do retorno econômico das culturas, definido pela calibração realizada a campo com o objetivo de determinar as doses específicas de nutrientes para cada cultura, a partir da análise de solo.

A soja, o trigo e o milho são as culturas mais cultivadas nos solos oxidados do RS e ocupam anualmente a área aproximada de 5 milhões de ha

(Emater/RS, 2003). Dessas culturas, o trigo tem recomendação de doses de  $P_2O_5$  maiores do que a soja e o milho e de  $K_2O$  igual à do milho, e ambas maiores do que a soja (Comissão..., 1995). No entanto, o trigo é a cultura com a menor necessidade dos nutrientes fósforo e potássio para o seu desenvolvimento (Raij et al., 1997) e tem a menor exportação pelos grãos (Raij et al., 1997; Wiethölter et al., 1998). Por exemplo, para um rendimento médio de grãos no RS, em 2000/2001, de 1969, 1785 e 3142 kg ha<sup>-1</sup> para a soja, trigo e milho, respectivamente (Emater/RS, 1998; Emater/RS, 2003), as quantidades estimadas, segundo Raij et al. (1997), de  $P_2O_5$  para as plantas inteiras são de 72, 24 e 36 kg ha<sup>-1</sup> e de  $K_2O$  de 341, 49 e 68 kg ha<sup>-1</sup>, para a soja, trigo e milho, respectivamente. As exportações de fósforo e potássio pelos grãos das culturas, de acordo com os dados de Raij et al. (1997) e de Wiethölter et al. (1998), são proporcionalmente semelhantes, embora em quantidades menores do que para as plantas inteiras.

Os rendimentos médios das culturas cultivadas no RS são baixos, se comparados aos rendimentos médios de alguns estados do país e de outros países. Entretanto, quando o suprimento de nutrientes e os demais fatores de produção são adequados durante o ciclo das culturas, esses rendimentos são superiores a 3000, 3000 e 10000 kg ha<sup>-1</sup> de soja, trigo e milho, respectivamente. Curvas de resposta à adubação demonstram que em solos com fertilidade baixa as respostas são altas e diminuem em solos com fertilidade mais elevada (Rouse, 1968; Olson et al., 1987).

A interação dos fatores de produção (clima, cultura, solo e manejo), pode diminuir ou aumentar o rendimento das culturas (Fitts, 1959). Assim, a função de produção é a relação quantitativa entre os recursos utilizados (fatores de produção) e a produção obtida. Os fatores de produção podem ser controlados pela utilização racional dos mesmos, com objetivo de propiciar aumentos de rendimentos. Desses, os fatores climáticos são os de menor controle e os de fertilidade do solo, ou disponibilidade de nutrientes para as plantas, os mais fáceis de serem controlados. A disponibilidade de nutrientes do solo para as plantas pode ser verificada de várias formas, descritas por vários autores (Anghinoni & Volkweiss, 1984; Raij, 1991; Tisdale et al., 1993). Porém, a mais utilizada é a análise química do solo, que apresenta vantagens em relação às demais, como rapidez, baixo custo, facilidade de interpretação,

entre outras. Contudo, necessita de calibração dos valores determinados pelo método de avaliação com parâmetros de rendimento das culturas.

A análise de solo calibrada fornece a informação do estado de fertilidade do solo e permite a estimativa das quantidades de fertilizantes para o rendimento máximo das culturas a serem adicionadas para uma determinada disponibilidade de nutrientes adequada às plantas, recomendada para o rendimento de máxima eficiência econômica das culturas.

## **2.2. Eficiência da adubação em sistemas de cultivos**

A relação entre o fósforo e o potássio disponíveis, quantificados pela análise de solo (Mehlich-1), e o rendimento das culturas nos estudos de calibração feitos no RS e SC foi obtida pressupondo-se a distribuição uniforme desses nutrientes na camada arável do solo sob sistema convencional de cultivo (geralmente de 0-20 cm de profundidade). Assim, o desenvolvimento radicular das plantas ocorre num ambiente com concentração semelhante na sua maior parte.

Sob sistema plantio direto ocorre a concentração superficial de fósforo e potássio com o tempo de cultivo, especialmente na camada de 0-5 cm ou de 0-10 cm de profundidade (Eltz et al., 1989; Ecker, 1991; Schlindwen & Anghinoni, 2000). A técnica de amostragem adotada em solos sob sistema convencional de cultivo pode não ser adequada para avaliar a disponibilidade desses nutrientes em solos sob sistema plantio direto, pois a amostra pode não representar a condição de fertilidade do solo no qual as raízes das plantas se distribuem (Ecker, 1994; Anghinoni & Salet, 1998).

Apesar das adubações com fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto serem feitas na superfície ou em sub-superfície, o rendimento das culturas em experimentos é normalmente maior, porém estatisticamente semelhante aos obtidos em solos sob sistema convencional de cultivo (Petrere et al., 1996; Wiethölter et al., 1998; Schlindwein & Anghinoni 2000). Entretanto, é comum o depoimento de produtores de que o rendimento das culturas é maior nos solos sob sistema plantio direto. Além disso, o modo de adubação (distribuição em linhas, ou a lanço na superfície, ou incorporado) tem pouca influência no rendimento das culturas quando os teores de fósforo e potássio

do solo estão nas faixas de fertilidade média, suficiente ou alta (Model & Anghinoni, 1992; Klepker & Anghinoni, 1996; Wiethölter et al., 1998).

Essa maior eficiência da adubação pode ser explicada pelo maior crescimento de raízes nessa camada de maior concentração de nutrientes em função de uma resposta fisiológica da planta (Klepker, 1996; Singh et al., 1996). Há também a influência da maior concentração de matéria orgânica (Eltz et al., 1989; Bayer, 1996), que proporciona um ambiente com melhor estrutura física do solo e maior disponibilidade de água, potencializando o crescimento radicular e a difusão do fósforo até as raízes das plantas. As perdas por erosão são menores nesse sistema do que no sistema convencional de cultivo (Bertol et al., 1997; Seganfredo et al., 1997), além do menor contato dos íons  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  com as superfícies de adsorção, devido ao não revolvimento do solo sob sistema plantio direto (Sousa, 1980). Após diversas adubações superficiais pode ocorrer a saturação dos sítios de adsorção. Devido a esses fatores, entre outros, a adubação fosfatada e potássica deve ter maior eficiência em solos sob sistema plantio direto, com efeito residual maior do que sob sistema convencional de cultivo.

A eficiência da adubação potássica feita na superfície do solo tem sido semelhante àquela obtida com a aplicação em linha ou incorporada (Model & Anghinoni, 1992; Klepker & Anghinoni, 1996; Wiethölter et al., 1998). Além disto, o sistema de cultivo e as plantas contribuem para a contínua deposição de potássio na superfície do solo, devido à diferença entre as quantidades absorvidas pelas plantas e as exportadas pelos grãos (Raij et al., 1997; Wiethölter et al., 1998). As menores perdas por erosão nos solos sob sistema plantio direto também são um fator de aumento na eficiência de utilização do potássio.

Em função da maior eficiência de utilização da adubação fosfatada e potássica pelas plantas cultivadas em solos sob sistema plantio direto, Wiethölter et al. (1998) sugeriram uma redução de aproximadamente 10% nas doses de fósforo e potássio recomendadas pela Comissão... (1995).

O melhor aproveitamento pelas plantas dos fertilizantes aplicados nos solos sob sistema plantio direto é um dos fatores de aumento na produtividade. Outro fator é o melhoramento genético das variedades das espécies cultivadas. Atualmente, a soja, o trigo e o milho produzem

aproximadamente 50, 108 e 125% a mais do que na década de 1960, respectivamente (época dos estudos de calibração) – (Emater/RS, 1998; Emater/RS, 2003). Esse aumento na produtividade deve implicar em aumento da dose de fertilizantes.

Independentemente do aproveitamento ou das necessidades de nutrientes, a maior concentração superficial de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto resulta em maiores teores desses nutrientes nos resultados das análises de solos em amostras coletadas na camada 0-10 cm de profundidade (recomendação da profundidade de amostragem pela Comissão... 2003) se comparados aos obtidos no sistema convencional de cultivo com amostragem na camada 0-20 cm de profundidade. A maior concentração superficial e a provável maior necessidade de nutrientes das plantas cultivadas atualmente podem indicar a necessidade de um teor crítico mais elevado do que o estabelecido e de maiores quantidades de fertilizantes.

### **2.3. Mecanismos de suprimento de fósforo e potássio para plantas e de extração pelos métodos de análise do solo**

A absorção de nutrientes pelas plantas somente ocorre quando estes estão na solução do solo e em contato com as raízes. Esse contato pode ser estabelecido: a) por interceptação radicular, à medida que as raízes vão crescendo; b) pelo fluxo de massa, gerado em resposta ao gradiente de potencial matricial resultante da transpiração de água pela parte aérea das plantas; c) e por difusão gerada pelo gradiente do nutriente, passando de um meio mais concentrado para outro menos concentrado (Barber, 1995).

A difusão e o fluxo de massa são processos que ocorrem simultaneamente, pois a absorção de água e de nutrientes ocorre em geral ao mesmo tempo. No entanto, a difusão é o principal mecanismo de suprimento de fósforo e potássio para as plantas (Oliver & Barber, 1966; Vargas et al., 1983; Barber, 1995).

A maior parte dos nutrientes fósforo e potássio presente no solo está em formas não disponíveis para as plantas. Porém, durante o crescimento das mesmas, e devido ao equilíbrio químico existente entre essas formas e as que estão na solução do solo, uma certa quantidade do nutriente torna-se disponível para ser absorvido. Embora as quantidades e as fontes de nutrientes

absorvidos pelas plantas nem sempre sejam as mesmas das fontes determinadas pelos métodos químicos de análise de solo, devido às diferenças dos princípios de absorção pelas plantas e dos de extração pelos métodos químicos, os valores das análises de solo podem ser correlacionados com as quantidades absorvidas pelas plantas.

O potássio presente em solos bastante intemperizados (como a maioria dos solos brasileiros) está adsorvido predominantemente às superfícies dos argilominerais, na forma trocável, com ligações eletrostáticas e em equilíbrio rápido com o potássio da solução do solo. Assim, solos bem supridos em potássio podem ter concentrações altas na solução do solo e o nutriente ser facilmente disponibilizado às raízes das plantas (Vargas et al., 1983), principalmente por difusão e fluxo de massa (Oliver & Barber, 1966; Vargas et al., 1983).

O potássio disponível também pode ser facilmente estimado pela extração da fração trocável. Os resultados obtidos com esse procedimento correlacionam-se direta e proporcionalmente com o potássio absorvido pelas plantas (Oliveira, 1970; Mielniczuk & Selbach, 1978; Nachtigall & Vahl, 1991). Dentre os extratores de potássio trocável, destacam-se a solução de  $\text{NH}_4\text{Ac}$   $1 \text{ mol L}^{-1}$  e as soluções que extraem outros nutrientes (entre eles o fósforo) como Mehlich-1 ( $\text{HCl}$   $0,025 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{H}_2\text{SO}_4$   $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ ), Mehlich-3 ( $\text{CH}_3\text{COOH}$   $0,2 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{NH}_4\text{NO}_3$   $0,25 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{NH}_4\text{F}$   $0,015 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{HNO}_3$   $0,013 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{EDTA}$   $0,001 \text{ mol L}^{-1}$ ), Olsen ( $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ), o Bray ( $\text{NH}_4\text{F}$   $0,03 \text{ mol L}^{-1}$  +  $\text{HCl}$   $0,025 \text{ mol L}^{-1}$ ), e o método resina de troca iônica ( $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ).

A maior parte do fósforo do solo está na fase sólida, em formas inorgânicas, adsorvido fortemente por ligações covalentes com óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio em solos com reação mais ácida, ou com cálcio em solos com reação neutra e alcalina, e em formas orgânicas que precisam ser mineralizadas para que o fósforo seja disponibilizado às plantas (Sanches & Uehara, 1980; Tisdale et al., 1993).

Em solos muito intemperizados, o fósforo da fase sólida (geralmente mais de 99%) está em equilíbrio com o fósforo da solução do solo (geralmente menos de 1%), de onde é absorvido pelas plantas (Vargas et al., 1983). A determinação e a quantificação das formas de fósforo que passa da fase sólida à solução do solo, e desta até a superfície da raiz, são difíceis. Daí a

dificuldade na escolha do método químico a ser utilizado para extrair fósforo das mesmas fontes que liberam para as plantas, resultando em muitos casos, em baixos coeficientes de correlação entre os valores determinados pelo método e a quantidade absorvida pelas mesmas (Raij, 1978; Anghinoni & Volkweiss, 1984; Fixen & Grove, 1990).

Dentre os extratores de fósforo disponível, destacam-se aqueles com ácidos fortes diluídos (Mehlich-1) que promovem a dissolução parcial dos óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, solubilizando o fósforo. Utilizam-se também soluções diluídas de ácidos fortes com a adição de complexantes (Bray e Mehlich-3). Estas, além da dissolução parcial devido à acidez, promovem a complexação do alumínio, solubilizando o fósforo ligado a esses compostos e podem evitar a readsorção. Os extratores com ácidos fracos diluídos (Morgan e Egner, entre outros) dissolvem compostos de fósforo devido à acidez e deslocam o fósforo adsorvido ao alumínio pela complexação deste. A quantidade extraída é menor do que a extraída por aqueles que utilizam apenas soluções diluídas de ácidos fortes. Alguns outros utilizam soluções tamponadas. No método de Olsen, por exemplo, os ânions de bicarbonato e as hidroxilas deslocam o fósforo por substituição dos sítios de adsorção (método recomendado para solos alcalinos, onde a maior parte do fósforo está ligada ao cálcio) (Kamprath & Watson, 1980; Novais & Smyth, 1999).

Além desses extratores há outros que extraem somente o fósforo da solução do solo, simulando os processos de absorção de nutrientes pelas raízes das plantas, tais como os métodos da resina de troca iônica (quando colocada no solo sem o processo de agitação) e do papel de filtro impregnado com ferro. Esses métodos têm a capacidade de retirar o fósforo da solução do solo, gerando um gradiente entre o fósforo da solução e o da interface solução-solo. Com isso o fósforo da fase sólida do solo se desloca, em parte, para a solução a fim de manter o equilíbrio químico (Rein, 1991; Miola, 1995). No método da resina com a agitação do solo (Tedesco et al., 1995; Embrapa, 1997; Raij et al., 2001), embora indevidamente comparado ao mecanismo de difusão, o fósforo da solução é trocado por íons da resina, gerando um desequilíbrio que favorece o deslocamento do fósforo da fase sólida para a solução do solo a fim de manter o equilíbrio químico. Neste caso, o mecanismo de difusão é menos importante.

Os princípios de extração de nutrientes (entre eles o fósforo) da fase sólida do solo pelos métodos químicos se baseiam principalmente na ação de substituição e/ou deslocamento de cátions e ânions ou na dissolução seletiva de substâncias minerais e orgânicas. Na absorção de nutrientes pelas plantas, o princípio é o do esgotamento da solução do solo, com concomitante liberação da fase sólida para manutenção do equilíbrio químico e/ou por solubilização devido à excreção de substâncias na rizosfera.

Os nutrientes presentes na solução do solo representam o fator intensidade e os nutrientes presentes na fase sólida do solo, o fator quantidade. A capacidade do solo em manter uma determinada concentração de nutrientes na solução do solo é denominada poder tampão ou fator capacidade. Segundo Anghinoni & Volkweiss (1984), os métodos de análise do solo podem ser agrupados em métodos que avaliam o fator intensidade (na solução do solo), o fator quantidade (ácidos e bases fortes) e de dissolução seletiva (soluções diluídas de ácidos e bases fortes). Os últimos incluem o fator intensidade e parte do fator quantidade (a maioria dos métodos atualmente utilizados, entre eles o Mehlich-1).

#### **2.4. Principais métodos de determinação de fósforo e potássio do solo e os estudos de correlação e de calibração**

Existe atualmente um grande número de métodos em uso em várias partes do mundo, com o objetivo de avaliar a disponibilidade de fósforo e de potássio para a nutrição das plantas. A maioria desses métodos emprega soluções ácidas, básicas e sais, ou ainda, mistura de ambas, que removem frações ou partes proporcionais àquelas que as plantas absorvem. Existem ainda outros métodos que avaliam os nutrientes da solução do solo. A utilização de um ou de outro método depende diretamente da capacidade destes de extrair quantidades de nutrientes proporcionais às absorvidas pelas plantas, medida pelo coeficiente de determinação ( $r^2$ ), em modelos gráficos ou equações matemáticas. Essa capacidade depende também das propriedades de cada solo que influenciam diretamente na dinâmica dos nutrientes.

A quantificação do fósforo e potássio do solo pode ser feita por várias metodologias. Entretanto, para a calibração, escolhem-se aquelas que apresentam, além de alta correlação entre os teores no solo e o rendimento

das culturas ou o teor de nutriente no tecido das plantas, baixo custo e praticidade de análise de rotina em laboratório (Rouse, 1968; Cate & Nelson, 1973; Anghinoni & Volkweiss, 1984; Hauser, 1985; Mielniczuk, 1995). Destacam-se os métodos Mehlich-1 para determinação de fósforo e potássio, além de outros micronutrientes (Tedesco et al., 1995; Embrapa, 1997) e os métodos Mehlich-3 e a resina de troca iônica para determinação de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, alguns micronutrientes e outros elementos (Mehlich, 1984; Raij et al., 1986; Raij & Quaggio, 1990; Miola, 1995; Braida et al., 1996; Schoenau & Greer, 1996; Liang & Schoenau, 1996; Embrapa, 1997; Kroth, 1998; Raij et al., 2001). Esses três métodos foram testados por Kroth (1998) em estudos de correlação com vários solos representativos dos solos do RS. Os resultados mostram que há uma correlação significativa entre as quantidades extraídas de fósforo e potássio do solo pelos métodos e as quantidades absorvidas pelas plantas.

O método Mehlich-1, desenvolvido em 1953, é o mais utilizado no Brasil em análise de rotina para fósforo e potássio (Anghinoni & Volkweiss, 1984). No RS e SC, os estudos de calibração foram conduzidos desde o final da década de 1960 a meados da década de 1980. Atualmente foram incorporados alguns ajustes à metodologia original, aos equipamentos e feitas modificações nas técnicas de laboratório, que tornaram o procedimento mais rápido e adequado a grandes quantidades de análises de rotina (Tedesco et al., 1995).

Além dos estudos de calibração feitos no RS, o método Mehlich-1 foi testado nas décadas de 1970 e 1980 em outros estudos, como os de efeito residual do fósforo (Fole & Grimm, 1973; Scholles et al., 1978; Rodrigues et al., 1985; Lemos et al., 1987) e os de correlação de fósforo extraído pelo método com parâmetros de plantas (Fole & Grimm, 1973; Magalhães, 1974; Anghinoni & Bohnen, 1974; Galvão & Volkweiss, 1981). Em todos esses estudos de correlação, os coeficientes de determinação foram significativos, embora baixos, e em alguns casos, inferiores aos obtidos com o método Bray e com o método da resina de troca iônica, este testado por Magalhães (1974) e Magalhães & Gallego (1974).

Na década de 1990, o método Mehlich-1 foi muito utilizado no RS em estudos de correlação entre os teores de fósforo do solo e os parâmetros

de plantas. Muitos desses estudos, porém, foram realizados com o propósito de testar a eficiência desse método (considerado padrão) em relação a outros. Apesar de coeficientes de determinação significativos, estes foram em geral mais baixos do que os obtidos por outros métodos, entre eles a resina de troca iônica (em esferas ou em lâminas) (Rein, 1991; Salet et al., 1994; Miola et al., 1994; Miola, 1995; Braida et al., 1996; Silva, 1996; Kroth, 1998), P solução (Rein, 1991; Miola, 1995) e Mehlich-3 (Kroth, 1998).

Os baixos coeficientes de determinação entre o fósforo extraído pelo método Mehlich-1 e os parâmetros de plantas devem-se, em parte, às deficiências do próprio método. Em geral este superestima a quantidade de fósforo disponível em solos que receberam fosfatos naturais (Raij, 1991; Kroth, 1998), e/ou subestima o fósforo disponível em solos muito argilosos (com alto poder tampão) devido à menor extração e/ou readsorção de fósforo (Kamprath & Watson, 1980).

Nos solos argilosos, o deslocamento do fósforo da fase sólida do solo para a solução e desta até a superfície das raízes é mais eficiente do que em solos arenosos, em contraste com a menor extração de fósforo pelo método nos argilosos. Por essa razão, nos estudos de calibração, estabeleceram-se teores críticos para cada classe teor de argila. Inicialmente os solos foram separados em duas classes (Mielniczuk et al., 1969a), em três classes em 1973 (Universidade..., 1973) e finalmente em 1987 em cinco classes de textura (Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989; 1995).

O método Mehlich-3 é relativamente recente (Mehlich, 1984) se comparado à maioria dos métodos desenvolvidos nas décadas de 1940 e 1950. Assim como o método Bray (eficiente para extração de fósforo, segundo Anghinoni & Bohnen, 1974), o Mehlich-3 é um extrator ácido que utiliza o reagente  $\text{NH}_4\text{F}$  como complexante do alumínio (presente em altas quantidades nos solos muito intemperizados) permitindo uma liberação maior do fósforo. Nesse método também foi incluído um complexante orgânico capaz de extrair eficientemente vários micronutrientes (Mehlich, 1984). Por extrair simultaneamente muitos macro e micronutrientes, o método Mehlich-3 foi considerado a metodologia mais adequada para análise do solo em rotina sendo muito utilizado nos laboratórios comerciais de análises de solos dos Estados Unidos (Trant et al. 1990).

Os resultados de Kroth (1998) mostram correlação significativa entre os valores de cálcio e de magnésio no solo obtidos pelo método Mehlich-3 e os valores obtidos pelos métodos KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e pela resina. O mesmo ocorreu para a relação entre os teores de fósforo do solo e as quantidades absorvidas pelas plantas. Silva et al. (1997) e Brasil & Muraoka (1997) também obtiveram correlação significativa entre os teores de fósforo no solo (Mehlich-3) e os teores de fósforo nas plantas. No estudo de Brasil & Muraoka (1997), os coeficientes de determinação foram maiores para método Mehlich-3 do que para o Mehlich-1 e a resina de troca iônica em solos da Amazônia. Esses resultados demonstram que esta metodologia é promissora e pode ser submetida a estudos de calibração.

O método da resina de troca iônica para análise de solo foi desenvolvido por Amer et al. (1955), sendo atualmente utilizado em vários países para extrações de cátions e ânions. No Brasil é utilizado em rotina no estado de SP, onde foi calibrado por Rajj & Feitosa (1980), tendo como classes de fertilidade: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, para os teores de fósforo (para as culturas anuais) de: 0-6, 7-15, 16-40, 41-80 e >80 mg dm<sup>-3</sup>; e para potássio de: 0-0,7; 0,8-1,5; 1,6-3,0; 3,1-6,0 e >6,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, respectivamente (Rajj et al., 1997).

O teor crítico no solo para as culturas anuais, que corresponde à produção relativa de 100% (classe de teor médio) nas “Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo”, é 3,0 mmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, ou equivalente a mais ou menos 60 mg dm<sup>-3</sup> para os teores de potássio, e de 40 mg dm<sup>-3</sup> para os teores de fósforo. Esse teor crítico do fósforo é maior do que o sugerido por Siqueira et al. (2000) (25 e 30 mg dm<sup>-3</sup> para diversos solos) para solos do RS. Estes autores utilizaram amostras de solo da camada de 0-20 cm, de um banco de solos de experimentos conduzidos sob sistema convencional de cultivo pela Embrapa Trigo nas décadas de 1970 e 1980 e os respectivos rendimentos para estabelecer o teor crítico para o método.

O método da resina extrai o fósforo da solução do solo (fator intensidade), que está em equilíbrio com o fósforo da fase sólida do solo (fator quantidade). Assim, dependendo da intensidade e do tempo de agitação, parte ou todo o fósforo lábil ou disponível para as plantas pode ser extraído, sem afetar significativamente as principais propriedades do solo. Os reagentes

utilizados no método têm efeito apenas no tamponamento do meio de extração (pH 6,0 e 7,0) diferentemente de outros extratores que modificam significativamente o pH e provocam dissolução e/ou complexação de compostos. Por estas características, a resina de troca iônica é considerada um método mais eficiente de extração de fósforo e é o que mais se assemelha aos princípios de absorção de fósforo pelas plantas (Raij, 1991).

Estudos de correlação utilizando o método da resina e parâmetros de plantas foram feitos no RS, na década de 1970, por Magalhães (1974) e por Magalhães & Gallego (1974). Siqueira et al. (2000) utilizaram solos de experimentos conduzidos nas décadas de 1970 e 1980. Outros estudos de correlação foram feitos na década de 1990 por Rein (1991), Salet et al. (1994), Miola et al. (1994), Miola (1995), Braidá et al. (1996), Silva (1996) e por Kroth (1998). Em todos esses trabalhos, os coeficientes de determinação obtidos foram significativos. Além disso, na maioria dos casos, os coeficientes foram maiores com o método da resina do que com o método Mehlich-1. Coeficientes de determinação maiores com o método da resina também foram relatados por Raij (1978) em sua revisão de literatura, e foram obtidos em trabalhos realizados por Raij & Feitosa (1980), Silva & Raij (1996), Silva et al. (1997) e Brasil & Muraoka (1997). Em todos esses estudos não houve a preocupação de separar os solos em classes texturais. Quando isso foi feito (Silva & Raij 1996), os coeficientes de determinação entre o fósforo determinado pelo método Mehlich-1 e o fósforo absorvido por plantas de cana-de-açúcar cultivadas em solos do estado de SP foram maiores do que os obtidos com o método da resina de troca iônica.

Nos estudos de calibração do método da resina no estado de SP, os solos não foram separados por classes texturais. Silva & Raij (1996) não observaram aumento nos coeficientes de determinação quando os solos foram separados por classes texturais para o método da resina de troca iônica. No Rio Grande do Sul, Miola (1995), Braidá et al. (1996) e Kroth (1998) observaram que houve aumento, embora pequeno, dos coeficientes de determinação quando os solos foram separados por classes texturais ou por capacidade de adsorção de fósforo (Silva, 1996). No método Mehlich-1, o conteúdo de argila do solo influencia muito o resultado dessa correlação. Quando os solos são separados em classes pelo teor de argila, a correlação é

maior do que para o conjunto de solos com diferentes conteúdos de argila (Salet et al., 1994; Miola, 1995; Braida et al., 1996; Kroth, 1998; Silva & Raij, 1996).

O método da resina geralmente extrai de duas a três vezes mais fósforo do que o método Mehlich-1 (Raij, 1991; Miola, 1995; Kroth, 1998). O mesmo ocorre com o método Mehlich-3 (Kroth, 1998). Isso é importante para a calibração, pois permite definir intervalos de faixas de fertilidade mais amplos, melhorando as interpretações e aumentando a acurácia das recomendações.

## **2.5. Calibração de métodos de análise de solo**

A calibração de um método de análise do solo consiste em determinar ou relacionar o teor de um elemento no solo (nutriente de plantas), obtido por uma determinada metodologia de avaliação (análise do solo), com um ou mais parâmetros de plantas cultivadas a campo (índice de crescimento, teor e/ou produção de uma cultura), simulando as condições naturais de produção (Rouse, 1968; Cate & Nelson, 1973; Anghinoni & Volkweiss, 1984; Evans, 1987; Dahnke & Olson, 1990).

A análise do solo realizada por método calibrado a campo, pela relação entre o rendimento relativo e o teor do nutriente no solo, é uma forma rápida, eficiente e de baixo custo, amplamente utilizada atualmente para o diagnóstico do estado de fertilidade do solo e definição do tipo e quantidade de nutrientes recomendados para uma probabilidade de resposta de uma cultura.

A calibração de métodos de análise de solo é uma das etapas finais de um programa de recomendação de adição de fertilizantes para as culturas. Antes dessa etapa, deve-se definir em estudos de correlação de métodos, o método a ser calibrado (Cate & Nelson, 1973; Anghinoni & Volkweiss, 1984; Mielniczuk, 1995).

A seleção de um ou mais métodos consiste basicamente em identificar aquele(s) método(s) com baixo custo, praticidade de execução em laboratório e mecanismos de extração dos nutrientes do solo que possam ser correlacionados e cujos valores se correlacionam com os parâmetros de plantas (Corey, 1987). Os estudos de correlação são feitos normalmente em casa de vegetação, utilizando-se os solos mais representativos de uma região onde se pretende implantar um sistema de recomendação de adubação pela

análise de solo. É imprescindível que estes solos tenham diferentes níveis de fertilidade para identificar aqueles métodos que apresentam altas correlações entre os nutrientes extraídos pelo método e os nutrientes absorvidos pelas plantas (Corey, 1987; Mielniczuk, 1995; Dahnke & Olson, 1990).

As vantagens dos estudos de correlação em casa-de-vegetação são, principalmente, o controle dos fatores de crescimento, a possibilidade de cultivo em qualquer época do ano e a utilização de um grande número de solos em um espaço pequeno, entre outras. Entretanto, os dados assim obtidos não são adequados para a calibração das necessidades de fertilizantes, pois as respostas das plantas cultivadas em vasos são normalmente menores do que aquelas cultivadas a campo, em função da competição das raízes pelos nutrientes e efeitos do sistema radicular sobre a disponibilidade de nutrientes (Corey, 1987).

No RS, foram realizados vários estudos de correlação para testar os métodos Mehlich-1, resinas, Bray, P solução, papel impregnado com óxidos de ferro e Mehlich-3 (Fole & Grimm, 1973; Magalhães, 1974; Anghinoni & Bohnen, 1974; Galvão & Volkweiss, 1981; Rein, 1991; Salet et al., 1994; Miola et al., 1994; Miola, 1995; Braida et al., 1996; Silva, 1996; Kroth, 1998; Siqueira et al., 2000).

Concluída a etapa de correlação com o método selecionado, implantam-se os experimentos a campo para os estudos de calibração. A condução dos experimentos se prolonga por vários anos e em vários locais. Normalmente esses locais são os mais representativos dos solos da região em questão. Utilizam-se as mesmas práticas de cultivo em todos os experimentos e de forma mais semelhante possível àquelas utilizadas pelos agricultores, priorizando as que proporcionam altos rendimentos (a incerteza na obtenção do rendimento máximo pode influenciar no resultado da calibração). Para os nutrientes em estudo (normalmente um ou dois) há a necessidade de se aplicar doses crescentes com o objetivo de obtenção de uma curva de resposta para cada cultura. O pH dos solos, os demais nutrientes e o manejo devem ser adequados para a máxima produtividade. Para cada local em estudo, obtém-se o valor do nutriente extraído com o método a ser calibrado. Para fins de calibração, utilizam-se apenas os valores das parcelas que receberam todos os demais tratamentos exceto o nutriente a ser testado (geralmente conhecida

como parcela testemunha) (Rouse, 1968; Cate, 1969; Cate & Nelson, 1973; Braga, 1983; Hauser, 1985; Dahnke & Olson, 1990; Black, 1993; Mielniczuk, 1995).

Na maioria dos estudos de calibração utiliza-se o rendimento relativo da cultura ou culturas. Esse rendimento é uma relação percentual entre a produção sem a adição do fertilizante em estudo (todos os demais nutrientes em níveis adequados) e a produção máxima obtida (todos os nutrientes em níveis adequados, inclusive o nutriente em estudo). Algumas pressuposições são feitas para a utilização do rendimento relativo. Entre elas, a mais importante, é a de que não há variação nos coeficientes da equação de ajuste dos rendimentos nos anos e nos locais. Assim, ao se transformar os rendimentos absolutos em relativos, os pontos obtidos em função de anos para um mesmo local e para locais diferentes devem se sobrepor. Isso nem sempre ocorre (Black, 1993). Em casos cujos resultados são muito discrepantes, em relação ao resultado normal, o valor de rendimento relativo daquele ano e/ou local é desconsiderado na curva de calibração.

Colwell et al. (1988) criticam o uso do rendimento relativo para expressar os efeitos dos fertilizantes devidos às seguintes razões: a) o rendimento relativo não dá suporte para estabelecer a dose econômica de fertilizantes; b) o rendimento máximo utilizado no cálculo do rendimento relativo é freqüentemente mal definido nos dados experimentais e estimado subjetivamente; c) a função da relação entre o rendimento das culturas e a quantidade de fertilizantes ou análises de solo difere de um local para outro; d) o cálculo do rendimento relativo pode representar tendências estatísticas; e) testes de significância não são válidos para resultados de diferentes experimentos combinados por rendimento relativo estimado. Entretanto Raij (1991) afirma que tal crítica não procede, pois o rendimento relativo somente é empregado na fase de calibração dos teores dos nutrientes no solo. Desta fase em diante, as produções absolutas são utilizadas para estabelecer as doses de fertilizantes. Black (1993) afirma que as variáveis não homogêneas originadas de cada experimento, devido às grandes variações de rendimento absoluto,

mencionadas anteriormente por Colwell et al (1988), podem ser transformadas em homogêneas para um conjunto de experimentos pela utilização de dados transformados para rendimento relativo. A transformação de dados não tem grande aceitação para os estatísticos, porém é aceita entre os cientistas de solo, como por exemplo, na determinação de pH do solo e em outras funções logarítmicas.

Muitos experimentos são feitos com doses de fertilizantes e número de repetições não adequados para definir a curva de resposta com grau de precisão desejado ou esperado, produzindo resultados estimados subjetivamente. Além disso, geralmente, pouco se conhece sobre os efeitos conjugados de alguns fatores de produção (temperatura, umidade, doenças, variedades, etc.) nos dados de cada experimento. A reunião de dados experimentais de rendimento relativo sob estas circunstâncias deve resultar em testes de significância não válidos, conforme Colwell et al. (1988). No entanto, segundo Black (1993), os testes de significância podem ser dispensados, pois os dados avaliados no momento são a melhor forma de interpretação e as pesquisas no futuro podem melhorar essas avaliações.

Com a relação entre o nutriente em estudo presente no solo e os rendimentos médios relativos do conjunto de experimentos, escolhe-se um modelo matemático que se ajuste aos pontos, ou elabora-se um gráfico manualmente, na forma de uma curva de resposta da cultura ao teor do nutriente no solo. Com essa curva, é possível definir faixas de teores do nutriente ou percentuais de resposta da cultura em relação ao teor do elemento no solo. A figura 1 exemplifica o processo descrito. Essa curva de calibração deve ser elaborada para cada cultura. No entanto, os resultados obtidos mostram que é possível incluir várias culturas num único processo.

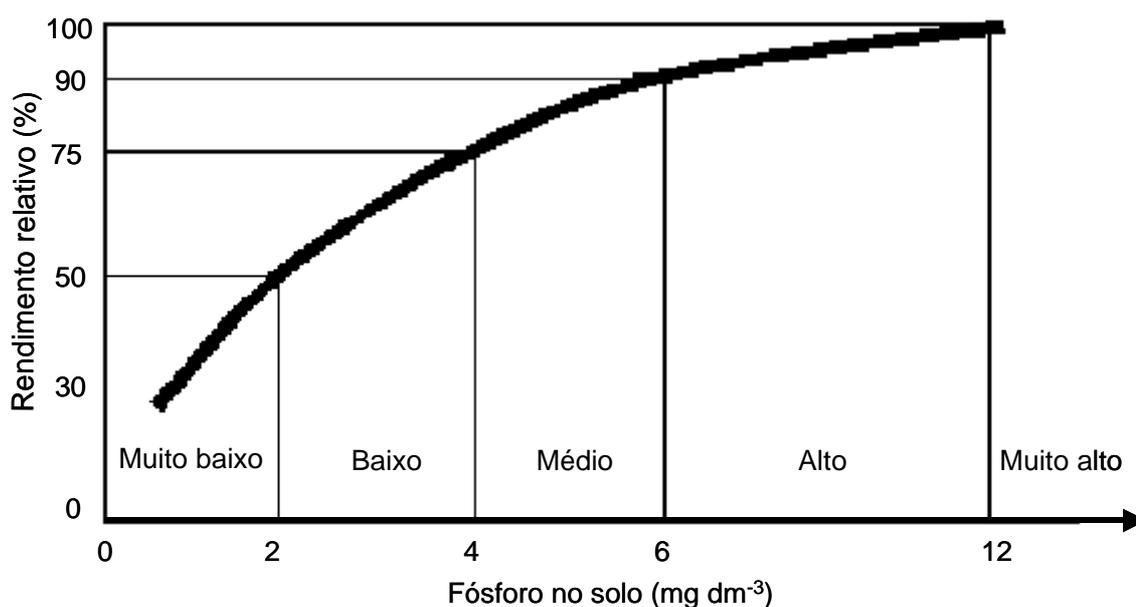


Figura 1. Relação entre o rendimento relativo e o teor de fósforo num solo argiloso (> 550g de argila dm<sup>-3</sup> de solo), RS/SC, (adaptado de Wiethölter, 2002).

A probabilidade de rendimento da cultura testada na calibração pode ser estimada através da curva de calibração para qualquer quantidade do nutriente presente no solo, quantificado pelo método calibrado. O rendimento relativo é muito baixo para teores do nutriente próximo de zero e de até 100% para teores elevados no solo. Normalmente a curva de calibração é dividida em faixas de fertilidade baixa, média e alta, que apresentam probabilidade de resposta alta, média e baixa, respectivamente, à aplicação do referido nutriente (Rouse, 1968; Olson et al., 1987; Dahnke & Olson, 1990). Tisdale et al. (1993) sugeriram que as respostas econômicas da adubação fosfatada e potássica são de 70-95, 40-70, 10-40 e menor que 10% para solos com faixas de fertilidade baixa, média, alta e muito alta, respectivamente.

Na calibração também há a definição de um ponto da curva (teor do nutriente calibrado), denominado de teor crítico (Cate & Nelson, 1971, 1973). Nesse teor, ou próximo a ele, a probabilidade de resposta da plantas à adição do nutriente no solo é nula ou muito pequena. Abaixo desse teor a probabilidade de resposta da planta à adição do nutriente aumenta na proporção inversa do decréscimo do mesmo (proporção definida e alterada pela função utilizada). Esse é o teor crítico da planta e difere daquele utilizado

com fins de recomendação de nutriente, pois nesse caso não há a preocupação da definição econômica da dose do nutriente.

### **2.5.1. Definição do teor crítico de um nutriente e dose econômica de fertilizantes**

O teor crítico pode ser estimado graficamente ou matematicamente pelo método Cate & Nelson (1971, 1973). No método gráfico, os pontos são distribuídos num sistema cartesiano, sobrepondo-se ao mesmo um filme transparente com duas retas perpendiculares, movendo-o de forma que a maioria dos pontos fiquem em dois quadrantes opostos. O teor de nutriente obtido no ponto onde a linha paralela ao eixo  $y$  toca o eixo  $x$  denomina-se de teor crítico do nutriente em estudo. No método matemático, determina-se valor de  $r^2$  a partir da soma de quadrados dos desvios da média de duas populações com valores de  $x$  e rendimento relativo previamente ordenados. O teor crítico também pode ser estimado visualmente no ponto de inflexão da curva, entre a tendência de alta probabilidade de resposta e a de baixa probabilidade de resposta das culturas ao aumento da fertilidade do solo, ou ainda, relacionando-se um percentual de rendimento relativo quantificado a partir das faixas de fertilidade.

Há a necessidade de definir o teor crítico em relação à probabilidade de retorno econômico. Esse difere do teor crítico do nutriente para a planta, cuja definição foi elaborada anteriormente. Com o cálculo da dose de máxima eficiência econômica, resulta um valor de rendimento relativo que varia em função dos preços dos insumos e do produto e da função utilizada para o ajuste dos dados. Para esse valor de rendimento obtém-se um valor de concentração do elemento no solo determinado com o método em estudo. Este valor é chamado de teor crítico, e é o valor que se utiliza para delimitar a probabilidade de resposta econômica. Na literatura utilizam-se ambos os conceitos de teor crítico de forma confusa. Tampouco é correto utilizar o conceito de teor crítico econômico em substituição à dose de máxima eficiência econômica.

Kochhann et al. (1982) sugeriram que a dose de máxima eficiência econômica de um nutriente (no caso para fósforo e potássio) é variável entre 80 a 95% do rendimento relativo. Quando a calibração foi feita nos estados do

RS e SC escolheu-se o valor de 90% do rendimento máximo como referência, e o valor do teor crítico foi estabelecido a partir dessa decisão. Portanto é um conceito subjetivo. Após essa definição, a alteração da dose se dá em função do preço dos produtos e dos insumos, implicando muitas vezes na alteração do teor de nutriente do solo. Contudo, o teor crítico não se altera. Muda o valor do nutriente no solo, pois em algumas vezes, se a dose for corrigida economicamente, poderá ser maior ou menor do que a recomendada inicialmente quando da calibração. Para Sims (1999), o teor crítico no solo para os rendimentos de melhor performance de plantas foi obtido quando o rendimento relativo alcançou 93-95% do rendimento máximo. Para Tisdale et al. (1993), a probabilidade de resposta econômica à adubação fosfatada e potássica ocorre com rendimento relativo em torno de 90% do rendimento máximo.

No Brasil costuma-se utilizar o valor de 90% do rendimento relativo máximo com referência para a dose de máxima eficiência econômica, estabelecendo-se nesse ponto o teor crítico do nutriente (Mielniczuk et al., 1969 a, b; Universidade..., 1973; Tabelas..., 1976; Manual..., 1981; Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995; Raij et al., 1997).

A primeira etapa de um estudo de calibração é a obtenção da curva de calibração. Normalmente aplicam-se doses crescentes do nutriente em estudo e cultiva-se por vários anos com várias culturas de interesse econômico. O mesmo procedimento é repetido por vários anos em diversos locais representativos dos principais solos da região. Com o resultado médio do rendimento da cultura na área (ou parcela) que não recebeu o nutriente, o rendimento máximo da parcela que recebeu o nutriente e o teor do nutriente na área testemunha (sem o nutriente) pode-se elaborar a curva de calibração.

A partir da curva de calibração podem ser definidas as faixas de teores do nutriente e as doses de máxima eficiência econômica. Uma forma é estimar graficamente traçando-se uma reta paralela à reta do custo dos fertilizantes tangenciando a curva de resposta, ou igualando a primeira derivada da função receita líquida a zero. A dose de fertilizante que iguala a função a zero é considerada a de máxima eficiência econômica. (Grimm, 1970; Alvarez, 1991; Black, 1993; Tisdale et al., 1993). A dose de máxima eficiência

econômica nem sempre será a mesma, pois os preços dos fertilizantes e produtos produzidos pelas culturas apresentam variações ao longo dos anos.

Na definição da dose mais econômica de fertilizantes nos estudos de calibração é indispensável conduzir experimentos de campo que simulem as condições naturais de produção, conforme a realidade de cada região agrícola, e que o rendimento da cultura a ser avaliada tenha um valor comercial, com um preço definido direta ou indiretamente, seja ele grãos, frutos, folhagens, flores, massa verde, etc (Kidder, 1993).

### **2.5.2. Curvas de resposta e o uso de modelos matemáticos**

Em fertilidade do solo, como em outros ramos da ciência, freqüentemente se trabalha com números que representam valores de grandeza. A determinação da relação de uma variável dependente (resposta) partindo do valor da variável independente (fator) é estimada por funções matemáticas, cujos coeficientes são avaliados estatisticamente.

Diversas são as funções matemáticas para explicar a relação entre variáveis, sendo apenas necessário selecionar aquela que melhor expresse a relação natural entre as variáveis com os dados dispersos em um gráfico de coordenadas cartesianas. Entretanto, algumas relações, como nas doses de fertilizantes e rendimento das culturas em experimentos de campo utilizados nas calibrações, podem ser influenciadas por inúmeros fatores e, neste caso, a função selecionada permite estimar com maior ou menor grau de confiança a relação.

O principal objetivo na escolha de uma função de produção é estimar uma resposta “y” para um determinado fator “x” conhecido. A partir da interpretação de uma curva de produção e do valor do nutriente em estudo, quantificado pelo método de análise do solo a ser calibrado, pode-se estimar a probabilidade de resposta à adubação com o mesmo nutriente para solos com quaisquer teores. A resposta pode ser baixa, média ou alta (Rouse, 1968; Olson et al., 1987). Em etapa subsequente de interpretação da curva de resposta, a partir das doses do nutriente em estudo, estimam-se as doses de fertilizantes para aumentar os teores do mesmo no solo e aumentar o rendimento das culturas em outros solos com as mesmas características.

O modelo matemático ou gráfico utilizado é o ponto-chave na eficiência da calibração. Alguns resultados estimados por diferentes modelos podem ser completamente diferentes, tais como observado por Cerrato & Blackmer (1990), Dahnke & Olson (1990) Alvarez (1991), Colwell (1994). Assim, a escolha do modelo mais adequado a ser utilizado na calibração deve considerar, além do coeficiente de determinação, a forma de resposta, e quando possível deve representar as leis biológicas que regem a relação fator-resposta (Alvarez, 1991).

As funções de produção mais utilizadas nos estudos de calibração de metodologias de análise de solo e recomendação de fertilizantes são as funções de Mitscherlich, quadrática, linear platô, raiz quadrada e logarítmica, entre outras (Colwell, 1966; Cate & Nelson, 1973; Dahnke & Olson, 1990; Raij, 1991; Black, 1993). Para Cerrato & Blackmer (1990), as equações linear platô e quadrática platô resultaram em menores doses de nitrogênio para o milho, enquanto que a equação linear indicou uma dose intermediária e próxima da média entre os métodos, enquanto que as equações de Mitscherlich e da raiz quadrada indicaram doses maiores. Doses maiores de fósforo também foram obtidas para o trigo com a função de Mitscherlich do que com a linear platô (Dahnke & Olson, 1990).

Willcox (1949) concluiu, a partir de vários experimentos de campo, que a resposta das plantas somente são curvilineares quando todas os fatores que influem nas respostas das plantas são ideais, e que o rendimento da cultura pode ser expressado apenas com a variação do fator em estudo. Por outro lado, Boyd et al. (1976) mostrou que os modelos são curvilineares devido à ocorrência de outros fatores limitantes, como doenças, outros nutrientes e outras situações não ideais. Bray (1963) concluiu que as respostas a nitrogênio são lineares, enquanto que para fósforo são curvilineares. Waggoner & Norvall (1979) também obtiveram respostas curvilineares para experimentos com doses de fósforo. Dahnke & Olson (1990) afirmam que os modelos curvilineares apresentam menor definição do rendimento máximo e estão sujeitos a maiores variações de locais e anos se comparado ao modelo linear platô (como na lei dos mínimos de Liebig).

### **2.5.3. Interpretação e recomendação de fertilizantes**

Após a calibração e a quantificação das doses de fertilizantes, sejam elas para a máxima eficiência econômica ou para rendimento máximo, deve-se definir o critério de adubação para estabelecer as doses de adubação nas tabelas de recomendação. O critério de elevação rápida e manutenção da fertilidade consiste em aplicar doses suficientes de fertilizantes (fósforo e potássio) para elevar os teores no solo no 1º cultivo, seguindo-se com aplicações anuais nas quantidades mais ou menos equivalentes à extração e exportação pelas culturas cultivadas (Dahnke & Olson, 1990). Este critério tem por objetivo elevar a fertilidade do solo para obtenção de altos rendimentos de todas as culturas e é semelhante ao critério de adubação de correção do solo empregado nas recomendações de adubação nos estados do RS e SC de 1969 a 1987 (Mielniczuk et al., 1969 a, b; Universidade..., 1973; Tabelas..., 1976; Manual..., 1981).

O critério de elevação da fertilidade do solo até o nível de suficiência tem por objetivo elevar, num tempo mais longo, a fertilidade do solo com base nas necessidades das culturas. As doses de fertilizantes são maiores nas faixas de menor fertilidade (muito baixo e baixo), intermediárias na faixa de fertilidade intermediária (médio) e menores ou sem fertilização nas faixas de maior fertilidade (alto e muito alto). Esta metodologia é a mais utilizada por laboratórios de universidades americanas nos estudos de calibração de métodos de análise de solo e recomendações de fertilizantes (Dahnke & Olson, 1990) e foi adotada nas recomendações de adubação nos estados do RS e de SC, a partir de 1987 (Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995).

### **2.6. Histórico das calibrações**

Segundo Rouse (1968) por muitos anos, antes da década de 1930, relacionou-se a fertilidade do solo (pela extração com soluções de ácidos fracos tamponados, tentando simular a extração de nutrientes pelas plantas) com o rendimento das culturas. Na década de 1930 difundiu-se ainda mais a utilização de soluções diluídas de ácidos e bases fortes na extração de elementos químicos na análise de solo. A partir daí, e especialmente nas décadas de 1940 e 1950, desenvolveram-se várias metodologias de extração de nutrientes, entre as quais, a maioria das metodologias conhecidas

atualmente. Essas metodologias se relacionavam melhor com os parâmetros de plantas do que as anteriores.

Após o desenvolvimento dessas novas metodologias de análise de solo e a utilização de outros modelos curvilíneos para explicar a relação entre fator de produção (fertilizantes) e a resposta das culturas (rendimento de grãos), os estudos de correlação e calibração se intensificaram. Segundo Olson et al. (1987), antes da década de 1950 existiam poucos trabalhos sobre calibração de valores determinados nas análises de solo e parâmetros de plantas.

A partir da década de 1950 foram realizados inúmeros estudos de calibração sendo na maioria estabelecidas faixas de fertilidade do solo de forma subjetiva, como por exemplo, baixa, média e alta, para probabilidade de alta, média e baixa resposta à adição de fertilizantes, respectivamente (Rouse, 1968; Cate & Nelson, 1973; Mielniczuk et al., 1969a, b). Faixas de teores muito baixo, baixo, médio e bom foram introduzidas em tabelas publicadas em 1973 (Tabelas..., 1973) para a interpretação de resultados de análises de solos para os estados do RS e SC. Outras como, limitante, muito baixo, baixo, médio, suficiente a alto foram introduzidas nas tabelas publicadas em 1987 (Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989 e 1995).

Os estudos de calibração realizados nos estados do RS e SC e no restante do Brasil tiveram impulso com o “Programa Nacional de Análise do Solo”, desenvolvido na década de 1960/70, coordenado pelo Ministério da Agricultura, em convênio com a Universidade da Carolina do Norte (EUA), utilizando o extrator Mehlich-1 (HCl 0,05M + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,0125M), conhecido na época como método Mehlich ou Carolina do Norte (Anghinoni & Volkweiss, 1984). No RS e SC, esses estudos se prolongaram até meados da década de 1980, com experimentos de campo, instalados em vários locais e conduzidos em parceria com as diversas instituições de ensino, pesquisa e extensão desses estados. As primeiras tabelas de recomendação de fertilizantes foram elaboradas em conjunto entre a Rede de Laboratórios de Análise de Solo e a Comissão de Fertilidade do Solo. Com o aumento no conhecimento em fertilidade de solo houve o ajuste ou a alteração das recomendações, até as recomendações atuais do programa de “Recomendações de adubação e

calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina” (Comissão..., 1995).

No RS, os estudos de calibração de fósforo e potássio iniciaram em 1968 com a implantação de experimentos em 16 locais cultivados com trigo. Na safra 1968/69, foram introduzidas as culturas de arroz, de soja e de milho com a inclusão de novos experimentos (Mielniczuk et al., 1969b). Em todos os experimentos, os fertilizantes foram distribuídos a lanço com incorporação na profundidade de 0-15 cm, no mesmo dia da semeadura das culturas. O delineamento experimental constou de oito tratamentos, com duas repetições, em várias combinações de N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O em kg ha<sup>-1</sup> (0-0-0, 0-200-50, 40-200-50, 80-200-50, 80-0-50, 80-100-50, 80-200-50 e 80-200-100) (Mielniczuk et al., 1969b).

O rendimento relativo para fósforo ou potássio foi obtido pela divisão do rendimento do tratamento sem o nutriente em estudo pelo de maior rendimento com dose de fósforo ou potássio multiplicado por 100, expresso como percentagem do rendimento máximo. A relação entre o fósforo ou o potássio do solo determinado com o método Mehlich-1 e os valores de rendimento relativo foi obtida pela plotagem dos mesmos (Mielniczuk et al., 1969b) em papel milimetrado na forma de gráfico com eixos cartesianos e o ajuste feito pelo desenho manual da curva.

Segundo depoimentos do professor João Mielniczuk (comunicação pessoal), nas primeiras calibrações feitas no RS, o traçado da linha de ajuste entre os pontos foi feito manualmente em papel milimetrado pela necessidade de se estabelecer uma função representativa do comportamento natural da produção em relação ao aumento dos teores no solo do nutriente em estudo e pela maior praticidade na obtenção das informações.

O teor crítico foi estabelecido como o valor da análise de solo quando o rendimento atingiu o valor de 90% do rendimento máximo e as doses de fertilizantes, para as adubações de correção até 1986, foram estabelecidas para elevar a fertilidade do solo até esse valor. Acrescentava-se para cada cultivo as quantidades necessárias de manutenção, considerando-se a exportação pelos grãos e o que era perdido para o sistema. A partir de 1987 houve a mudança de critério de adubação com as doses de fertilizantes

estabelecidas para máxima eficiência econômica já para o primeiro cultivo e elevação progressiva da fertilidade do solo no período de três cultivos.

## **2.7. Histórico das recomendações de corretivos e fertilizantes em uso no Rio Grande do Sul e Santa Catarina**

Segundo Tedesco et al. (1994), a primeira folha de recomendação de adubação foi elaborada em 1967 para o programa “Operação Tatu”. Em 1968 foram elaboradas tabelas de dupla entrada para “adubação de correção” e tabelas de “adubação de manutenção para as culturas”. Essas tabelas foram fornecidas pelo Laboratório de Solos do Curso de Pós-Graduação da Faculdade de Agronomia e Veterinária (Universidade..., 1968).

Os primeiros estudos de calibração no RS foram feitos para a cultura do trigo em 16 locais, envolvendo diversas instituições (Mielniczuk et al., 1969b). Estes resultados, somados aos dados de outras culturas, deram origem às “Recomendações de adubação e calcário para as principais culturas do Estado do Rio Grande do Sul” (Mielniczuk et al., 1969a).

Nessas recomendações estabeleceram-se quatro faixas de fósforo sendo elas denominadas muito baixo, baixo, médio e bom (respectivamente para os teores de 0-4,0, 4,1-8,0, 8,1-12,0 e >12,0 mg L<sup>-1</sup> em solo argilosos e de 0-10,0, 10,1-20,0, 21,0-30,0 e >30,0 mg L<sup>-1</sup> em solos arenosos), com teor crítico de 12 e de 30 mg L<sup>-1</sup> em solos argilosos e arenosos, respectivamente. Como referências de solos argilosos foram sugeridas as unidades de mapeamento (atualizadas por Streck et al., 2002) Santo Ângelo (LVdf), Erechim (LVaf), Charrua (RLe), Aceguá (VEo), Estação (NVd) e Ciríaco (MTf) e de solos arenosos as unidades de mapeamento Cruz Alta (LVd), Júlio de Castilhos (PVAa), Passo Fundo (LVd) e Tupanciretã (PVAd).

Para o potássio também foram estabelecidas quatro faixas de fertilidade (muito baixo, baixo, médio e bom, para teores 0-20, 21-40, 41-60 e >60 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente), com o teor crítico de 60 mg L<sup>-1</sup>, independente do teor de argila.

Nas primeiras tabelas de adubação elaboradas por Mielniczuk et al. (1969a), as recomendações foram divididas em adubação corretiva e de manutenção para fósforo e potássio. As corretivas tinham por objetivo elevar a fertilidade do solo à faixa bom já no primeiro cultivo, e criar condições

favoráveis de nutrição para todas as culturas exploradas pelo agricultor. Baseavam-se na cultura mais exigente e que proporcionava o maior retorno econômico. Assim, as recomendações de adubação corretiva eram válidas para 4 a 5 anos e eram consideradas como investimento para fins de financiamento. As doses, tanto de  $P_2O_5$  como de  $K_2O$ , para as adubações de correção eram de 120, 80, 40 e 0  $kg\ ha^{-1}$  para faixas de fertilidade muito baixo, baixo, médio e bom, respectivamente.

As adubações de manutenção, realizadas a cada cultivo, tinham a finalidade de manter os níveis de fertilidade e garantir elevadas produções. Foram estabelecidas para cada cultura e equivaliam aproximadamente à exportação de nutrientes pelos grãos; as de  $P_2O_5$  eram de 30, 40 e 60  $kg\ ha^{-1}$ , enquanto que as de  $K_2O$  eram de 30-22, 40-20 e 45-30  $kg\ ha^{-1}$  para a soja, trigo e milho, respectivamente. As doses de  $K_2O$  eram para teores abaixo e acima de 60  $mg\ kg^{-1}$ .

Em 1972 foram publicadas as “Sugestões para adubação no Rio Grande do Sul”, com a substituição da adubação de correção por outra de elevação da fertilidade do solo a longo prazo, sem prejuízo para a produção (Patella, 1972). Essas sugestões mantiveram os teores críticos definidos por Mielniczuk et al. (1969a). Entretanto, foram estabelecidas apenas três classes de teores de fósforo (baixo, médio e alto para teores 0-6,0, 6,1-12,0 e > 12,0  $mg\ L^{-1}$  em solos argilosos e 0-15,0, 15,1-30,0 e > 30,0  $mg\ L^{-1}$  em solos franco arenosos, respectivamente). Para potássio, Patella (1972) propôs apenas duas faixas, sendo: teores baixo e médio para valores de 0-50 e 51-100  $mg\ L^{-1}$ , respectivamente. As sugestões elaboradas por Patella não foram incorporadas ao sistema de recomendações no RS e SC.

Em 1973 foram publicadas novas tabelas de adubação corretiva e de manutenção (Universidade..., 1973) para solos e culturas dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, mantendo-se o critério de adubação de correção do solo. Porém, agregaram-se mudanças significativas aos teores críticos e faixas de fertilidade de fósforo, para solos com diferentes classes texturais. Para os solos argilosos definidos por Mielniczuk (1969a), foi estabelecido o teor crítico de 9,0  $mg\ L^{-1}$  com quatro faixas de teores de fósforo (muito baixo, baixo, médio e bom, para teores 0-3,0, 3,1-6,0, 6,1-9,0 e >9,0  $mg\ L^{-1}$ , respectivamente). Introduziu-se uma nova classe textural denominada solos

francos, com teor crítico de  $18,0 \text{ mg L}^{-1}$ , sendo estabelecidas as faixas de teores de 0-6,0, 6,1-12,0, 12,1-18,0 e  $> 18,0 \text{ mg L}^{-1}$  para a faixa muito baixo, baixo, médio e bom respectivamente. Foram sugeridos como referência os solos das unidades de mapeamento (atualizado por Streck et al., 2002) Uruguaiana (MEk), Alto das Canas (PVd), São Jerônimo (PVd), Santa Maria (ACt) e Pedregal (RLe). Manteve-se o teor crítico de  $30 \text{ mg L}^{-1}$  para o antigo grupo franco arenoso (Mielniczuk et al., 1969a), denominado-se apenas solos arenosos. Como solos de referência foram sugeridas as unidades de mapeamento (atualizado por Streck et al., 2002) Bom Retiro (PVd), São Pedro (PVd), Osório (RQo), Cruz Alta (LVd), Itapuã (PVAd) e Tupanciretã (PVAd).

As doses de adubação corretiva estabelecidas por Mielniczuk et al. (1969a) foram mantidas, porém alteraram-se as doses de adubação de manutenção para 70, 70 e  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e para de 50-30-0, 50-30-0 e 70-40-0  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  para as culturas soja, trigo e milho, respectivamente; as doses de  $\text{K}_2\text{O}$  eram para teores de potássio  $<60$ , 60-100 e  $>100 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente.

A partir de 1976 foram definidos critérios quantitativos de argila para a separação dos solos em grupos texturais (Tabelas... (1976). Assim, os solos passaram a ser classificados como argilosos, francos e arenosos para teores de argila  $>40$ , 40-20 e  $<20\%$  com teores críticos de fósforo 30, 18 e  $9 \text{ mg L}^{-1}$ , respectivamente. A adubação corretiva foi mantida na publicação das tabelas em 1976 (Mielniczuk et al., 1969a), e as adubações de manutenção de  $\text{P}_2\text{O}_5$  foram ajustadas, sendo recomendados  $75 \text{ kg ha}^{-1}$  para a soja e o trigo e 75-90  $\text{kg ha}^{-1}$  para o milho, abaixo e acima do rendimento de  $5000 \text{ kg ha}^{-1}$ . As doses de  $\text{K}_2\text{O}$  para a soja e o trigo foram de 50-30-10 para os solos com teores  $<80$ , 80-120 e  $>120 \text{ mg kg}^{-1}$ . Para o milho foram definidas as doses de 50-30-10 e 70-40-12 para rendimentos menores e maiores do que  $5000 \text{ kg ha}^{-1}$  e teores  $<80$ , 80-120 e  $>120 \text{ mg kg}^{-1}$ , respectivamente. Essas definições foram mantidas na edição do “Manual de adubação e calagem para cultivos agrícolas do Rio Grande do Sul e Santa Catarina” (Manual..., 1981).

Siqueira et al. (1987) introduziram algumas mudanças significativas, tanto conceitualmente quanto quantitativamente nas “Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina”. Entre elas, a substituição do critério de adubação de correção da fertilidade a

cada 4 ou 5 anos, mais a adubação anual da cultura pelo de máxima eficiência econômica por cultivo com aumento gradual da fertilidade do solo e análise de solos a cada três cultivos.

Outra mudança importante foi a substituição das três classes de teores de argila, com seus respectivos teores críticos elaborados por Tabelas... (1976), por cinco classes de teores de argila, >55, 55-41, 40-26, 25-11 e  $\leq 10\%$ , com novos teores críticos de 6, 9, 14, 18 e 24 mg kg<sup>-1</sup> de fósforo, respectivamente. Cada uma dessas cinco classes de teores de argila foi subdividida em faixas de teores de fósforo: limitante, muito baixo, baixo, médio, suficiente (corresponde à faixa de teor crítico) e alto. Foi mantida a classe solos alagados, com teor crítico de 6 mg kg<sup>-1</sup> de fósforo, independentemente do teor de argila. A dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para a máxima eficiência econômica foi estabelecida para cada cultura e em cada classe textural. Do total de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para os 3 cultivos, aproximadamente 50, 30 e 20% são aplicados no primeiro, segundo e terceiro cultivos, de forma a permitir que, pelo efeito residual, a disponibilidade de fósforo seja semelhante à dose do primeiro cultivo (Fole & Grimm, 1973; Barrow, 1980; Kochhann et al., 1982; Rodrigues et al., 1985; Cassol, 1999).

Nas tabelas de recomendação de adubação publicadas em 1987 (Siqueira et al., 1987), o teor crítico de potássio passou de 60 mg kg<sup>-1</sup> (Mielniczuk et al., 1969a) para 80 mg kg<sup>-1</sup> e as faixas de teores foram divididas em limitante, muito baixo, baixo, médio, suficiente (corresponde à faixa de teor crítico) e alto, para os teores  $\leq 20$ , 21-40, 41-60, 61-80, 81-120 e >120 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente. As doses de máxima eficiência econômica de K<sub>2</sub>O também foram especificadas para cada cultura e distribuídas em aproximadamente 50, 30 e 20% da dose para os três cultivos.

A reedição das tabelas de “Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina”, publicadas em 1989 e 1995 (Comissão..., 1989 e 1995), contém a maior parte dos conhecimentos adquiridos com os estudos efetuados desde a implantação do programa de análise de solos a partir da década de 1960.

## **2.8. Recomendações de fertilizantes baseadas nos estudos de calibração em solos sob sistema convencional de cultivo e a conjuntura atual**

As recomendações de adubação e calagem em uso no Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Comissão..., 1995) foram elaboradas para o sistema convencional de cultivo, e são baseadas nos estudos de calibração de fósforo, potássio e nitrogênio, feitos no final da década de 1960 a meados da década de 1980 e nos conhecimentos acumulados até sua edição. Por se basearem quase que exclusivamente nessas calibrações, há dúvidas quanto à adequação das mesmas à situação atual. Introduziram-se nos últimos anos mudanças significativas nos sistemas de cultivo, destacando-se: a) mais de 50% das áreas de produção com as principais culturas no RS são cultivadas sob sistema plantio direto; b) a amostragem do solo sob sistema plantio direto é feita na camada de maior concentração de nutrientes (0-10 cm); c) o rendimento médio das principais culturas aumentou; d) o método de análise de solo em uso não é adequado para avaliar fósforo em solos que receberam fosfatos naturais; e e) atualmente existem métodos alternativos mais eficientes, de baixo custo e com praticidade laboratorial que também podem ser utilizados.

### **2.8.1. Sistema plantio direto**

A área cultivada sob sistema plantio direto no RS aumentou muito na última década, passando de 190 mil ha (3%) em 1990 para 3,8 milhões de ha (65%) em 1998, quando atingiu a maior extensão de cultivo sob esse sistema. Atualmente, está próxima dos 3,6 milhões de ha (61%) (Farias & Ferreira, 2000). Entretanto, existem algumas regiões do RS, como a do Planalto Médio e a do Alto Uruguai com mais de 90% da área cultivada sob sistema plantio direto (Denardin et al., 1998). A soja é a cultura mais plantada nas áreas cultivadas sob sistema plantio direto, com 2,3 milhões de ha, de um total de 3,0 milhões de ha (77%), seguida do trigo com 365 mil ha, de um total de 537 mil ha (66%), e do milho com 771 mil ha, de um total de 1,5 milhões de ha (52%) (Farias & Ferreira, 2000).

A dinâmica das características químicas, físicas e biológicas do solo é alterada quando este passa de um sistema de manejo (convencional) para outro (plantio direto). Entre as principais mudanças observadas nos solos sob

sistema plantio direto, destacam-se a menor adsorção de fósforo pelo menor revolvimento (Eltz et al., 1989; Martins & Gonçalves, 1997), a maior concentração superficial de nutrientes, entre eles o fósforo e o potássio (Eltz et al., 1989; Schlindwein & Anghinoni, 2000) e o aumento da matéria orgânica (Eltz et al., 1989; Bayer, 1996; Schlindwein & Anghinoni, 2000), que associada à resteva das culturas mantida na superfície, diminui as perdas de solo e nutrientes por erosão (Bertol et al., 1997; Seganfredo et al., 1997) permitindo um melhor aproveitamento dos fertilizantes aplicados.

### **2.8.2. Amostragem de solos**

A amostragem em solos sob sistema convencional de cultivo é feita na camada 0-17/20 cm de profundidade, enquanto que em solos sob plantio direto é feita na camada de 0-10 cm. A menor profundidade de amostragem do solo sob sistema plantio direto, associada à concentração superficial de fósforo e potássio, resulta em valores mais elevados dos atributos de fertilidade.

Em experimentos de longa duração estudados por Schlindwein & Anghinoni (2000), foi observado um aumento médio em torno de 50 e 30% nos teores de fósforo e potássio, respectivamente, nas amostras de solo sob sistema plantio direto, retiradas da camada 0-10 cm, em relação aos valores daquelas da camada 0-20 cm sob sistema convencional de cultivo. Entretanto, o rendimento das culturas cultivadas nesses experimentos (total de 145 cultivos) não foi significativamente maior sob sistema plantio direto (aumento de 4,8%). Assim, espera-se que o teor crítico, tanto para fósforo como para potássio, seja maior na camada 0-10 cm em solos sob sistema plantio direto, tanto em relação à camada 0-20 cm deste sistema, quanto à mesma camada sob sistema convencional de cultivo.

### **2.8.3. Rendimento das culturas**

Os dados dos estudos de calibração realizados de 1969 a meados da década de 1980 no RS e SC, disponíveis na literatura, apresentam baixos rendimentos médios das culturas nas parcelas com os melhores níveis de fertilidade, sendo de: 1488 a 2127 kg ha<sup>-1</sup> para a cultura do trigo (Mielniczuk et al., 1969b; Fole & Grimm, 1973; Goepfert et al., 1974a); 2188 a 2445 kg ha<sup>-1</sup>

para a cultura da soja (Vidor et al., 1973; Vidor & Freire, 1974); e 3994 kg ha<sup>-1</sup> para o milho (Goepfert et al., 1974b). Se comparados com os rendimentos médios dessas culturas em experimentos conduzidos na década de 1990 e em solos com alta fertilidade, verificam-se aumentos destes em relação àqueles superiores a 40, 20 e 65% para trigo, soja e milho respectivamente (Wiethölter et al., 1998).

O rendimento médio de trigo, soja e milho, a nível de lavoura no RS, aumentou de 860, 1213, 1459 a 1785 kg ha<sup>-1</sup> para o trigo; de 1314, 1419, 1691 a 1969 kg ha<sup>-1</sup> para a soja; e de 1395, 1831, 2445 a 3142 kg ha<sup>-1</sup> para o milho nas décadas de 1970, 1980, 1990, e média de 2000 e 2001, respectivamente (Emater/RS, 1998; Emater/RS, 2003; IBGE, 2003). Ressalta-se que nas lavouras de melhor nível tecnológico os rendimentos são superiores a 3000, 3000 e 10000 kg ha<sup>-1</sup> para a soja, trigo e milho, respectivamente. Esses aumentos podem ser devido à utilização de variedades mais competitivas e/ou às técnicas mais avançadas de produção. Entretanto, acredita-se que a exigência por nutrientes também tenha aumentado, conseqüentemente a necessidade de maiores doses, e possivelmente o teor crítico deva ser diferente para a máxima eficiência técnica e econômica.

#### **2.8.4. Metodologia utilizada**

O método Mehlich-1 usado atualmente na avaliação da disponibilidade de fósforo do solo nas análises de rotina é composto por uma solução diluída de ácido forte (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + HCl) que reage intensamente com o fosfato natural (reação básica), muito utilizado em lavouras cultivadas sob sistema plantio direto (em função do custo), superestimando a disponibilidade de fósforo nessas lavouras (Raij, 1991; Kroth, 1998). Por outro lado, o método Mehlich-1 extrai menores quantidades de fósforo em solos muito argilosos, subestimando, em alguns casos, a sua disponibilidade. Isto pode ocorrer pela neutralização parcial da solução extratora e/ou pela readsorção do fósforo extraído (Kamprath & Watson, 1980), podendo resultar em baixos coeficientes de determinação (r<sup>2</sup>) entre os teores no solo e parâmetros de planta (Anghinoni & Volkweiss, 1984). Algumas dessas limitações do método são parcialmente contornadas pela inclusão de variáveis do solo, como o teor de argila, que

influenciam na difusão do fósforo. Por isso, no RS e SC, os solos foram separados por classes de argila nos estudos de calibração. Dessa forma, necessita-se da análise do teor de argila para a definição dos teores de fósforo disponível para as culturas, aumentando, assim, o custo das análises de solos.

O método Mehlich-3 apresenta metodologia de execução semelhante à do método Mehlich-1, e pode ser utilizado nas análises de rotina com a vantagem de extração simultânea de alguns macro e micronutrientes, agilizando as análises e diminuindo os custos (Mehlich, 1984; Embrapa, 1997). O método da resina também extrai simultaneamente cálcio e magnésio e está adaptado para análises em rotina. Outra vantagem dos métodos Mehlich-3 e resina é a maior extração de fósforo do que o método Mehlich-1, propiciando o estabelecimento de faixas de fertilidade mais amplas nos estudos de calibração, o que pode resultar em maior precisão nas interpretações e recomendações de fertilizantes. Além disto, o método da resina geralmente apresenta maior coeficiente de determinação entre o fósforo extraído pelo método e os parâmetros de plantas, se comparado ao método Mehlich-1 (Raij, 1978; Anghinoni e Volkweiss, 1984; Fixen e Grove, 1990).

## **2.9. Hipóteses**

Novos estudos de calibração se justificam pelas seguintes hipóteses:

a) o coeficiente de determinação entre alguns parâmetros de planta e o fósforo do solo, determinado pelo método da resina, é maior do que por outros métodos, pois esse apresenta características de extração de fósforo que mais se assemelham com a absorção de fósforo pelas plantas; b) o teor crítico dos nutrientes fósforo e potássio é maior na camada 0-10 cm de profundidade em solos sob sistema plantio direto em relação à camada 0-20 cm tanto sob sistema plantio direto como sob sistema convencional, devido à concentração superficial de nutrientes; c) o teor crítico de fósforo e potássio é maior na camada 0-20 cm de profundidade sob sistema de plantio direto do que o proposto nas tabelas de recomendação em vigor para os estados do RS e SC com calibrações realizadas sob sistema convencional de cultivo; d) as doses de

$P_2O_5$  e  $K_2O$  recomendadas para as culturas cultivadas sob sistema plantio direto são maiores em relação às doses estabelecidas a partir das calibrações realizadas no sistema convencional, devido às maiores necessidades de nutrientes em função do aumento da produtividade ao longo dos anos; e) o teor crítico e as faixas de fertilidade de fósforo sob sistema plantio direto são maiores nas calibrações dos métodos Mehlich-3 e resina, pois ambos extraem mais fósforo em relação ao método Mehlich-1.

## **ESTUDO-I**

### **3. ÍNDICE DE EQUIVALÊNCIA ENTRE O FÓSFORO DETERMINADO PELOS MÉTODOS DA RESINA DE TROCA ANIÔNICA E MEHLICH-1**

#### **3.1. INTRODUÇÃO**

O atual programa de recomendação de adubação e calagem do RS e SC foi implantado a partir de 1969 e atualmente é o resultado de pesquisas em fertilidade do solo realizadas durante mais de três décadas. Este programa está baseado em estudos de calibração feitos para os atributos fósforo e potássio com a utilização do método proposto por Mehlich (1953), adaptado para a situação específica dos solos nos estados do RS e SC (Mielniczuk et al., 1969a; Tedesco et al., 1995).

A eficiência do método Mehlich-1 em estimar a quantidade de potássio disponível para as plantas pode ser verificada pelos coeficientes de determinação, estatisticamente significativos, obtidos entre os valores determinados pelo método e os parâmetros de plantas (Oliveira, 1970; Mielniczuk & Selbach, 1978; Nachtigall & Vahl, 1991; Miola, 1995; Kroth, 1998). Porém, em alguns casos, esses coeficientes são considerados baixos para o elemento fósforo, o que pode indicar uma capacidade limitada desse método em estimar a disponibilidade de fósforo para as plantas (Raj, 1978; Anghinoni & Volkweiss, 1984; Fixen e Grove, 1990; Siqueira et al, 2000). Em vários estudos feitos no RS foram relatados resultados de pesquisas cujos coeficientes de determinação entre o fósforo quantificado pelo método Mehlich-1 e os parâmetros de plantas, embora significativos, freqüentemente são menores do que 0,70 (Fole & Grimm, 1973; Anghinoni & Bohnen, 1974; Magalhães, 1974; Rein, 1991; Salet et al., 1994; Miola, 1995; Braida et al., 1996; Silva, 1996; Kroth, 1998; Siqueira et al., 2000).

Um coeficiente de determinação baixo pode ser devido à menor extração de fósforo pelo método Mehlich-1 em solos argilosos, se comparada à extração em solos arenosos. Deve-se, em parte, à neutralização parcial da solução extratora, ou à readsorção do fósforo já solubilizado (Kamprath & Watson, 1980). No entanto, em solos argilosos a disponibilidade de fósforo para as plantas é maior do que em solos arenosos para valores semelhantes de fósforo no solo, determinada pelo método, devido ao maior suprimento desse nutriente por difusão (Oliver & Barber, 1966; Vargas et al., 1983; Barber, 1995). Os estudos conduzidos a partir desse conhecimento mostraram que a inclusão de outro fator, no caso a argila, ajustou melhor o dados de calibração. No entanto a determinação da argila nos laboratórios de rotina encarece a análise, aumenta o tempo necessário para a entrega dos resultados aos interessados e possibilita erros de interpretação da real disponibilidade de fósforo, especialmente nos solos argilosos com teores de fósforo nas faixas limitante ou muito baixo, onde os intervalos entre as classes de fertilidade são muito estreitos (Comissão..., 1995).

Os menores coeficientes de determinação obtidos com o método Mehlich-1 também podem ser atribuídos à baixa precisão do mesmo, ao procedimento laboratorial (instalações, pessoal e equipamentos) (Olsen & Sommers, 1992) e às variações de temperatura no período de extração (Yang et al., 1991; Schlindwein et al., 2002). Resultados do controle de qualidade nas análises de solos dos laboratórios filiados à Rede Oficial de Laboratórios no RS e SC (ROLAS) mostraram que o coeficiente de variação foi em média de 42% nas análises de fósforo das amostras padrão analisadas entre 1991 a 1997 (Wiethölter et al., 1997) e de 20,1% em 2001 (Wiethölter 2002).

Outra incerteza é o valor obtido na extração de fósforo de solos adubados com fosfato natural (reação básica). Composto por soluções ácidas, o método Mehlich-1 extrai, nesse caso, mais fósforo do que realmente está disponível para as plantas (Rajj, 1991; Kroth, 1998), subestimando a quantidade de fertilizante para as culturas. Para contornar esse problema, a Comissão ... (2003) recomenda a determinação de fósforo pelo método da resina de troca iônica quando houver a aplicação de fosfatos naturais. Este método extrai os íons fosfato da solução do solo, propiciando o deslocamento destes da fase sólida para a solução do solo, a fim de manter o equilíbrio químico. Nesse procedimento, devido ao longo período de agitação (16 horas), todo fósforo das formas lábeis, teoricamente, é extraído. O

deslocamento dos íons fosfato da fase sólida do solo para a solução, para manter o equilíbrio químico, pode ser comparado à difusão dos íons de fósforo para a solução do solo e dessa até às raízes. Assim como neste caso, naquele ocorre a retirada por completo do íon fósforo da solução. Por isso freqüentemente o método da resina apresenta coeficientes de determinação maiores entre o fósforo do solo e o fósforo absorvido pelas plantas do que o método Mehlich-1 (Raij, 1978; Anghinoni & Volkweiss, 1984; Fixen & Grove, 1990; Miola, 1995; Kroth, 1998). Entretanto, há estudos que mostram semelhança entre esses valores, e outros ainda em que os coeficientes são menores para o método da resina em comparação com o método Mehlich-1, principalmente quando o fator argila é considerado (Silva & Raij, 1996).

A calibração do método da resina para os solos do RS e SC foi feita com base nos resultados de Siqueira et al. (2000), que utilizaram resinas em esferas, e nos resultados de pesquisas realizadas no RS por outros autores (Magalhães, 1974; Magalhães & Gallego, 1974; Rein, 1991; Salet et al., 1994; Miola, 1995; Braida et al. 1996; Silva, 1996; Kroth, 1998). O teor crítico de fósforo estabelecido foi 20 mg dm<sup>3</sup>, independentemente do teor de argila do solo. Embora no estudo de Silva e Raij (1996) a inclusão da argila não tenha melhorado os valores dos coeficientes de determinação para o método da resina de troca iônica, vários estudos realizados no RS (Miola, 1995; Braida et al., 1996; Kroth, 1998; Siqueira et al., 2000) mostram ser necessária a inclusão da mesma no estabelecimento do teor crítico e das faixas de teor de fósforo no solo. Nesses estudos, os coeficientes de determinação entre o fósforo extraído pelo método da resina e o fósforo absorvido pelas plantas foram maiores para os solos separados por classes texturais, se comparados àqueles obtidos com a utilização de todos os solos independentemente do teor de argila.

Além disso, o método da resina extrai mais fósforo dos solos argilosos e menos dos solos arenosos do que o método Mehlich-1. Em 20 solos representativos do RS, o método da resina extraiu 1,6 e 2,6 vezes mais fósforo do que o método Mehlich-1 para os solos com argila respectivamente inferior e superior a 400 g dm<sup>3</sup> (Miola, 1995), e de 1,5, 1,9, 2,8, 2,9 e 3,5 vezes mais fósforo do que o método Mehlich-1 para as classes de solo 5, 4, 3, 2 e 1, respectivamente (Kroth, 1998). Os resultados de ambos os métodos (Mehlich-1 e resina) correlacionam entre si (Miola, 1995; Kroth, 1998) e com os parâmetros de plantas (Rein, 1991; Salet et al., 1994; Miola, 1995; Braida et al. 1996; Silva, 1996; Kroth, 1998).

A condução de novos ensaios de calibração de métodos de análise de solo a campo demanda tempo, recursos financeiros e envolvimento de grupos de pesquisadores para conduzir os experimentos e interpretar os resultados. Assumindo que o fósforo absorvido pelas plantas é o fósforo lábil, e que este pode ser estimado tanto pelo método Mehlich-1 quanto pelo método da resina de troca iônica e que ambos se correlacionam, bastaria apenas ajustar um índice entre esses métodos. Com isso as tabelas de recomendações atuais obtidas com a calibração do método Mehlich-1, poderiam ser utilizadas para interpretar os valores de fósforo obtidos pelo método da resina. O presente trabalho teve por objetivo propor um índice de equivalência entre o fósforo do solo determinado pelos métodos da resina e o Mehlich-1.

### 3.2. MATERIAL E MÉTODOS

Foram selecionadas 100 amostras de solo enviadas ao Laboratório de Análise de Solo da UFRGS, provenientes principalmente da região do Planalto do RS, onde o plantio direto é o sistema de cultivo predominante, obtendo-se um conjunto de 20 amostras de solo em cada classe de teor de argila (argila >550, 550-410, 400-260, 250-110 e <110 g dm<sup>3</sup> de solo nas classes 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente), sendo 10 amostras de solo com teores de fósforo acima do teor crítico e 10 abaixo (teor crítico de fósforo nos teores 6, 9, 12, 18 e 24 mg dm<sup>3</sup> de solo nas classes de argila 1, 2, 3, 4 e 5, respectivamente) (Comissão..., 1995). O fósforo dessas amostras foi determinado quatro vezes em datas diferentes, pelos métodos Mehlich-1 e resina de troca iônica em membranas, descritos por Tedesco et al. (1995). No método da resina foram introduzidas algumas modificações descritas no Apêndice 1. A temperatura no período de extração para ambos os métodos foi mantida em aproximadamente 20°C.

As análises de regressão foram feitas com auxílio dos programas SIGMAPLOT e SIGMASTAT, utilizando-se as equações polinomiais de primeiro e segundo grau que melhor se ajustaram aos dados. Os resultados obtidos com os métodos Mehlich-1 e resina de troca iônica em membranas serão denominados daqui para diante de P Mehlich-1 e P resina.

### 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 mostra a distribuição dos pontos dos teores de fósforo, as funções de regressão e os coeficientes de correlação do fósforo do solo extraído pelos métodos resina de troca iônica e Mehlich-1, para todos os solos (Figura 2 a) e para os solos separados por classes de argila (Figura 2 b-f). O coeficiente de correlação foi significativo ( $r^2 = 0,53^{**}$ ) para a relação P Mehlich-1 e P resina, tal como observado em outros trabalhos feitos no RS (Miola, 1995; Kroth, 1998), sugerindo a hipótese de que o método da resina pode ser utilizado para substituir os resultados do método Mehlich-1. Entretanto, observa-se que a correlação não é linear, diferentemente do apresentado por Miola (1995) e Kroth (1998), pois à medida que aumenta o fósforo extraído pelos métodos diminui a relação do fósforo P resina:P Mehlich-1 (Figuras 2-a, d, e, f). Isso pode ser devido à menor extração de fósforo pelo método da resina em comparação à extração pelo método Mehlich-1, à medida que diminui o teor de argila e aumenta o teor de fósforo no solo.

Essa tendência de diminuição da relação é devida aos diferentes mecanismos de extração entre os métodos. O método Mehlich-1 extrai o fósforo por dissolução seletiva das frações mais lábeis, a partir do abaixamento do pH (entre 1 e 2). Em solos mais argilosos, com alto poder tampão, o tempo de decantação de 16 horas utilizado na metodologia de extração (Tedesco et al., 1995) pode promover a readsorção de fósforo já dissolvido, resultando em valores de fósforo extraído menores nos solos argilosos em comparação aos solos arenosos (Kamprath e Watson, 1980). Isso não ocorre com o método da resina que extrai o fósforo da solução do solo por mecanismo de troca iônica. Neste, o fósforo da solução passa para a resina por troca de íons, originários da própria resina, que vão para a solução a fim de manter o equilíbrio químico. Com a diminuição do fósforo da solução do solo, há a reposição por fósforo oriundo de formas de sólidas ou adsorvido até a exaustão das fontes consideradas disponíveis (lábeis) que podem passar para a solução durante o período de extração devido à agitação de 16 horas e à saturação com água.

A agitação favorece a extração do fósforo do solo devido à presença do dreno que é a resina. Com esse método não há a possibilidade de readsorção

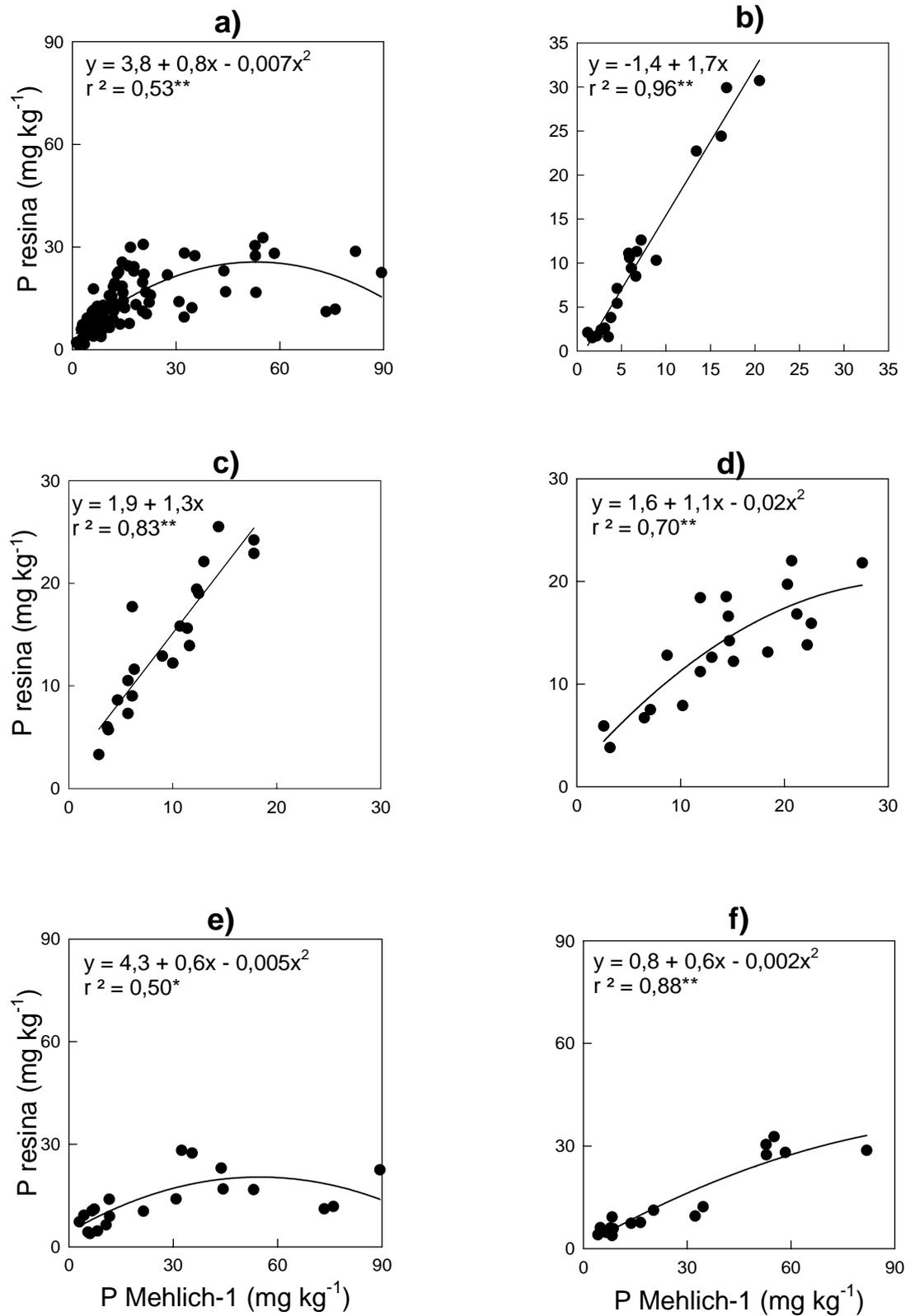


Figura 2. Correlação entre o fósforo determinado pelos métodos resina de troca iônica e Mehlich-1; a) todas as classes de argila; b) argila >550 g dm<sup>3</sup>; c) argila 550-410 g dm<sup>3</sup>; d) argila 400-260 g dm<sup>3</sup>; e) argila 250-110 g dm<sup>3</sup>; f) argila <110 g dm<sup>3</sup>. \*\* significativo: P<0,01; \* significativo: P<0,05.

porque o fósforo retirado da solução não retorna à mesma. O fósforo ligado à resina não está em equilíbrio com a solução como ocorre no processo de extração do método Mehlich-1. Assim, solos com maior poder tampão de fósforo, como os argilosos, liberam mais fósforo com o método da resina do que com o método Mehlich-1. Isso não necessariamente ocorre em solos arenosos. Quando os solos foram separados por classes texturais, a função da relação do fósforo extraído pelos métodos resina e Mehlich-1, que melhor se ajustou à distribuição dos pontos, foi linear para os solos argilosos e curvilínea para os solos mais arenosos (Figura 2). O mesmo ocorreu quando os solos foram separados por teores de fósforo abaixo e acima do teor crítico determinado pelo método Mehlich-1 (Comissão..., 1995) – (Figura 3).

As funções curvilíneas (quadráticas) mostram uma aparente saturação das resinas resultando em menor extração nos casos de altos teores determinados pelo método Mehlich-1. Entretanto, testes preliminares (não publicados) demonstraram que o método da resina possui capacidade de extração de fósforo maior do que 200 mg cm<sup>-2</sup> de resina em membrana. Se por um lado o método da resina extrai menos fósforo em solos arenosos, por outro lado, o método Mehlich-1, composto por uma solução extratora ácida, promove a diminuição do pH do solo e a dissolução de compostos de fósforo, extraíndo formas que não necessariamente contribuem para o fósforo da solução do solo, como por exemplo, as fontes ligadas a cálcio (Raij, 1991). Além disso, pode ocorrer a neutralização ou a complexação de componentes da solução extratora por compostos orgânicos e inorgânicos presentes no solo, reduzindo a eficiência da extração, especialmente em solos com maior poder tampão de modificação da acidez, como os solos argilosos.

O fósforo extraído pelo método da resina, na média, diminuiu em relação ao Mehlich-1, à medida que diminuiu o teor de argila do solo, tal como observado por Miola (1995), Kroth (1998) e Siqueira et al. (2000). Entretanto, essa relação foi menor do que a observada pelos autores. Deve-se, provavelmente, aos menores teores de fósforo nos solos argilosos (maior teor tampão), onde a resina extrai mais e, aos maiores teores de fósforo nos solos arenosos, onde o Mehlich-1 extrai mais fósforo. Pode ser também, pelo maior número de solos, com representatividade das cinco classes texturais e teores abaixo e acima do teor crítico do método Mehlich-1, utilizados neste trabalho e ao controle da temperatura que influi na extração de fósforo (Yang et al., 1991; Kroth, 1998; Schlindwein et al., 2002).

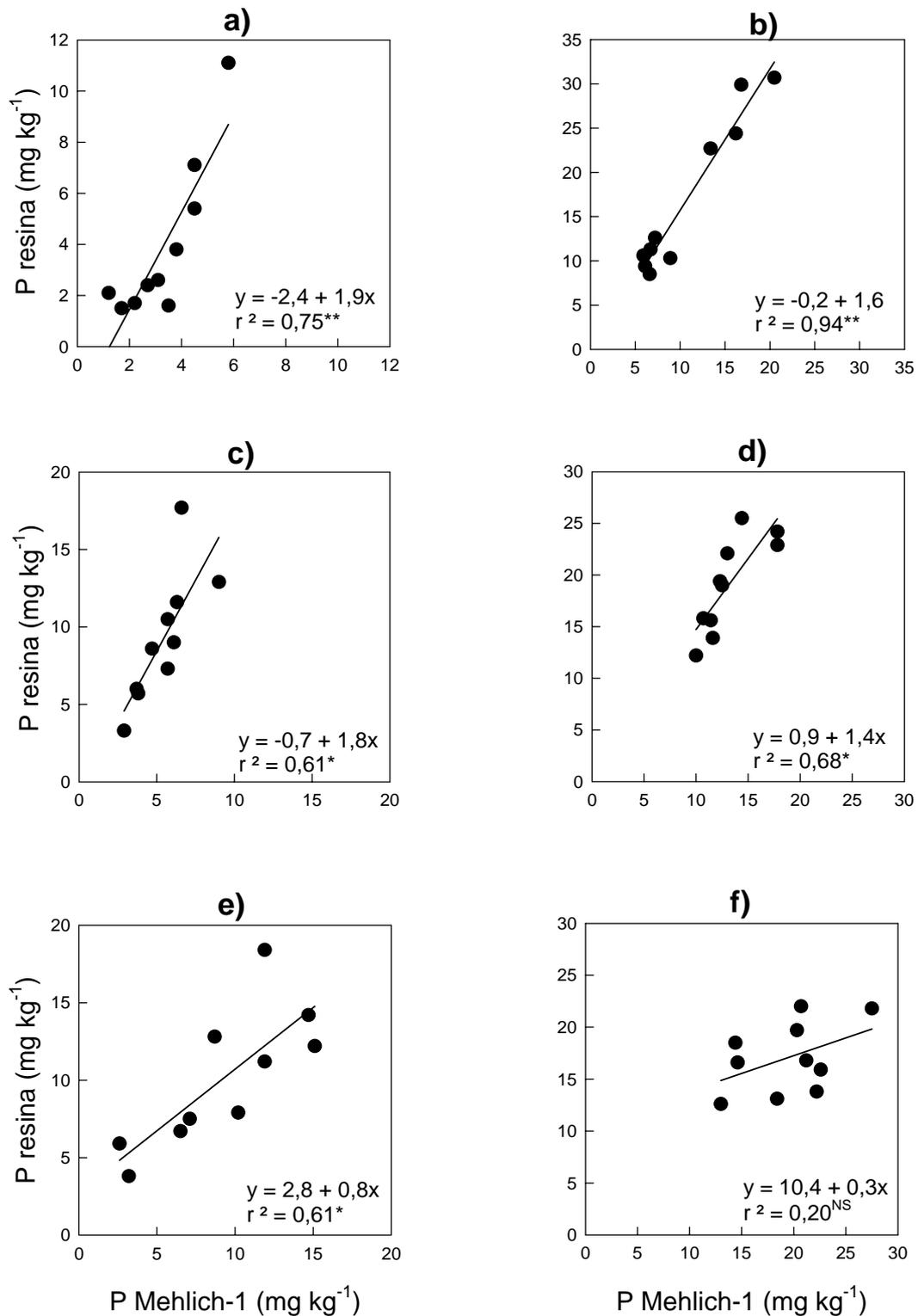


Figura 3. Correlação entre o fósforo determinado pelos métodos resina de troca iônica e Mehlich-1 para classes de argila e teores de fósforo (Comissão..., 1995); a) argila  $>550 \text{ g dm}^{-3}$ ,  $<6 \text{ mg dm}^{-3}$ ; b) argila  $>550 \text{ g dm}^{-3}$ ,  $P > 6 \text{ mg dm}^{-3}$ ; c) argila  $550-410 \text{ g dm}^{-3}$ ,  $P < 9 \text{ mg dm}^{-3}$ ; d) argila  $550-410 \text{ g dm}^{-3}$ ,  $P > 9 \text{ mg dm}^{-3}$ ; e) argila  $400-260 \text{ g dm}^{-3}$ ,  $P < 12 \text{ mg dm}^{-3}$ ; f) argila  $400-260 \text{ g dm}^{-3}$ ,  $P > 12 \text{ mg dm}^{-3}$ ; g) argila  $250-110 \text{ g dm}^{-3}$ ,  $P < 18 \text{ mg dm}^{-3}$ ; h) argila  $250-110 \text{ g dm}^{-3}$ ,  $P > 18 \text{ mg dm}^{-3}$ ; i) argila  $<110 \text{ g dm}^{-3}$ ,  $P < 24 \text{ mg dm}^{-3}$ ; j) argila  $<110 \text{ g dm}^{-3}$ ,  $P > 24 \text{ mg dm}^{-3}$ . \*\* significativo:  $P < 0,01$ , \* significativo:  $P < 0,05$ , <sup>NS</sup> não significativo:  $P > 0,05$ .

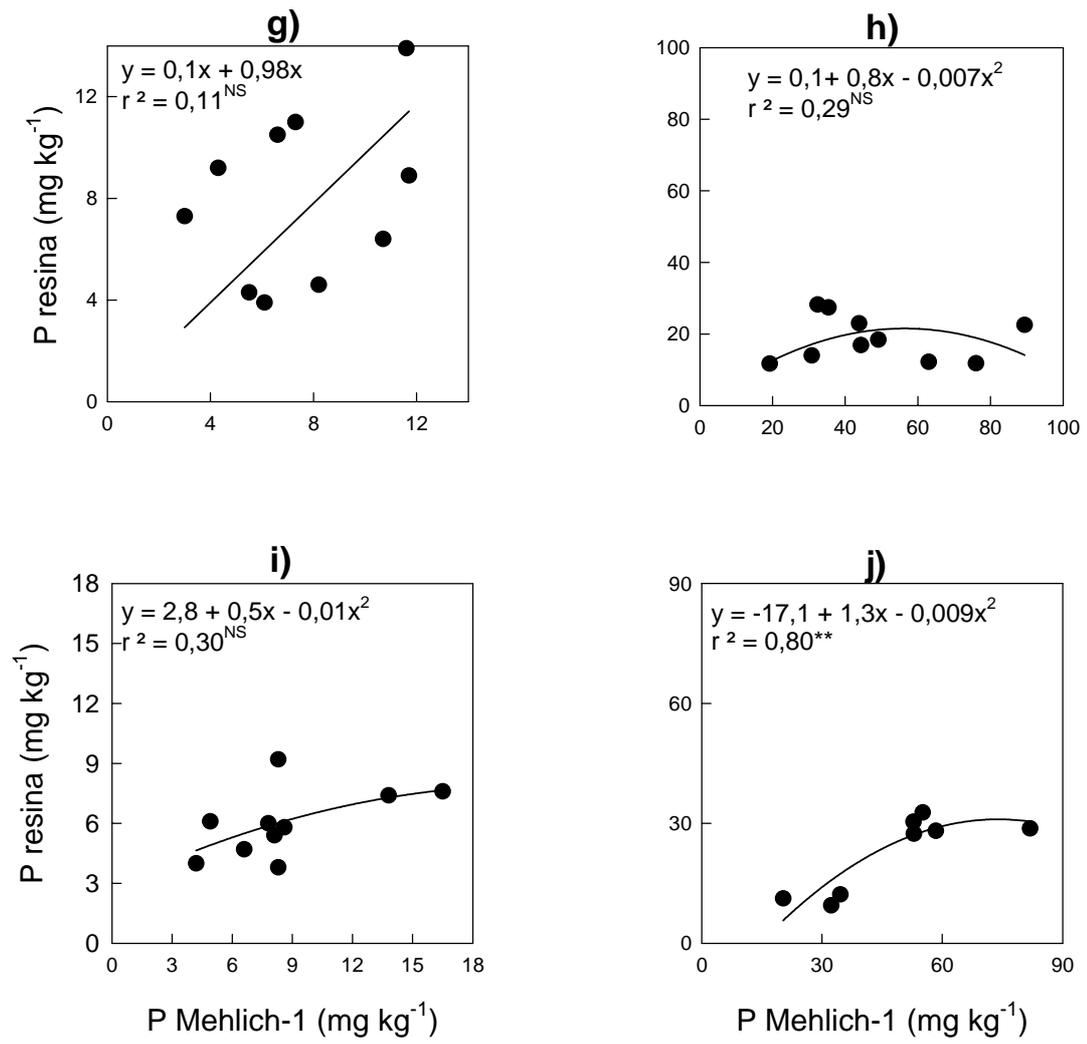


Figura 3. Continuação ...

Com exceção dos solos da classe 1 (Tabela 1), a relação do P resina:P Mehlich-1 foi maior, em média, para os solos com teores abaixo do teor crítico em todas as classes, se comparada à relação com solos acima do teor crítico. Quando o teor de fósforo é baixo, a resina mantém a capacidade de extração, devido ao processo de agitação que propicia a troca iônica em solução ao contrário do método Mehlich-1, onde poder de acidificação da solução extratora pode ser reduzido nos solos argilosos, diminuindo a dissolução do fósforo, resultando em readsorção e menor extração.

Solos com teores de fósforo muito baixo, como alguns pertencentes à classe textural 1, provavelmente não receberam adubação fosfatada, ou as doses aplicadas foram muito baixas, mantendo o fósforo muito pouco lábil. Assim, a magnitude dos valores extraídos pelos métodos, somada à imprecisão inerente aos próprios métodos, pode ter influenciado significativamente na relação P resina:P Mehlich-1, para cada solo e na média dos solos.

Os dados obtidos (Tabela 1 e Figuras 2, 3) não permitem estabelecer um índice comum para todas as classes texturais, pois nesse estudo os teores de fósforo também influenciaram a relação. Entretanto, se forem estabelecidos teores críticos para cada classe textural e para teores de fósforo abaixo e acima do teor crítico determinado pelo método da resina, a partir do teor crítico do método Mehlich-1 (Comissão..., 1995) com o índice médio da relação P resina:P Mehlich-1, da Tabela 1, obtêm-se teores críticos de fósforo determinado pela resina para cada classe textural (Tabela 2). Os valores dos índices são variáveis, mas na média, observa-se uma tendência de aumento à medida que diminui o teor de argila. O valor médio para todas as classes texturais é  $12,9 \text{ mg dm}^3$ , em termos práticos  $13 \text{ mg dm}^3$ , muito abaixo do teor crítico ( $20 \text{ mg dm}^3$ ) estabelecido pela Comissão ... (2003), para os solos do RS e SC, independentemente da classe textural, e muito abaixo do teor crítico ( $40 \text{ mg dm}^3$ ) utilizado nas recomendações para as culturas anuais no estado de SP (Raij et al., 1997).

Os valores dos teores críticos encontrados na Tabela 2, embora variáveis, sugerem que o teor crítico ( $20 \text{ mg dm}^3$ ) estabelecido pela Comissão ... (2003) para o método da resina pode estar superestimado e/ou os teores críticos para o método Mehlich-1 ( $6$  a  $24 \text{ mg dm}^3$ ), estabelecidos pela Comissão... (1995), subestimados. A diferença entre os teores críticos sugeridos para ambos os métodos é elevada para

Tabela 1. Médias dos teores de argila, fósforo determinado pelos métodos resina e Mehlich-1 e amplitude, média e coeficiente de variação da relação fósforo resina:fósforo Mehlich-1 em solos com diferentes classes de argila (média de quatro repetições em 10 solos)

Classe Textural <sup>(1)</sup>	Argila g dm <sup>3</sup> de solo	Fósforo		Relação P resina:P Mehlich-1 <sup>(2)</sup>		
		Resina ----- mg kg <sup>-1</sup> de solo -----	Mehlich-1	Amplitude	Média	CV <sup>(3)</sup> -- % --
1	606	3,9	3,3	0,5-1,9	1,1	41,9
1	605	17,0	10,8	1,2-1,8	1,6	13,6
2	509	9,3	5,4	1,1-2,9	1,7	29,0
2	499	19,1	13,1	1,2-1,8	1,4	13,5
3	357	10,1	9,2	0,8-2,3	1,2	37,8
3	348	17,1	19,5	0,6-1,3	0,9	23,7
4	205	8,0	7,5	0,6-2,4	1,2	54,8
4	186	18,2	50,3	0,2-0,9	0,5	52,0
5	66	6,8	9,9	0,5-1,3	0,8	33,4
5	57	32,9	66,3	0,3-0,6	0,5	22,3

<sup>1</sup> Classe 1: >550 g dm<sup>3</sup> de solo; Classe 2: argila 410-550 g dm<sup>3</sup> de solo; Classe 3: argila 260-400 g dm<sup>3</sup> de solo; Classe 4: argila 110-250 g dm<sup>3</sup> de solo e Classe 5: argila <110 g dm<sup>3</sup> de solo.

<sup>2</sup> Relação P resina:P Mehlich-1 de 10 solos em cada classe textural acima e abaixo do teor crítico conforme Comissão... (1995),

<sup>3</sup> CV é o coeficiente de variação.

Tabela 2. Teor crítico de fósforo Mehlich-1 conforme Comissão... (1995), relação média de fósforo resina:fósforo Mehlich-1, teor crítico de fósforo resina e sua média para solos de diferentes classes texturais.

Classe Textural <sup>(1)</sup>	Teor crítico de P Mehlich-1 <sup>(2)</sup> ----- mg kg <sup>-1</sup> -----	Relação média P resina:P Mehlich-1 <sup>(3)</sup>	Teor crítico de P resina <sup>(4)</sup> ----- mg kg <sup>-1</sup> -----	Média do teor crítico P resina
1	6,0	1,1	6,6	8,1
1	6,0	1,6	9,6	
2	9,0	1,7	15,3	14,0
2	9,0	1,4	12,6	
3	12,0	1,2	14,4	12,6
3	12,0	0,9	10,8	
4	18,0	1,2	21,6	14,4
4	18,0	0,5	7,2	
5	24,0	0,8	19,2	15,6
5	24,0	0,5	12,0	
<b>Média</b>				<b>12,9</b>

<sup>(1)</sup> Classe 1: argila >550 g dm<sup>3</sup> de solo; Classe 2: argila 410-550 g dm<sup>3</sup> de solo; Classe 3: argila 260-400 g dm<sup>3</sup> de solo; Classe 4: argila 110-250 g dm<sup>3</sup> de solo e Classe 5: argila <110 g dm<sup>3</sup> de solo.

<sup>(2)</sup> Comissão... (1995).

<sup>(3)</sup> Relação estabelecida na Tabela 2.

<sup>(4)</sup> Obtido pela multiplicação do teor crítico Mehlich-1 pela relação P resina:P Mehlich-1 média.

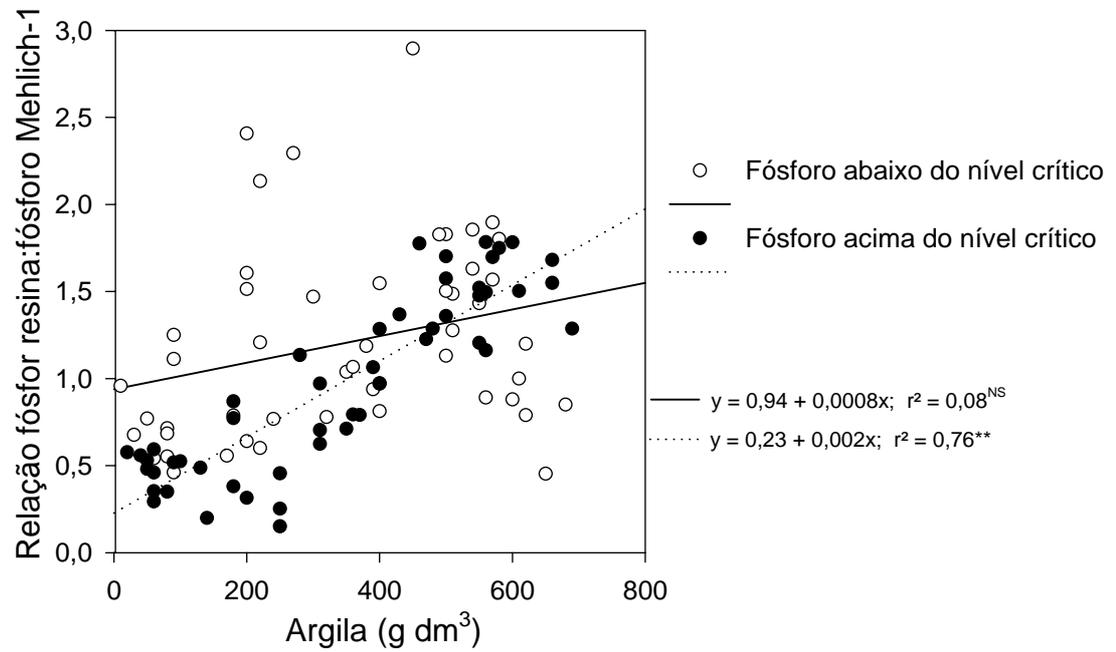


Figura 4. Regressão linear entre a relação fósforo resina:fósforo Mehlich-1 (abaixo e acima do teor crítico) e o teor de argila. \*\* significativo:  $P < 0,01$ , <sup>NS</sup> não significativo:  $P > 0,05$ .

uma diferença média de extração de fósforo entre os métodos de 1,1 vez maior no método da resina em relação ao Mehlich-1.

A relação média 1,1 para P resina:P Mehlich-1 é menor do que as relações encontradas por Miola (1995) e Kroth (1998) que variaram entre 1,5 e 3,5. O número de amostras de solo utilizadas neste estudo foi pequeno para este tipo de comparação. É necessário um estudo com no mínimo 500 ou mais amostras para uma definição clara da relação entre ambos.

Na Figura 4, observa-se um aumento linear significativo na relação P resina:P Mehlich-1, à medida que aumentou o teor de argila do solo, apenas para valores de fósforo acima do teor crítico. Abaixo do teor crítico, essa relação não é significativa, demonstrando não ser possível estabelecer um índice que permita analisar o solo pelo método da resina e recomendar doses de fertilizantes, com base nas tabelas de recomendações calibradas para o método Mehlich-1. Isto pode estar relacionado à magnitude dos valores extraídos pelos métodos em solos com teores muito baixos de fósforo, aos mecanismos de extração e à imprecisão inerente aos próprios métodos. É possível, também, que alguns solos tenham sido adubados com fosfatos naturais que reagem com a acidez do método Mehlich-1, extraíndo mais fósforo do que o método da resina, propiciando relações P resina:P Mehlich-1 menores do que 1.

### **3.4. CONCLUSÕES**

A extração de fósforo é afetada tanto pelo teor de argila como pela quantidade de fósforo “disponível” determinado por ambos os métodos.

Não foi possível estabelecer um índice de equivalência de fósforo para determinar o teor crítico pelo método da resina de troca iônica a partir do teor crítico do método Mehlich-1.

O teor crítico sugerido pela Comissão ... (2003) para o método da resina é maior do que os teores obtidos pela correlação P resina: P Mehlich-1.

## **ESTUDO-II**

### **4. FÓSFORO DISPONÍVEL DETERMINADO POR MEMBRANA DE RESINA ENTERRADA**

#### **4.1. INTRODUÇÃO**

A disponibilidade de fósforo (e outros nutrientes) para as plantas normalmente está associada a uma fração na solução e à outra presente na fase sólida do solo, também denominada de fração lábil, quantificada pelos métodos de determinação, cujos valores de fósforo se relacionam com as quantidades absorvidas pelas plantas. É estimada por modelos matemáticos e avaliada por testes estatísticos de validação.

A distinção ou compartimentalização das frações mais ou menos lábeis de fósforo é complexa, pois depende da ação específica direta dos princípios de determinação de cada método nas características ou da constituição de cada solo. Os resultados mostram que alguns métodos, especialmente aqueles constituídos por extratores ácidos e básicos, na maioria empíricos, podem representar uma disponibilidade estática dos nutrientes.

A partir dos estudos das relações de solo e plantas (Barber, 1962) foi possível compreender e quantificar os mecanismos de suprimento de nutrientes para as plantas e verificar que a maior parte do fósforo absorvido pelas mesmas é disponibilizado por uma função de fluxo ou taxa de suprimento deste até a superfície das raízes, portanto é um mecanismo dinâmico (Barber, 1995). Assim, fatores de solo que afetam essas taxas, como a umidade, teor de argila e poder tampão de fósforo, influenciam na disponibilidade deste nutriente para as plantas.

O teor de argila influi na umidade volumétrica do solo e também na tortuosidade, ou seja, no caminho difusivo que o nutriente deve percorrer até a superfície da raiz. Como a difusão do fósforo no solo somente ocorre quando este está na solução do solo, à medida que aumenta a umidade dos solos, aumenta a disponibilidade deste nutriente. Rein (1991) e Miola (1995) observaram que a disponibilidade de fósforo aumentou em até 20 vezes com a umidade do solo passando de 75% da capacidade de campo para a saturação.

O poder tampão corresponde à variação do teor de fósforo lábil em relação à alteração no seu teor solúvel. Embora um alto poder tampão seja desejável para a manutenção do fósforo disponível na solução do solo, a velocidade média da difusão é inversamente afetada por esse parâmetro. Kroth (1998) observou que em solos argilosos, com maiores teores de fósforo disponível, portanto com maior capacidade tampão de fósforo, o método da resina em forma de membranas extraiu mais fósforo à medida que o tempo de extração aumentou, indicando uma possível interação positiva entre o tempo de extração e o teor de fósforo do solo (capacidade tampão).

A absorção de fósforo pelas plantas só ocorre quando este está na forma iônica na solução do solo em contato com a raiz, que ocorre basicamente pela interceptação radicular, fluxo de massa ou por difusão (Barber, 1995). A contribuição da interceptação radicular e do fluxo de massa ao suprimento de fósforo para as plantas, mesmo em solos com alta disponibilidade é, em geral, menor do que 10% (Oliver & Barber, 1966; Vargas et al., 1983; Barber, 1995). O restante, mais de 90% do fósforo, é suprido por difusão.

As raízes das plantas absorvem o fósforo e o potássio da solução do solo e repõem íons  $H^+$ ,  $OH^-$  e/ou  $HCO_3^-$ . Devido à absorção, a concentração desses elementos (e possivelmente outros) junto à superfície radicular diminui a valores inferiores a  $3 \mu\text{mol L}^{-1}$  (Marschner, 1995). Há a formação de um gradiente de concentração na solução do solo entre a superfície radicular e o solo, propiciando a difusão de fósforo e de potássio em processo dinâmico. Para manter o equilíbrio químico, parte do fósforo e do potássio adsorvido no solo (formas denominadas lábeis) passa para a solução do solo. A intensidade desse processo depende da quantidade do elemento existente no solo e de fatores que atuam sobre o processo difusivo.

A extração de fósforo pelo método da resina na forma de membrana assemelha-se ao processo descrito da difusão, embora no caso do método da resina, o mecanismo é o de troca iônica. A planta, ao absorver fósforo da solução, faz com que a concentração do mesmo diminua. Da mesma forma a resina em contato com a mistura solo/água retira o fósforo da solução. Como este fósforo não está mais em equilíbrio com a solução, mais fósforo deve sair da fase sólida para manter o equilíbrio.

A extração de fósforo pela resina na forma de membrana colocada no solo onde permanece estática, sem a mistura ou a agitação de 16 horas sugeridas na metodologia tradicional (Tedesco et al., 1995; Embrapa, 1997; Raij et al., 2001), é semelhante à extração de fósforo da solução pelas plantas. Todo o fósforo que chega à superfície da resina é retirado da solução pelo mecanismo de troca estabelecendo-se um gradiente entre a superfície da resina e a solução do solo (Skogley et al., 1990; Yang et al., 1991). No entanto a semelhança resume-se somente a este aspecto.

A resina na forma de membrana enterrada diretamente no solo, como proposto por Schoenau & Guerr (1996), tem condições de extrair, ao longo do tempo, todo ou parte do fósforo lábil ou disponível para as plantas, sem a necessidade de mistura ou homogeneização do solo, e sem afetar significativamente as principais propriedades do solo, pois os reagentes utilizados no método apenas tamponam o meio de extração entre pH 6,0 e 7,0 (semelhante às condições de pH para a absorção de nutrientes pelas plantas), diferentemente dos demais extratores que modificam o pH e provocam a dissolução e/ou a complexação de compostos.

Se o fósforo (ou outros nutrientes) extraído pela membrana de resina enterrada apresentar associação com o fósforo absorvido pelas plantas, então essa técnica poderia ser calibrada e utilizada para quantificar a disponibilidade desse nutriente para as plantas, com vantagens adicionais, como a de dispensar a amostragem do solo, a secagem, a moagem e os procedimentos de extração, diminuindo o tempo total utilizado na quantificação da disponibilidade de nutrientes.

A técnica da resina em membrana enterrada diretamente no solo (Schoenau & Guerr, 1996) pode ser utilizada para entender e quantificar alguns princípios de extração de íons (difusão e troca de íons), em condições naturais

(sem mistura de solo ou agitação). Pela simplicidade de execução, a mesma poderia ser utilizada também em solos inundados cultivados com arroz, para os quais o programa de recomendações de adubação e calagem do RS e SC (Comissão..., 1995) não prevê a análise do solo inundado, sob condições de redução. Embora o método Mehlich-1 possa ser utilizado para análise de solo inundado, a sua aplicação não é prática em rotina. O objetivo deste estudo foi avaliar, em casa-de-vegetação, a capacidade da resina na forma de membrana enterrada no solo em avaliar a disponibilidade de fósforo às plantas.

## **4.2. MATERIAL E MÉTODOS**

Dois experimentos foram conduzidos neste estudo: um em solos com umidade próxima à capacidade de campo, cultivados em duas épocas com milho; outro em solos mantidos sob inundação sem cultivo e cultivados com arroz. Em ambos os experimentos, lâminas de resina iônica na forma de membrana foram enterradas para avaliar a relação entre o fósforo extraído pela resina e o fósforo absorvido pelas plantas cultivadas nos mesmos solos. Os experimentos foram conduzidos em casa-de-vegetação junto às dependências do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia – UFRGS com solos que já se encontravam em vasos.

### **4.2.1. Características das resinas**

A resina aniônica na forma de membrana utilizada neste estudo foi a do tipo AR103QDP434 da Ionics Inc. USA. As membranas de 1 mm de espessura e 150 cm<sup>2</sup> (10 x 15 cm) de área por face, foram cortadas em pedaços de 1,5 cm de largura e 5 cm de comprimento (7,5 cm<sup>2</sup> de cada lado = 15 cm<sup>2</sup> de superfície).

### **4.2.2. Características dos solos**

Neste estudo foram utilizados cinco solos com dois níveis de fósforo por solo, variando entre 4,4 e 40,7 mg kg<sup>-1</sup> (Mehlich-1). Os solos foram selecionados de um experimento com 20 solos e quatro níveis de fertilidade cada um, instalado em 1994 por Miola (1995). Os solos foram mantidos nos vasos (capacidade de 40 litros) na casa-de-vegetação, até a instalação dos

experimentos. Os solos utilizados neste estudo são provenientes de diferentes locais do RS e apresentam diferentes características químicas, físicas, mineralógicas e de fertilidade (Tabela 3).

#### 4.2.3. Procedimentos

Na instalação dos experimentos, os solos foram revolvidos na camada 0-15 cm de profundidade para homogeneização, controle de invasoras, amostragem de solo para análise e para facilitar a semeadura de milho e arroz. As membranas de resina aniônica, previamente saturadas com  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  (conforme metodologia descrita no Apêndice 2), foram enterradas de modo vertical na profundidade de 0-5 cm nos dois experimentos. Para o experimento em solos com umidade próxima à capacidade de campo, com semeadura de milho em março de 2001 (primeiro cultivo) e em setembro de 2001 (segundo cultivo), o método da resina foi denominado de resina-cc. Para o experimento em solos saturados com água, sem cultivo e com semeadura de arroz no mês de janeiro de 2002, o método da resina foi denominado de resina-sat.

No experimento cultivado com milho, as lâminas de resina foram numeradas e enterradas em fileira, ao lado de sementes de milho, também numeradas (Figura 5), no mesmo dia da semeadura. A seguir o solo foi coberto com isopor (na forma de esferas) para evitar o excesso de aquecimento do solo e a perda de água por evaporação. A superfície dos vasos foi coberta com filme plástico (perfurado para permitir a saída das plântulas de milho e para as trocas gasosas) para evitar a perda do isopor pela ação do vento. Os solos foram irrigados diariamente para a manutenção da umidade próxima à capacidade de campo. A uréia ( $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de N) e o cloreto de potássio ( $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ , apenas no Argissolo Vermelho distrófico) foram aplicados na superfície do solo aos 10 dias após a semeadura.

No experimento com os solos na umidade próxima à capacidade de campo, para todos os vasos, as membranas de resina de números 2, 4, 1, 5 e 3 (Figura 5) foram retiradas aos 2, 5, 10, 20 e 40 dias após a semeadura do milho, respectivamente. No sétimo dia foi feito o desbaste deixando-se apenas quatro plantas enfileiradas em cada vaso. A parte aérea das plantas de milho

Tabela 3. Atributos de alguns solos do RS.

Solo <sup>(1)</sup> -Unidade	Argila <sup>(2)</sup>	MO <sup>(2)</sup>	pH <sup>(2)</sup>	pH SMP <sup>(2)</sup>	P <sup>(2)</sup>	K <sup>(2)</sup>	Ca <sup>(2)</sup>	Mg <sup>(2)</sup>
	----- g dm <sup>3</sup> -----				----- mg kg <sup>-1</sup> -----		----- cmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> -----	
PVd - B. Retiro (B)	100	45	5,3	5,8	4,4	35	0,6	0,5
PVd - B. Retiro (A)	100	45	5,2	5,6	26,6	30	0,6	0,5
LVd - Cruz Alta (B)	260	93	5,5	5,9	4,5	147	0,6	0,4
LVd - Cruz Alta (A)	260	93	5,8	6,2	27,0	183	0,6	0,4
LVd - P. Fundo (B)	400	167	5,7	5,8	4,6	410	1,5	1,4
LVd - P. Fundo (A)	400	167	5,3	5,7	40,7	237	1,5	1,4
LBa - Vacaria (B)	620	324	5,6	5,8	4,5	438	2,3	1,9
LBa - Vacaria (A)	620	324	5,2	5,7	11,9	369	2,3	1,9
LVaf - Erechim (B)	770	246	5,1	5,6	5,3	455	2,7	1,3
LVaf - Erechim (A)	770	246	5,6	5,8	24,7	339	2,7	1,3

<sup>1</sup> PVd: Argissolo Vermelho distrófico, LVd: Latossolo Vermelho distrófico, LBa: Latossolo Bruno aluminico, LVaf: Latossolo Vermelho aluminoférrico. <sup>2</sup> Metodologias descritas em Tedesco et al. (1995); (A) = solos com teor alto de P; (B) = solos com teor baixo de P.

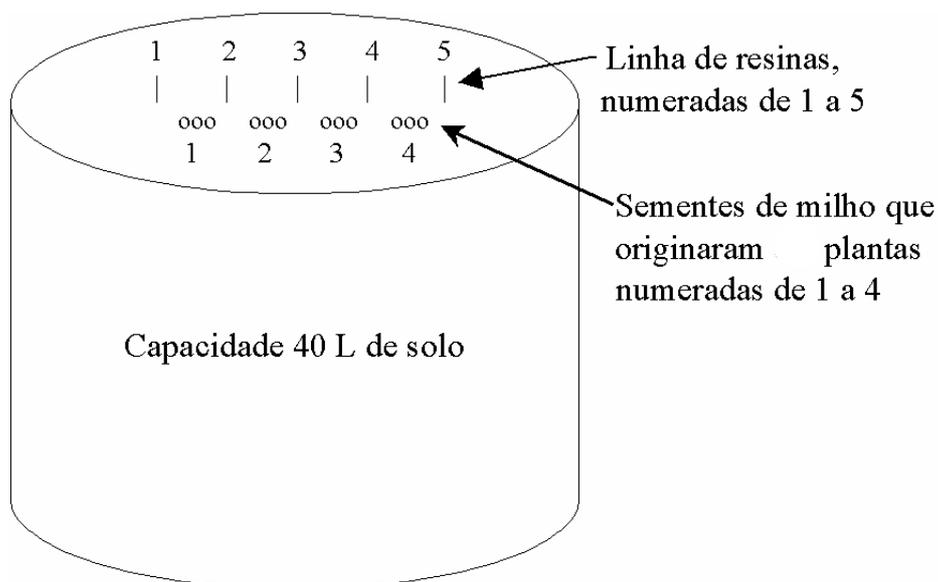


Figura 5. Disposição das membranas de resina enterradas e das sementes de milho em vasos com capacidade de 40 litros e raio de aproximadamente 150 mm.

de números 1, 4 e 2+3 (Figura 5) foram retiradas para análise de tecido aos 10, 20 e 40 dias após a instalação dos experimentos, respectivamente.

No experimento com solos saturados foram utilizados vasos de aproximadamente 1000 mL e raio de 50 mm para os solos sem cultivo e de aproximadamente 7000 mL e raio de 200 mm para os solos cultivados com arroz. As membranas de resina foram enterradas aleatoriamente no solo sem cultivo e no mesmo dia da semeadura do arroz. A adubação com uréia e cloreto de potássio para a cultura do arroz foi feita da mesma forma e dose que para a cultura do milho.

Os solos permaneceram saturados com a lâmina de água a uma altura aproximada de 2 cm acima da superfície do solo. Uma membrana de resina de cada vaso foi retirada aos 2, 5, 10 e 20 dias. No caso dos solos sem cultivo retirou-se também uma membrana aos 40 dias da instalação do experimento. A parte aérea de metade das plântulas de arroz em cada vaso foi retirada para análise de tecido aos 20 dias do plantio e a outra metade aos 40 dias.

#### **4.2.4. Análises e determinações**

Os atributos de solo como pH, índice SMP, teores de argila, matéria orgânica, cálcio, magnésio, potássio e fósforo (Mehlich-1) e o fósforo absorvido pelas plantas de milho e de arroz foram determinados de acordo com Tedesco et al. (1995).

O fósforo extraído em amostras de solo pela resina na forma de membrana, com agitação (P-resina), foi determinado conforme os procedimentos descritos por Tedesco et al. (1995), com algumas modificações descritas no Apêndice 1.

O fósforo extraído do solo pelas membranas de resina enterradas foi determinado conforme metodologia descrita no Apêndice 2.

A determinação do fósforo do solo pelo método Mehlich-3 foi feita conforme o procedimento descrito por Mehlich (1984), com duas modificações descritas nos Apêndices 3 e 4.

Todos as análises de laboratório foram feitas em duplicata, sendo apresentados os valores médios dos resultados.

### 4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da relação entre o fósforo absorvido pelas plantas e a quantidade de fósforo do solo determinada pelos diferentes métodos estão apresentados nas Figuras 6, 7 e 8. A distribuição dos pontos destas relações, especialmente nos solos com teores mais altos de fósforo, mostra a especificidade de cada método em extrair o fósforo que se encontra mais ou menos lábil, dependendo das características específicas de cada solo.

O solo LVd-Passo Fundo propiciou a maior disponibilidade de fósforo para o milho, especialmente no primeiro cultivo, entretanto foi menor para a cultura do arroz, quando comparado aos demais solos com teores altos de fósforo pelo método Mehlich-1 (Figuras 6, 7, 8; Tabela 4). No segundo cultivo de milho, a maior disponibilidade de fósforo ocorreu no solo LVaf-Erechim. Para o arroz a maior disponibilidade ocorreu nos solos PVd-Cruz Alta e LVaf-Erechim.

Assim como os métodos apresentam diferenças na capacidade de extração do fósforo do solo com diferentes características químicas, físicas e mineralógicas, estas também influenciam na absorção pela plantas. Tanto estas quanto os métodos são influenciados por outros fatores, resultando em muitos casos, em baixos coeficientes de determinação, como observado em revisões bibliográficas (Raij, 1978; Anghinoni & Volkweiss, 1984; Fixen & Grove, 1990).

Longos períodos de saturação do solo com água propiciam a redução de alguns compostos inorgânicos. Entre eles o ferro, que ao passar de  $Fe^{3+}$  para  $Fe^{2+}$ , libera para a solução do solo parte do fósforo ligado ao mesmo. Além disso, o pH dos solos ácidos se eleva por conseqüência da redução desses compostos, favorecendo a solubilidade do fósforo ligado a óxidos de ferro e alumínio (Patrick & Mahapatra, 1968; Ponnampetrom, 1972). A saturação do solo com água aumenta a difusão do fósforo e conseqüentemente a nutrição das plantas ou a extração pelos métodos que dependem do mecanismo de difusão (Barber, 1995; Rein, 1991; Miola, 1995).

O solo LVd-Passo Fundo apresentou o maior teor de ferro “disponível” (Apêndice 5) e a maior extração de fósforo pelo método da resina na forma de

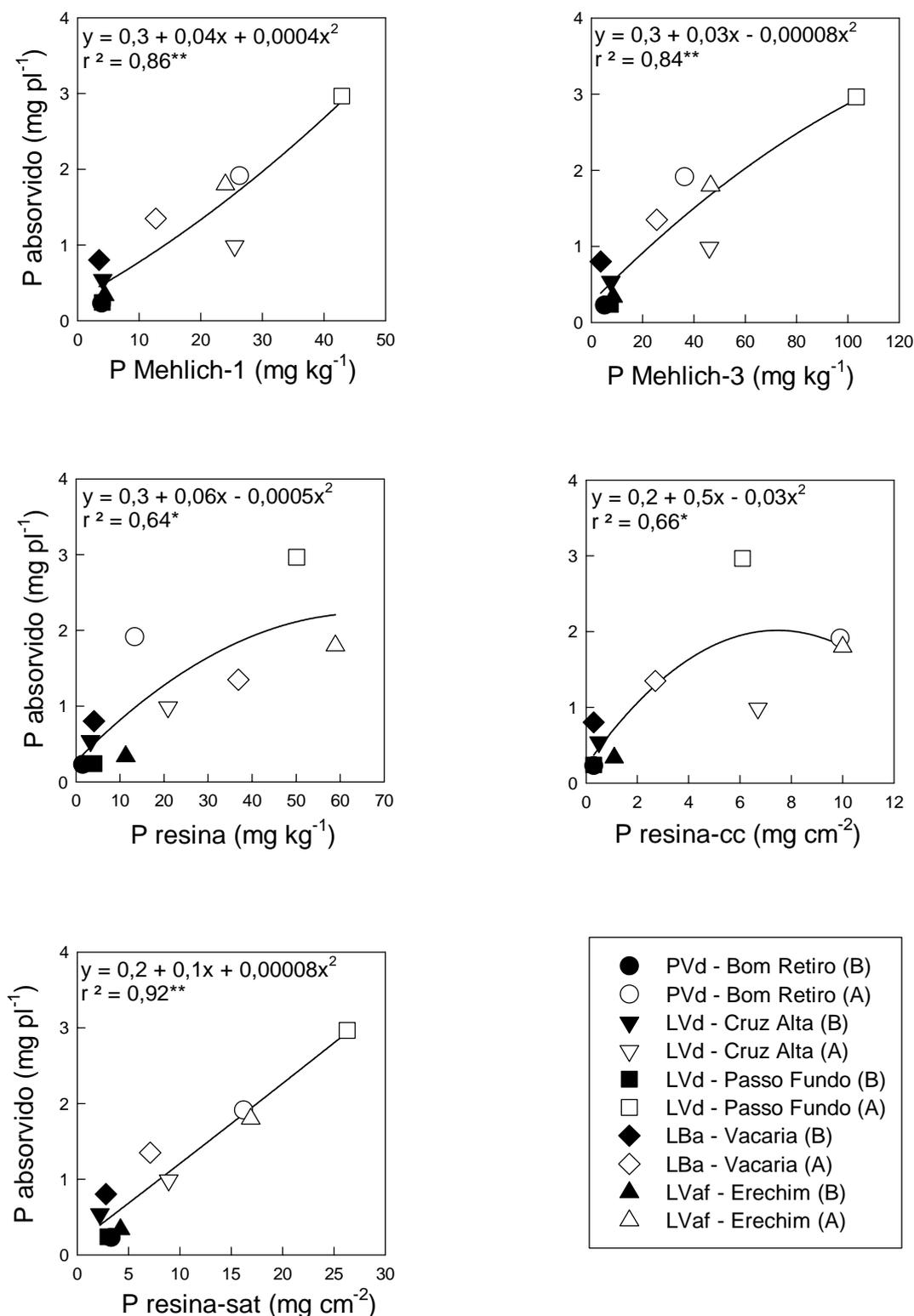


Figura 6. Relação entre o fósforo absorvido por plantas de milho no primeiro cultivo (média das avaliações aos 10, 20 e 40 dias após a semeadura) e o fósforo no solo determinado por diferentes metodologias (Mehlich-1, Mehlich-3 e resina, resina-cc e resina-sat; média das avaliações aos 2, 5, 10, 20 e 40 dias após terem sido enterradas) em solos do RS, com diferentes características químicas, físicas, mineralógicas e de fertilidade. (A) = solos com teor alto de P; (B) = solos com teor baixo de P.

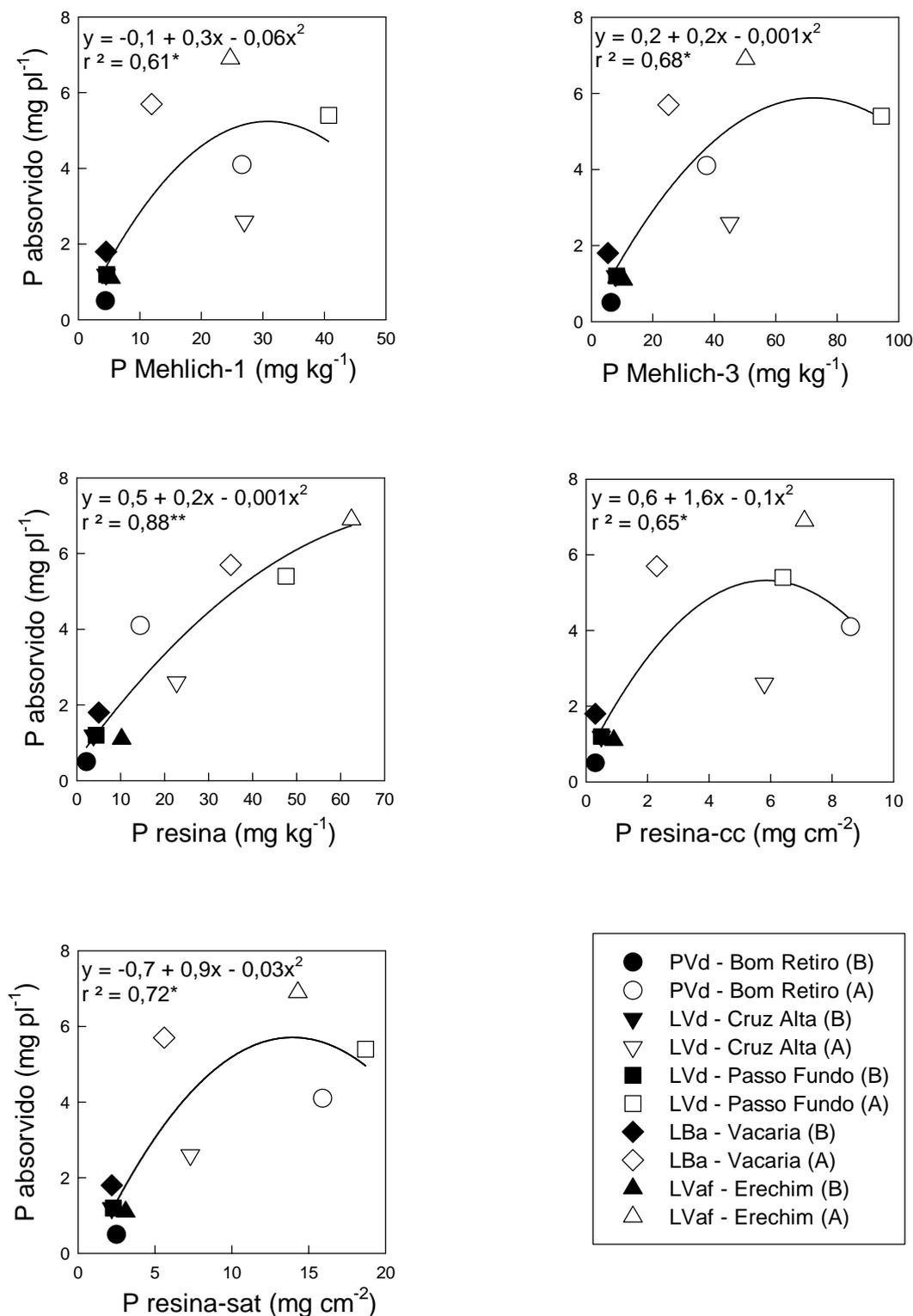


Figura 7. Relação entre o fósforo absorvido por plantas de milho no segundo cultivo (média das avaliações aos 10, 20 e 40 dias após a semeadura) e o fósforo no solo determinado por diferentes metodologias (Mehlich-1, Mehlich-3 e resina, resina-cc e resina-sat; média das avaliações aos 2, 5, 10, 20 e 40 dias após serem enterradas) em solos do RS, com diferentes características químicas, físicas, mineralógicas e de fertilidade. (A) = solos com teor alto de P; (B) = solos com teor baixo de P.

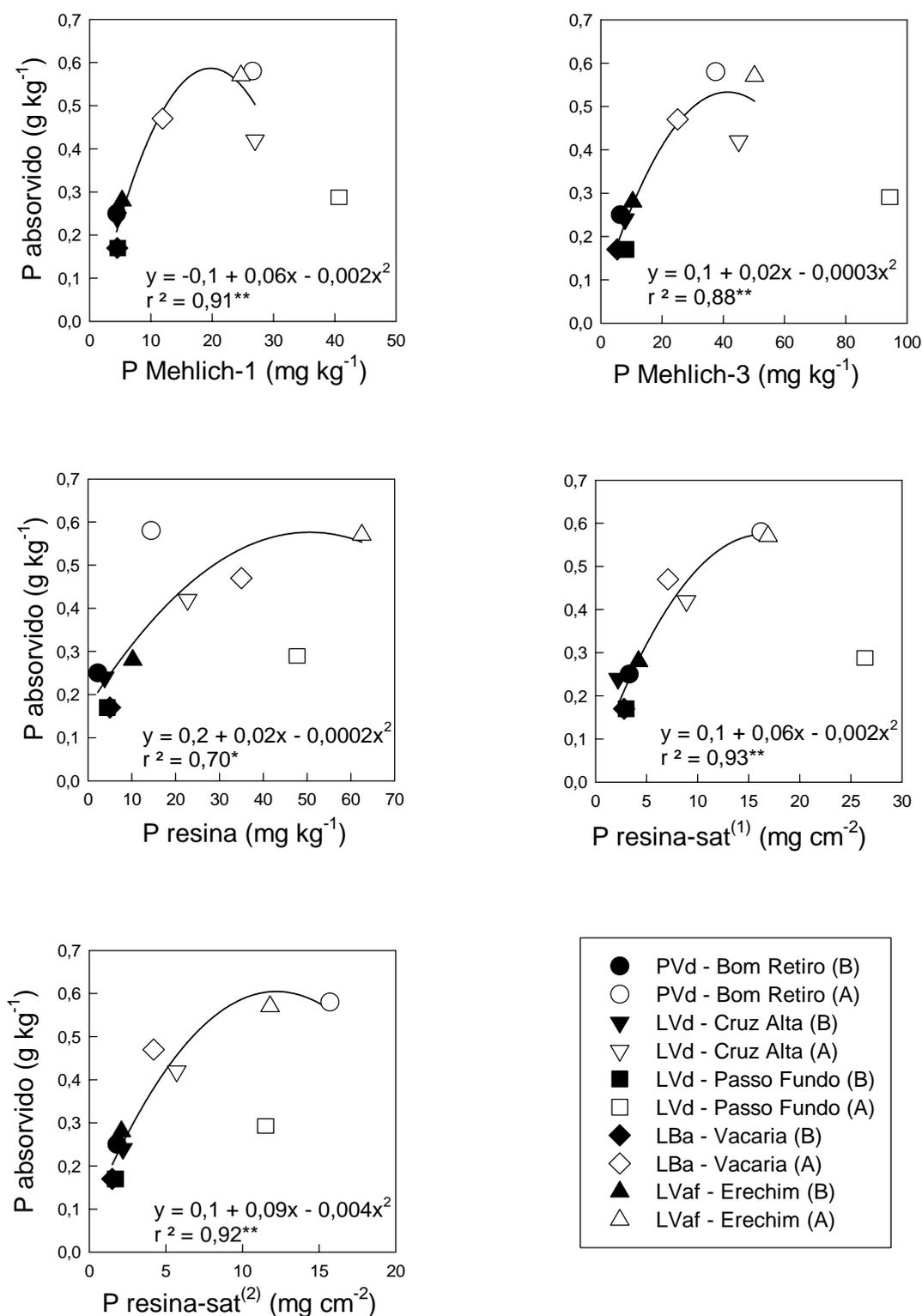


Figura 8. Relação entre o fósforo absorvido pelas plantas de arroz (média das avaliações aos 20 e 40 dias após o plantio) e o fósforo no solo determinado por diferentes metodologias (Mehlich-1, Mehlich-3 e resina, resina-sat<sup>(1)</sup>: média das avaliações aos 2, 5, 10, 20 e 40 e resina-sat<sup>(2)</sup> média das avaliações aos 2, 5, 10 e 20 dias após serem enterradas) em solos do RS, com diferentes características químicas, físicas, mineralógicas e de fertilidade. (A) = solos com teor alto de P; (B) = solos com teor baixo de P.

membrana enterrada no solo saturado (Tabela 4). Nas condições de redução em solo saturado por água, o ferro pode ser tóxico para o arroz, tanto na forma direta ao ser absorvido pela planta por inibir alguns processos fisiológicos, como na forma indireta ao se acumular na forma oxidada na superfície das raízes, diminuindo a absorção radicular de outros nutrientes, especialmente do fósforo (IRGA, 2001). Observou-se neste trabalho uma alta extração de fósforo do solo pelo método da resina-sat e uma baixa absorção de fósforo pelas plantas de arroz no LVd-Passo Fundo em relação a outros solos (Figura 8), evidenciando a possibilidade de toxidez de ferro para o arroz neste solo. Por isso, os resultados obtidos para este solo foram desconsiderados no cálculo das equações de regressão (Figura 8).

No solo LVaf-Erechim (argila de  $770 \text{ g dm}^{-3}$  de solo) e no solo PVd-Bom Retiro (argila de  $100 \text{ g dm}^{-3}$  de solo) a extração de fósforo foi semelhante para todos os métodos, à exceção do método da resina na forma de membrana (metodologia descrita em Tedesco et al., 1995), que extraiu menos fósforo no solo PVd em relação ao LVaf, em todos os experimentos. O principal mecanismo da extração de fósforo do solo pelo método da resina na forma de membrana com agitação de 16 horas é o da troca iônica, gerando um desequilíbrio que favorece a retirada de fósforo do solo para manter o equilíbrio com o fósforo da solução. Este processo é lento e contínuo e, neste caso, as 16 horas de agitação provavelmente não foram suficientes para que a extração fosse maior no solo arenoso, se comparada à média dos métodos da resina na forma de membranas enterradas no solo (resina-cc e resina-sat) e retiradas após maior tempo de extração. Para a resina que permanece estática no solo, como as membranas enterradas, o principal mecanismo de suprimento de fósforo é o da difusão (Skogley et al., 1990; Yang et al., 1991). Kroth (1998) observou que com o método da resina em membranas, a extração de fósforo aumentou em aproximadamente 120 e 45% com o aumento do período de extração de 8 para 24 horas de agitação em solo argiloso e arenoso, respectivamente; os teores de fósforo nesses solos eram  $23,0$  e  $24,9 \text{ mg kg}^{-1}$  com 8 horas de agitação e passaram para  $50,4$  e  $35,8 \text{ mg kg}^{-1}$  com 24 horas de agitação.

Os coeficientes de determinação (Tabela 5) que expressam a relação entre o fósforo extraído pelos métodos químicos e o fósforo absorvido

Tabela 4. Fósforo determinado por diferentes métodos de extração em alguns solos do RS.

Solo-Unidade <sup>(1)</sup>	Métodos				
	Mehlich-1 <sup>(2)</sup>	Mehlich-3 <sup>(2)</sup>	Resina <sup>(2)</sup>	Resina-cc <sup>(3)</sup>	Resina-sat <sup>(4)</sup>
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----		-----	----- mg cm <sup>-2</sup> -----	
PVd - B. Retiro (B)	4,4	6,4	2,2	0,3	2,5
PVd - B. Retiro (A)	26,6	37,5	14,4	8,6	15,9
LVd - Cruz Alta (B)	4,5	7,9	3,8	0,5	2,2
LVd - Cruz Alta (A)	27,0	45,0	22,7	5,8	7,3
LVd - P. Fundo (B)	4,6	8,2	4,4	0,5	2,3
LVd - P. Fundo (A)	40,7	94,3	47,6	6,4	18,7
LBa - Vacaria (B)	4,5	5,4	5,0	0,3	2,2
LBa - Vacaria (A)	11,9	25,1	35,0	2,3	5,6
LVaf - Erechim (B)	5,3	10,4	10,2	0,9	3,1
LVaf - Erechim (A)	24,7	50,2	62,5	7,1	14,3
Média	15,4	29,0	20,7	3,3	7,4

<sup>1</sup> PVd – Argissolo Vermelho distrófico, LVd – Latossolo Vermelho distrófico, LBa – Latossolo Bruno aluminífero, LVaf – Latossolo Vermelho aluminífero; <sup>2</sup> Média de quatro avaliações entre os cultivos de milho e arroz; <sup>3</sup> Resina-cc: resina enterrada no solo com umidade na capacidade de campo, média de quatro épocas (2, 5, 10, 20 e 40 dias) e dois cultivos de milho; <sup>4</sup> Resina-sat: resina em solo saturado com água, média de quatro épocas no solo sem cultivo (2, 5, 10, 20 e 40 dias) e três épocas no solo cultivado com arroz (2, 5, 10 e 20 dias). (B) = solos com teor baixo de P; (A) = solos com teor alto de P.

Tabela 5. Coeficiente de determinação ( $r^2$ ) entre o fósforo absorvido pelas plantas cultivadas em alguns solos do RS e a quantidade extraída por diferentes métodos de extração.

Método	Milho <sup>(1)</sup>	Milho <sup>(2)</sup>	Arroz <sup>(3)</sup>	Média
	----- $r^2$ -----			
Mehlich-1	0,86**	0,61*	0,91**	0,79
Mehlich-3	0,84**	0,68*	0,88**	0,80
Resina	0,64*	0,88**	0,70*	0,74
Resina-cc <sup>4</sup>	0,66*	0,65*	-	0,66
Resina-sat <sup>5</sup>	0,92**	0,72*	0,93**	0,86
Resina-sat <sup>6</sup>	-	-	0,92**	0,92

<sup>1</sup> Milho cultivado em 03/2001; <sup>2</sup> Milho cultivado em 09/2001; <sup>3</sup> Arroz cultivado em 01/2002; <sup>4</sup> Resina-cc: resina enterrada em solo com umidade próxima à capacidade de campo; <sup>5</sup> Resina-sat: resina enterrada em solo sem cultivo, saturado com água; <sup>6</sup> Resina-sat: resina enterrada em solo saturado com água, cultivado com arroz (01/2002). \* Significativo (P<0,05); \*\* Significativo (P<0,01).

pelas plantas, mostram que todos os métodos apresentaram alto grau de associação e podem ser utilizados para quantificar a disponibilidade de fósforo para as plantas. No entanto, em alguns casos, o grau de associação na relação não está muito definido, provavelmente, devido ao pequeno número de solos utilizados neste estudo e às grandes variações físicas, químicas, mineralógicas e de fertilidade dos mesmos. Verificou-se, porém, que em geral o método da resina-sat foi superior aos demais e pode ser uma técnica adequada para estimar a disponibilidade de fósforo para a cultura do arroz irrigado.

A avaliação da disponibilidade de fósforo em solo sem irrigação (em condições de campo) pelo método da resina na forma de membrana enterrada (resina-cc) pode não ser viável, pois o suprimento de fósforo para as plantas ou a extração pela resina depende da umidade do solo (Rein, 1991; Miola, 1995; Barber, 1995). Neste trabalho o solo foi irrigado diariamente, o que não ocorre em condições normais em lavouras. O coeficiente de determinação apesar de significativo foi baixo e, provavelmente, seria mais baixo se o solo fosse irrigado naturalmente pela chuva, pois dependendo da época e do ano, pode demorar mais de 10 dias, inviabilizando a extração de fósforo em uma camada superficial do solo. Em condições de déficit hídrico, a absorção de fósforo pelas plantas pode ocorrer em camadas mais profundas do perfil do solo, que geralmente apresentam maior disponibilidade de água, com tendência de maior desenvolvimento radicular em períodos secos (Klepker, 1996; Singh et al., 1996), diferentemente das membranas da resina que permanecem estáticas no solo e extrai menos fósforo devido à menor umidade do solo.

Os métodos de análise de solo Mehlich-1, Mehlich-3 e resina na forma de membranas com agitação extraíram em média maiores quantidades de fósforo do que os métodos da resina-cc e resina-sat (Tabela 4). O método Mehlich-3 extraiu, em todos os solos, quantidades de fósforo maiores do que o método Mehlich-1 (utilizado em rotina pelos laboratórios da ROLAS). Comparado ao método Mehlich-1, o método da resina na forma de membrana extraiu quantidades menores de fósforo em solos arenosos e maiores em solos mais argilosos, como observado no estudo-I deste trabalho e nos trabalhos de Miola (1995) e Kroth (1998).

O método da resina na forma de membrana enterrada em solo saturado (resina-sat) extraiu em média 2,4 vezes mais fósforo do que em solo

com umidade próxima à capacidade de campo (resina-cc), no período de 2 a 40 dias após as membranas de resina serem enterradas (Tabela 4 e Figura 9). Esta maior extração de fósforo do solo com maior umidade deve-se à maior difusão do fósforo da fase sólida para a solução do solo e deste para a membrana de resina de troca aniônica (Rein, 1991; Miola, 1995), e aos possíveis efeitos da redução do solo sob saturação (Patrick & Mahapatra, 1968; Ponnampetrom, 1972). A extração de fósforo pelo método da resina-sat foi proporcionalmente maior nos solos com menores teores de fósforo em comparação ao método da resina-cc.

A extração de fósforo pelo método da resina-cc nos solos cultivados em setembro de 2001 com milho (segundo cultivo) foi menor do que quando cultivados em março de 2001 (primeiro cultivo) (Figura 9). Essa diminuição deve-se, em parte, à extração de fósforo pela resina enterrada e à absorção do milho no primeiro cultivo. É possível que outros fatores, como a variação de temperatura, tenham influenciado na extração de fósforo pela resina (Skogley et al., 1990; Kroth, 1998; Schlindwein et al., 2002). A extração de fósforo pelo método resina-sat cultivado com arroz foi menor do que em solo saturado com água sem cultivo (Figura 9). Isto pode ser devido à competição na extração de fósforo pelas raízes das plantas, resultando na menor extração pelas membranas de resina.

Nos solos mantidos com umidade próxima à capacidade de campo, a extração de fósforo pelo método da resina-cc aumentou até a última avaliação. Entretanto, nos solos mantidos saturados com água, a extração de fósforo pelo método da resina-sat foi maior até os 10 dias (Figura 9). A extração de fósforo se dá pela troca de íons na superfície da membrana de resina, a partir da difusão até a mesma. A difusão do fósforo até uma superfície de extração é linear pelo menos até 24 horas (Rein, 1991; Miola, 1995). Resultados publicados por Yang et al. (1991) mostram que a extração de fósforo por resinas encapsuladas e enterradas aumentou até seis dias após colocadas no solo, não havendo aumento significativo após este período.

Os coeficientes de determinação (Tabela 6) que expressam a relação entre o fósforo absorvido pelas plantas e o do solo, extraído pelas membranas de resina enterradas, apresentam um grau significativo de associação na maioria dos tratamentos, principalmente para o método da resina-sat,

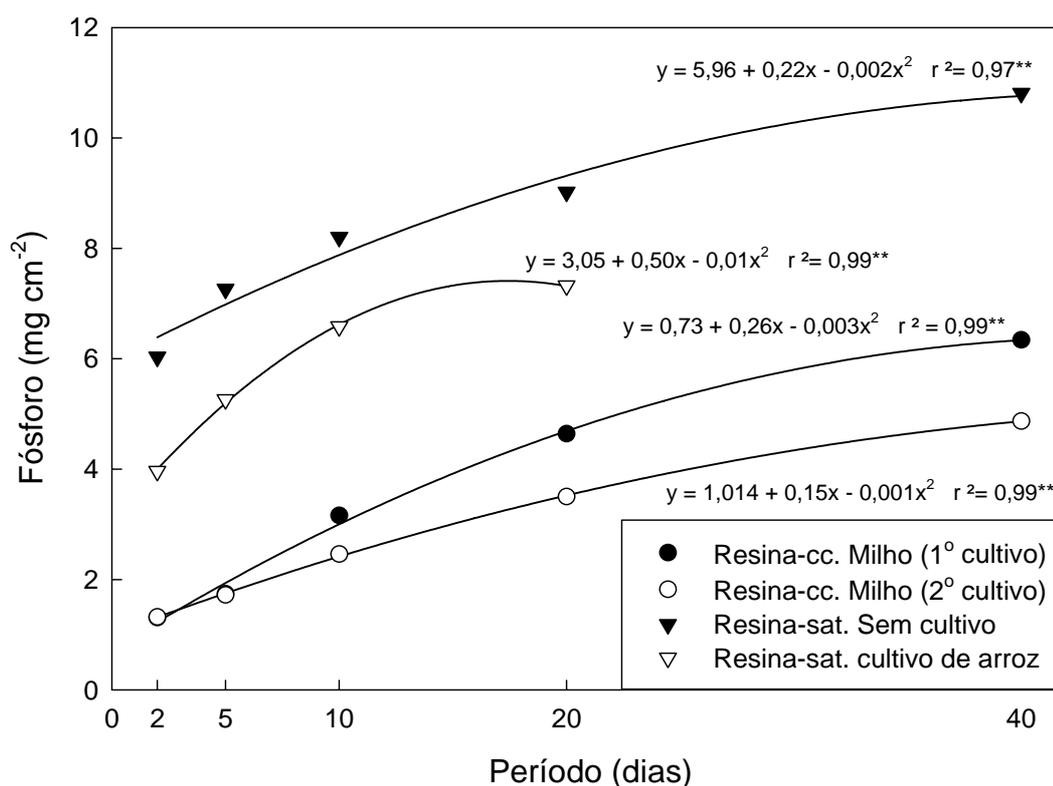


Figura 9. Relação entre o fósforo extraído pelas lâminas de resina enterradas e o período de permanência das mesmas no solo (média de 5 solos com dois níveis de fósforo), em solos do RS com diferentes características físicas, químicas, mineralógicas e de fertilidade. Resina-cc: resina em solo com umidade na capacidade de campo, resina-sat: resina em solo saturado com água. \*\* significativo ( $P < 0,01$ ).

Tabela 6. Coeficiente de determinação ( $r^2$ ) entre o fósforo absorvido por plantas de milho e arroz (média de 10, 20 e 40 dias para o milho e de 20 e 40 dias para o arroz) e a quantidade extraída de fósforo pelas lâminas de resina enterradas, e retiradas ao longo do tempo, em alguns solos do RS.

Método vs cultura	Tempo (dias)					Média
	2	5	10	20	40	
Resina-cc vs Milho 1º cultivo	0,68*	0,83**	0,75**	0,69*	0,64*	0,72
Resina-cc vs Milho 2º cultivo	0,26 <sup>NS</sup>	0,44 <sup>NS</sup>	0,60*	0,58 <sup>NS</sup>	0,70*	0,52
Resina-sat sem cultivo vs arroz	0,90**	0,90**	0,95**	0,87**	0,78**	0,88
Resina-sat vs Arroz	0,76**	0,93**	0,96**	0,87**	-	0,88
Média	0,65	0,78	0,82	0,76	0,71	0,75

Resina-cc: resina em solo com umidade na capacidade de campo, resina-sat: resina em solo saturado com água. \* significativo ( $P < 0,05$ ), \*\* significativo ( $P < 0,01$ ), <sup>NS</sup> não significativo ( $P > 0,05$ ).

sugerindo ser este método adequado para quantificar a disponibilidade de fósforo às plantas no tempo entre 2 e 40 dias após as membranas de resina serem enterradas. Entretanto, o coeficiente de determinação médio foi maior aos dez dias e está relacionado ao tempo em que a extração do fósforo mais se relaciona com o fósforo absorvido pelas plantas, nestas condições.

#### **4.4. CONCLUSÃO**

O método da resina na forma de membranas enterradas pode quantificar a disponibilidade de fósforo para as plantas, especialmente em solos inundados utilizados no sul do Brasil para o cultivo de arroz.

#### **4.5. CONSIDERAÇÕES**

Para a calibração do método da resina na forma de membrana enterrada em solo saturado, é necessário determinar o número mínimo de membranas de resina a serem enterradas por área homogênea e o tempo de permanência das membranas no solo. Neste estudo, a Figura 9 e Tabela 6 mostram que são necessários 10 dias de permanência no solo, pois a partir deste período a extração média é proporcionalmente menor. No trabalho de Yang et al. (1991) o período foi de seis dias.

## **ESTUDO-III**

### **5. CALIBRAÇÃO DOS MÉTODOS MEHLICH-1, MEHLICH-3 E RESINA DE TROCA IÔNICA PARA OS NUTRIENTES FÓSFORO E POTÁSSIO EM SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO DE CULTIVO**

#### **5.1. INTRODUÇÃO**

A principal finalidade da análise do solo é avaliar o estado de fertilidade do mesmo e determinar a quantidade de nutrientes para as plantas, servindo de base para uma recomendação racional e econômica de corretivos e fertilizantes. Contudo, a análise de solo é viável somente se apoiada a um programa de calibração dos valores obtidos pela metodologia analítica com o rendimento das culturas.

Calibrar um método de análise do solo consiste em determinar ou relacionar o teor de um elemento no solo (nutriente de plantas), utilizando-se para tal uma metodologia de avaliação (análise do solo) com parâmetros de plantas cultivadas a campo (índice de crescimento, teor de um nutriente e/ou rendimento de uma cultura) (Rouse, 1968; Cate & Nelson, 1973; Anghinoni & Volkweiss, 1984; Evans, 1987).

A utilização da análise de solo como ferramenta para avaliar a fertilidade do solo e recomendar doses de fertilizantes no RS teve início na década de 1950, com base em experiências de campo. Os primeiros estudos de calibração foram feitos a partir de 1968 (Mielniczuk et al., 1969b), e continuaram até meados da década de 1980, em parceria com diversas instituições de ensino, pesquisa e extensão nos Estados do RS e SC. A Rede Oficial de Laboratórios do RS/SC (ROLAS) e a Comissão de Fertilidade do

Solo elaboraram as recomendações de adubação, utilizadas de 1969 até os dias atuais. Atualmente são realizadas anualmente mais de 100 mil análises de solo nos laboratórios da ROLAS, somente no RS.

A calibração do método de análise de solo Mehlich-1 para fósforo e potássio foi feita para as culturas soja, trigo e milho sob sistema convencional de cultivo. As calibrações realizadas de 1969 a 1976 deram origem às recomendações de corretivos e fertilizantes recomendadas até 1986 (Mielniczuk et al., 1969 a, b; Universidade..., 1973; Tabelas..., 1976; Manual..., 1981). Essas recomendações tinham por critério, ou filosofia, a adubação de correção, para adequar a fertilidade do solo à maioria das culturas econômicas, mais a adubação de manutenção para cada cultura, visando ao rendimento de máxima eficiência técnica. A partir de 1987, foi feita a reavaliação dos experimentos de calibração, com novos resultados experimentais, introduzindo-se mudanças significativas tanto nos teores críticos, em função das classes texturais, como no critério de adubação. O princípio que delineou a elaboração das novas recomendações de adubação foi o da máxima eficiência econômica das culturas e elevação progressiva (três cultivos) da fertilidade do solo até atingir o teor crítico (Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995).

Desde o início das calibrações em 1969, já se passaram mais de três décadas, e neste período mudanças ocorreram na agricultura. Destacam-se algumas: a) mais de 50% das principais culturas cultivadas no RS estão sob sistema plantio direto; b) a amostragem do solo sob sistema plantio direto é feita na camada de maior concentração de nutrientes (0-10 cm); c) o rendimento médio das principais culturas aumentou; d) o método de análise do solo em uso não estima adequadamente o fósforo do solo para as plantas quando há a adição de fosfatos naturais; e e) atualmente existem outros métodos eficientes, de baixo custo e práticos que também podem ser utilizados.

Uma das principais diferenças entre o sistema convencional de cultivo e o sistema plantio direto é que neste ocorre concentração superficial e sub-superficial de fósforo, potássio, matéria orgânica e outros nutrientes, decorrente das adubações e da reciclagem de nutrientes (Eltz et al., 1989; Schindwein & Anghinoni, 2000). Isto influencia na dinâmica de nutrição das plantas. Além disto, a retirada de amostras de solo da camada 0-10 cm de

profundidade, com maior concentração em fósforo e potássio, proporciona um valor maior no resultado da análise do solo desses nutrientes, sem que necessariamente ocorra um aumento de rendimento das culturas. Assim, o teor crítico de fósforo e potássio deve ser maior na camada 0-10 cm de profundidade em solos sob sistema plantio direto do que na 0-20 cm, tanto sob sistema plantio direto quanto sob sistema convencional de cultivo.

A produtividade das culturas aumentou desde o início dos estudos de calibração, tanto nos resultados de experimentos quanto nos de lavoura. Em lavoura, entre as décadas de 1960 até hoje, a produtividade média das culturas aumentou no RS em 50, 108 e 125% para a soja, trigo e milho, respectivamente (Emater/RS, 1998; Emater/RS, 2003; IBGE, 2003). Esses aumentos podem ser devido à utilização de variedades mais produtivas e/ou a técnicas mais avançadas de produção. Entretanto, a exigência de nutrientes também aumentou com a maior exportação de nutrientes. Com isso, além do maior teor crítico, também é necessária uma dose maior de fertilizantes do que a atualmente empregada.

Em contraste com o aumento de produtividade das culturas soja, trigo e milho, as doses médias de fósforo recomendadas para uma seqüência desses três cultivos, nas tabelas de recomendação de 1987, 1989 e 1995 (Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995), são menores do que a média da dose de correção (realizada a cada quatro ou cinco anos) proporcional para os mesmos cultivos, mais a dose de manutenção recomendada para cada cultura, pela Universidade... (1973). A recomendação de doses menores ocorre principalmente nas faixas de maior fertilidade nas tabelas de Siqueira et al. (1987) e Comissão... (1989, 1995). As recomendações de adubação, a partir de 1987, baseiam-se no critério de máxima eficiência econômica da cultura e na elevação progressiva da fertilidade do solo até o teor crítico, no período de três cultivos. Se por um lado, essas recomendações podem ter sido econômicas ao longo do tempo, por outro não atingiram o objetivo de elevar a fertilidade do solo até o teor crítico, pois os resultados dos estudos de avaliação da fertilidade do solo realizados nos anos de 1973, 1981, 1988 e 2000, indicam que 78,1, 76,4, 73,0 e 79,3% das análises de solo feitas no RS apresentaram teores de fósforo abaixo das faixas de fertilidade alta e suficiente (Anghinoni & Bohnen, 1975; Tedesco et al., 1984; Drescher et al., 1995;

Rheinheimer et al., 2001). Aparentemente, até a introdução das novas tabelas de recomendações em 1987, havia a tendência de diminuição do percentual de amostras cujos resultados estavam abaixo da faixa adequada para as culturas. O processo inverso ocorreu a partir dessa data.

As tabelas de recomendação de adubação de potássio a partir de 1987, em média, mantiveram mais ou menos as mesmas doses das tabelas da Universidade... (1973) ou aumentaram nas faixas de maior fertilidade nas recomendações de Siqueira et al. (1987) e da Comissão... (1989, 1995), especialmente na reposição de nutrientes para soja, trigo e milho com rendimentos acima das atuais médias estaduais. Essas doses mais altas de potássio não foram suficientes para elevar a fertilidade do solo até o teor crítico no período de três cultivos, porém os teores de potássio aumentaram. De acordo com os levantamentos de fertilidade de 1981 e de 1988 há uma tendência de diminuição de 49,3 para 45,9 no percentual de análises de solo com teores de potássio acima de  $80 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo (Tedesco et al., 1984 ; Drescher et al., 1995). Com doses de potássio maiores a partir de 1987, o percentual de amostras com teores de potássio acima de  $80 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo aumentou para 58,7 em 2000 (Rheinheimer et al. 2001). Deve-se considerar, no entanto, que nesse período houve alteração no processo de amostragem do solo passando de 0-17/20 cm para 0-10 cm de profundidade e houve redução de perdas de solo e nutrientes por erosão (Bertol et al., 1997; Seganfredo et al., 1997).

Nos últimos anos houve o aumento da utilização de fosfatos naturais na adubação, principalmente nos solos cultivados sob sistema plantio direto. O método Mehlich-1 é composto por uma solução diluída de ácido forte, cuja reação com o fosfato natural (reação básica) é intensa, superestimando a quantidade de fósforo disponível nessas lavouras (Raij, 1991; Kroth, 1998). Além disso, o método Mehlich-1 extrai menos fósforo de solos muito argilosos e pode subestimar a sua disponibilidade. Isto pode ocorrer devido à neutralização parcial da solução extratora e/ou pela readsorção do fósforo extraído (Kamprath & Watson, 1980), propiciando, às vezes, baixos coeficientes de determinação ( $r^2$ ) entre os teores no solo e parâmetros de planta (Anghinoni & Volkweiss, 1984).

Uma das vantagens de um método de avaliação de nutriente para as plantas é a amplitude dos resultados que ele fornece. Quanto maior, melhor, pois diminui o erro analítico e aumenta a acuracidade da estimativa de fertilizante. Os métodos Mehlich-3 e resina de troca iônica extraem mais fósforo do que o método Mehlich-1. Esses métodos têm apresentado, com frequência, coeficientes de determinação maiores do que o método Mehlich-1 (Raij et al., 1986; 1990; Miola, 1995; Braida et al., 1996; Kroth, 1998; Silva et al., 1997).

Com o passar dos anos e com o incremento da área de cultivo sob sistema plantio direto, principalmente na década de 1990, ficaram evidentes os benefícios do mesmo na produtividade dos cultivos e na conservação ambiental. Porém, a pesquisa deve responder a muitas questões ainda, entre elas, se as recomendações feitas a partir das calibrações realizadas no sistema convencional de cultivo são adequadas para o sistema plantio direto e se após mais de três décadas do início dos estudos de calibração, esses resultados ainda são adequados para a realidade atual.

Este trabalho teve por objetivo calibrar (relacionar) os valores dos nutrientes fósforo e potássio no solo, determinados pelos métodos Mehlich-1, Mehlich-3 e resina de troca iônica, com o rendimento das culturas da soja, do trigo e do milho, cultivadas sob sistema plantio direto, e a partir da estimativa do teor crítico de fósforo e potássio e do estabelecimento de faixas de fertilidade dos mesmos no solo, sugerir as doses adequadas dos fertilizantes fosfatado e potássico para o rendimento destas culturas.

## **5.2. MATERIAL E MÉTODOS**

Para atingir os objetivos propostos na calibração dos teores de fósforo e potássio do solo sob sistema plantio direto foram utilizados os métodos Mehlich-1, Mehlich-3 e resina de troca iônica para analisar as amostras de solo de experimentos com doses de fósforo e potássio, conduzidos por instituições de ensino, pesquisa e cooperativas do RS. Os valores obtidos com esses métodos foram correlacionados com os dados de rendimento das culturas cultivadas nesses mesmos experimentos.

### **5.2.1. Caracterização geral**

Os experimentos utilizados neste estudo foram conduzidos por diferentes instituições, em vários solos, com diferentes época de cultivo, tempo de condução, delineamento experimental, tratamentos e objetivos da própria instituição. Foram utilizados os experimentos onde foi possível obter as amostras de solo dos tratamentos com doses crescentes de fósforo e/ou potássio, bem como do tratamento testemunha sem o fertilizante testado e os respectivos dados de rendimento das culturas.

A calibração foi feita para os solos mais representativos do RS, a fim de implantar um programa de recomendações de fertilizantes para as culturas sob sistema plantio direto. Assim, instalaram-se alguns experimentos e aproveitaram-se os dados de outros que foram ou estavam sendo conduzidos, principalmente na região do Planalto Riograndense, onde predominam os latossolos cultivados com soja, trigo e milho (Tabelas 7 e 8).

Os atributos de fertilidade do solo antes da instalação dos experimentos ou após a colheita nas parcelas sem o fertilizante testado estão descritos nas Tabelas 9 e 10. Os valores de pH, de fósforo, de potássio, de cálcio, de magnésio e de alumínio variaram entre os experimentos e foram obtidos de amostras de solo coletadas na maioria dos casos da camada de 0-10 cm de profundidade. Os teores de fósforo e de potássio apresentados nessas tabelas são apenas para caracterização dos experimentos, pois os utilizados para a calibração são das amostras retiradas antes ou logo após cada safra das culturas cultivadas.

Os solos são predominantemente argilosos da classe 1, com argila maior do que  $550 \text{ g kg}^{-1}$  de solo. O pH do solo em alguns experimentos estava abaixo de 5,5, valor considerado baixo para a obtenção de altas produtividades a partir de adubação adequada. Na maioria dos casos os solos foram corrigidos com calcário antes da instalação dos experimentos.

### **5.2.2. Descrição dos experimentos**

Os experimentos instalados pelas diferentes instituições foram conduzidos com seus respectivos delineamentos experimentais e objetivos (não apresentados aqui), diferentes do apresentado neste trabalho. Porém,

Tabela 7. Instituições responsáveis, locais no RS e solos utilizados nos experimentos conduzidos com doses de  $P_2O_5$ .

Experimento	Instituição	Local	Solo
1	UFRGS	Eldorado do Sul	PVd
2	COTRISOJA-FUNDACEP	Tapera	LVd
3	COTRIJAL-FUNDACEP	Não-Me-Toque	LVd
4	COTREL-FUNDACEP	Erechim	LVaf
5	COPALMA-FUNDACEP	Palmeira das Missões	LVd
6	COTRIJUÍ-FUNDACEP	Ijuí	LVd
7	COTRIPAL-FUNDACEP	Condor	LVd
8	EMBRAPA Trigo	Marau	LVdf
9	EMBRAPA Trigo	Passo Fundo	LVd
10	COTRISA-FUNDACEP	Santo Ângelo	LVdf
11	FUNDACEP	Cruz Alta	LVd
12	COTRIJUÍ	Ajuricaba	LVd
13	COTRIJUÍ	Coronel Bicaco	LVd
14	COTRIJUÍ	Redentora	LVd
15	COTRIJUÍ	Santo Augusto	LVd
16	COTRIJUÍ	São Valério do Sul	LVd
17	COTRIJUÍ	São Valério do Sul	LVd
18	COTRIBÁ	Ibirubá	LVd

PVd: Argissolo Vermelho distrófico, LVd: Latossolo Vermelho distrófico, LVaf: Latossolo Vermelho aluminoférrico, LVdf: Latossolo Vermelho distroférico.

Tabela 8. Instituições responsáveis, locais no RS e solos utilizados nos experimentos conduzidos com doses de K<sub>2</sub>O.

Experimento	Instituição	Local	Solo
19	UFRGS	Eldorado do Sul	PVd
20	CTRISOJA-FUNDACEP	Tapera	LVd
21	COTRIJAL-FUNDACEP	Não-Me-Toque	LVd
22	COTREL-FUNDACEP	Erechim	LVaf
23	COPALMA-FUNDACEP	Palmeira das Missões	LVd
24	COTRIJUÍ-FUNDACEP	Ijuí	LVd
25	COTRIPAL-FUNDACEP	Condor	LVd
26	UFSM	São Francisco de Assis	RQ
27	COTRISA-FUNDACEP	Santo Ângelo	LVdf
28	FUNDACEP	Cruz Alta	LVd
29	COTRIJUÍ	Ajuricaba	LVd
30	COTRIJUÍ	Coronel Bicaco	LVd
31	COTRIJUÍ	Redentora	LVd
32	COTRIJUÍ	Santo Augusto	LVd
33	COTRIJUÍ	São Valério do Sul	LVd
34	COTRIJUÍ	São Valério do Sul	LVd
35	COTRIBÁ	Ibirubá	LVd

PVd: Argissolo Vermelho distrófico, LVd: Latossolo Vermelho distrófico, LVaf: Latossolo Vermelho aluminoférrico, RQ: Neossolo quartzarênico órtico, LVdf: Latossolo Vermelho distroférico.

Tabela 9. Atributos de fertilidade de solos no tratamento sem adição de fósforo dos experimentos com doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, conduzidos por diferentes instituições no RS.

Instituição	Argila	Matéria orgânica	pH H <sub>2</sub> O	Fósforo <sup>(5)</sup>	Potássio <sup>(5)</sup>	Cálcio	Magnésio	Alumínio	CTC
	----- g kg <sup>-1</sup> -----			----- mg kg <sup>-1</sup> -----		----- cmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> -----			
UFRGS <sup>(1, 2, 3, 4)</sup>	220	28	5,0	4,0	225	3,3	1,8	0,5	10,4
COTRISOJA-FUNDACEP <sup>(1, 3, 4)</sup>	480	31	5,3	15,8	150	6,0	2,8	0,3	13,9
COTRIJAL-FUNDACEP <sup>(1, 3, 4)</sup>	300	27	5,2	9,7	134	2,8	1,3	0,9	9,6
COTREL-FUNDACEP <sup>(1, 4)</sup>	700	37	5,2	14,9	300	8,6	4,2	0,4	18,7
COPALMA-FUNDACEP <sup>(1, 4)</sup>	560	38	5,5	5,3	100	3,0	1,6	0,5	11,6
COTRIJUÍ-FUNDACEP <sup>(1, 4)</sup>	>560	47	5,9	11,2	86	5,1	2,1	0,0	9,9
COTRIPAL-FUNDACEP <sup>(1, 4)</sup>	>560	34	5,4	13,9	82	4,4	2,1	0,0	10,5
EMBRAPA Trigo (Marau) <sup>(1, 3)</sup>	630	42	4,9	3,4	74	3,7	3,2	4,7	-
EMBRAPA Trigo <sup>(1, 3)</sup>	450	47	4,3	2,7	117	1,8	0,8	3,4	15,6
COTRISA-FUNDACEP <sup>(1, 3, 4)</sup>	650	35	5,6	4,6	80	2,6	1,3	0,6	14,7
FUNDACEP <sup>(1, 4)</sup>	500	42	5,2	22,2	253	5,7	2,5	0,5	13,5
COTRIJUÍ (Ajuricaba) <sup>(1, 2, 4)</sup>	>560	36	6,2	5,8	266	7,4	3,9	0,0	14,5
COTRIJUÍ (C. Bicaco) <sup>(1, 2, 4)</sup>	>560	38	6,5	10,0	500	7,9	4,2	0,0	15,7
COTRIJUÍ (Redentora) <sup>(1, 2, 4)</sup>	>560	37	6,5	12,0	299	6,5	3,6	0,0	12,9
COTRIJUÍ (S. Augusto) <sup>(1, 2, 4)</sup>	>560	35	6,2	3,7	102	7,6	4,0	0,0	14,6
COTRIJUÍ (S. Vsalério) <sup>(1, 2, 4)</sup>	>560	36	5,3	11,0	186	4,2	2,2	0,4	11,6
COTRIJUÍ (S. Valério) <sup>(1, 2, 4)</sup>	>560	38	6,1	5,6	334	7,7	2,9	0,0	14,1
COTRIBÁ (Ibirubá) <sup>(1, 2, 4)</sup>	>560	38	5,6	6,0	65	5,4	2,7	0,0	12,2

<sup>(1)</sup> Amostragem feita na profundidade de 0-10 cm; <sup>(2)</sup> Amostragem feita na profundidade de 0-20 cm; <sup>(3)</sup> Amostra retirada antes da instalação do experimento; <sup>(4)</sup> Amostra retirada no último ano de condução do experimento; <sup>(5)</sup> Mehlich-1.

Tabela 10. Atributos de fertilidade de solo no tratamento sem adição de potássio dos experimentos com doses de K<sub>2</sub>O, conduzidos por diferentes instituições no RS.

Instituição	Argila	Matéria orgânica	pH H <sub>2</sub> O	Fósforo <sup>(5)</sup>	Potássio <sup>(5)</sup>	Cálcio	Magnésio	Alumínio	CTC
	----- g kg <sup>-1</sup> -----			----- mg kg <sup>-1</sup> -----		----- cmol <sub>c</sub> L <sup>-1</sup> -----			
EEA-UFRGS <sup>(1, 2, 3, 4)</sup>	220	28	5,0	3,1	182	3,3	1,8	0,5	10,4
COTRISOJA-FUNDACEP <sup>(1, 4)</sup>	480	31	5,3	12,0	113	6,0	2,8	0,3	13,9
COTRIJAL-FUNDACEP <sup>(1, 3, 4)</sup>	300	27	5,2	12,0	104	2,8	1,3	0,9	9,6
COTREL-FUNDACEP <sup>(1, 3, 4)</sup>	700	37	5,2	9,4	248	8,6	4,2	0,4	18,7
COPALMA-FUNDACEP <sup>(1, 4)</sup>	560	38	5,5	4,0	77	3,0	1,6	0,5	11,6
COTRIJUÍ-FUNDACEP <sup>(1, 4)</sup>	>560	47	5,9	18,0	63	5,1	2,1	0,0	9,9
COTRIPAL-FUNDACEP <sup>(1, 4)</sup>	>560	34	5,4	13,0	76	4,4	2,1	0,0	10,5
UFSM <sup>(1, 2, 3)</sup>	100		5,7	7,6	33	0,5	0,5	0,2	-
COTRISA-FUNDACEP <sup>(1, 3, 4)</sup>	650	34	5,0	9,4	153	4,6	2,1	0,4	10,9
FUNDACEP <sup>(1, 3)</sup>	500	38	5,4	28,0	88	6,6	3,2	0,2	14,3
COTRIJUÍ (Ajuricaba) <sup>(1, 2, 4)</sup>	>560	36	6,2	5,8	151	7,4	3,9	0,0	14,5
COTRIJUÍ (C. Bicaco) <sup>(1, 2, 4)</sup>	>560	38	6,5	17,0	203	7,9	4,2	0,0	15,7
COTRIJUÍ (Redentora) <sup>(1, 2, 4)</sup>	>560	37	6,5	12,0	161	6,5	3,6	0,0	12,9
COTRIJUÍ (S. Augusto) <sup>(1, 2, 4)</sup>	>560	35	6,2	7,7	237	7,6	4,0	0,0	14,6
COTRIJUÍ (S. Vsalério) <sup>(1, 2, 4)</sup>	>560	36	5,3	11,0	149	4,2	2,2	0,4	11,6
COTRIJUÍ (S. Valério) <sup>(1, 2, 4)</sup>	>560	38	6,1	5,6	44	7,7	2,9	0,0	14,1
COTRIBÁ (Ibirubá) <sup>(1, 2, 4)</sup>	>560	38	5,6	8,3	65	5,4	2,7	0,0	12,2

<sup>(1)</sup> Amostragem feita na profundidade de 0-10 cm; <sup>(2)</sup> Amostragem feita na profundidade de 0-20 cm; <sup>(3)</sup> Amostra retirada antes da instalação do experimento; <sup>(4)</sup> Amostra retirada no último ano de condução do experimento; <sup>(5)</sup> Mehlich-1

aproveitaram-se os tratamentos de interesse em alguns experimentos e utilizaram-se todos os tratamentos em outros. Os tratamentos de interesse foram aqueles que tinham amostras de solo antes da implantação dos mesmos ou foi possível a coleta de amostras de solo após a colheita e continham doses de fósforo e/ou potássio com seus respectivos dados de rendimentos das culturas. Os tratamentos apresentam diferenças na época de adubação, no ano de instalação, no tempo de condução e nas doses de fertilizantes (Tabelas 11 e 12).

#### **5.2.2.1. Experimentos com doses de $P_2O_5$**

Um experimento foi instalado na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, em Eldorado do Sul, em 1995 e conduzido até 1997, sendo cultivado com trigo e milho, inicialmente sob sistema convencional de cultivo e sob sistema plantio direto nos últimos cultivos. A adubação fosfatada (doses de 0, 35, 70, 105, 140, 120, 155, 190, 228 e 260 kg ha<sup>-1</sup> de  $P_2O_5$ ) foi feita a lanço e incorporada no solo antes do primeiro cultivo. Em 2000 foi instalado outro experimento na Estação Experimental Agronômica da UFRGS, cultivado com milho sob sistema plantio direto com fósforo (doses de 0, 62, 123, 246 e 492 kg ha<sup>-1</sup>  $P_2O_5$ ) aplicado na superfície do solo e reaplicação na superfície em 2001 antes do cultivo de trigo.

Os experimentos nas cooperativas (COTRISOJA, COTRIJAL, COTREL, COPALMA, COTRIJUI, COTRIPAL) em convênio com a FUNDACEP tinham o mesmo delineamento fatorial (4 x 4), composto por culturas e doses de  $P_2O_5$  que foram aplicadas sempre a lanço. No fator dose de  $P_2O_5$ , os tratamentos foram compostos por testemunha com zero de  $P_2O_5$ , quantidades de  $P_2O_5$  exportadas pelos grãos, uma vez, e 1,5 vezes a dose de  $P_2O_5$  recomendada pela Comissão... (1995). No fator cultura, os tratamentos foram compostos por uma parcela da seqüência soja/trigo e três parcelas da seqüência soja/aveia preta, soja/aveia preta + ervilhaca, milho/trigo (rotação de inverno e de verão em diferentes etapas, de modo a ter todas as culturas em todos os anos).

Um experimento instalado em 1994 em Marau foi conduzido pela Embrapa Trigo, com o fósforo (doses de 0, 40, 80, 160 e 320 kg ha<sup>-1</sup>  $P_2O_5$ ) incorporado ao solo antes do plantio do trigo e soja sob sistema plantio direto. Outro experimento foi instalado em Passo Fundo em 2000, com doses de fósforo

Tabela 11. Instituição condutora dos experimentos, adubação, ano, cultura e doses aplicadas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Instituição	Adubação	Ano	Cultura <sup>(1)</sup>	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>(2)</sup>									
				----- kg ha <sup>-1</sup> -----									
UFRGS	Inicial	1995-1997	T, M	0	35	70	105	140	120	155	190	228	260
UFRGS	Inicial	2000	M	0	62	123	246	492					
UFRGS	Acumulado	2001	T	0	114	228	456	912					
COTRISOL-FUNDACEP	Anual	1999-2001	S, T, M	0	E	C	1,5 C						
COTRIJAL-FUNDACEP	Anual	1999-2001	S, T, M	0	E	C	1,5 C						
COTREL-FUNDACEP	Inicial	1999	S, T, M	0	E	C	1,5 C						
COPALMA-FUNDACEP	Inicial	1999	S, M	0	E	C	1,5 C						
COTRIJUÍ-FUNDACEP	Inicial	2001	S, M	0	E	C	1,5 C						
COTRIPAL-FUNDACEP	Inicial	2001	S, M	0	E	C	1,5 C						
EMBRAPA Trigo (Marau)	Inicial	1994	S, T	0	40	80	160	320					
EMBRAPA Trigo	Inicial	2000-2001	T, S, M	0	50	100	400						
COTRISA-FUNDACEP	Anual	1994-2001	S, T, M	0 <sup>(3)</sup>	30 + C <sup>(3)</sup>	60 + C <sup>(3)</sup>	90 + C <sup>(3)</sup>	120 + C <sup>(3)</sup>					
FUNDACEP	Anual	1994-2001	T, S, M	0 <sup>(3)</sup>	30 + C <sup>(3)</sup>	60 + C <sup>(3)</sup>	90 + C <sup>(3)</sup>	120 + C <sup>(3)</sup>					
COTRIJUÍ (Ajuricaba)	Inicial	2001	S	0	300	600							
COTRIJUÍ (C. Bicaco)	Inicial	2001	S	0	300	600							
COTRIJUÍ (Redentora)	Inicial	2001	S	0	300	600							
COTRIJUÍ (S. Augusto)	Inicial	2001	S	0	300	600							
COTRIJUÍ (S. Valério)	Inicial	2001	S	0	300	600							
COTRIJUÍ (S. Valério)	Inicial	2001	S	0	300	600							
COTRIBÁ (Ibirubá)	Inicial	2001	S	0	300	600							

<sup>(1)</sup> Culturas, S: soja, T: trigo M: milho, P: pastagem; <sup>(2)</sup> Adubação, E: quantidade exportada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, C: dose recomendada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> pela Comissão... (1995) ;

<sup>(3)</sup> Adubação de 0, 30, 60, 90 e 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> nas culturas de inverno nas parcelas principais e 0, 1/3, 2/3, 3/3 e 4/3 da dose recomendada pela Comissão... (1995) para cada cultura de verão, nas sub-parcelas.

Tabela 12. Instituição condutora dos experimentos, adubação, ano, cultura e doses aplicadas de K<sub>2</sub>O.

Instituição	Adubação	Ano	Cultura <sup>(1)</sup>	Doses de K <sub>2</sub> O <sup>(2)</sup>				
				----- kg ha <sup>-1</sup> -----				
UFRGS	Inicial	2000	M	0	12	23	46	93
UFRGS	acumulado	2001	T	0	23	46	93	186
COTRISOL-FUNDACEP	Anual	1999-2001	S, T, M	0	E	C	1,5 C	
COTRIJAL-FUNDACEP	Anual	1999-2001	S, T, M	0	E	C	1,5 C	
COTREL-FUNDACEP	Inicial	1999	S, T, M	0	E	C	1,5 C	
COPALMA-FUNDACEP	Inicial	1999	S, M	0	E	C	1,5 C	
COTRIJUÍ-FUNDACEP	Inicial	2001	S, M	0	E	C	1,5 C	
COTRIPAL-FUNDACEP	Inicial	2001	S, M	0	E	C	1,5 C	
UFSM (Madame)	Inicial	1995-1998	S, M, P	0	50	100	200	
COTRISA-FUNDACEP	Anual	1994-2001	S, M, T	0 <sup>(3)</sup>	30 + C <sup>(3)</sup>	60 + C <sup>(3)</sup>	90 + C <sup>(3)</sup>	120 + C <sup>(3)</sup>
FUNDACEP	Anual	1994-2001	S, M, T	0 <sup>(3)</sup>	30 + C <sup>(3)</sup>	60 + C <sup>(3)</sup>	90 + C <sup>(3)</sup>	120 + C <sup>(3)</sup>
COTRIJUÍ (Ajuricaba)	Inicial	2001	S	0	300	600		
COTRIJUÍ (C. Bicaco)	Inicial	2001	S	0	300	600		
COTRIJUÍ (Redentora)	Inicial	2001	S	0	300	600		
COTRIJUÍ (S. Augusto)	Inicial	2001	S	0	300	600		
COTRIJUÍ (S. Valério)	Inicial	2001	S	0	300	600		
COTRIJUÍ (S. Valério)	Inicial	2001	S	0	300	600		
COTRIBÁ (Ibirubá)	Inicial	2001	S	0	300	600		

<sup>(1)</sup> Culturas, S: soja, T: trigo M: milho, P: pastagem ; <sup>(2)</sup> Adubação, E: quantidade exportada de K<sub>2</sub>O, C: dose recomendada de K<sub>2</sub>O pela Comissão... (1995) ; <sup>(3)</sup> Adubação de 0, 30, 60, 90 e 120 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O nas culturas de inverno nas parcelas principais e 0, 1/3, 2/3, 3/3 e 4/3 da dose recomendada pela Comissão... (1995) para cada cultura de verão, nas sub-parcelas.

(0, 50, 100 e 400 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) incorporado antes do cultivo sob sistema plantio direto com as culturas trigo, soja, cevada e milho.

Um experimento instalado em Santo Ângelo (COTRISA-FUNDACEP) e outro em Cruz Alta (FUNDACEP) foram adubados sempre a lanço, com doses de fósforo (0, 30, 60, 90 e 120 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) aplicado nas parcelas principais da cultura de trigo e doses de fósforo recomendadas pela Comissão..., 1995 (0, 1/3, 2/3, 3/3 e 4/3 da dose de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para as culturas) aplicado nas sub-parcelas nas culturas de soja e de milho, cultivadas sempre sob sistema plantio direto.

Seis experimentos foram conduzidos pela COTRIJUI e um pela COTRIBÁ, em parcelões com doses de fósforo (0, 300 e 600 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) aplicado a lanço na superfície antes do cultivo da soja sob sistema plantio direto.

#### **5.2.2.2. Experimentos com doses de K<sub>2</sub>O**

Um experimento foi instalado na Estação Experimental Agronômica da UFRGS em 2000, cultivado com milho sob sistema plantio direto com doses de potássio (0, 12, 23, 46 e 93 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O) distribuído a lanço na superfície do solo. Foi feita uma reaplicação na superfície em 2001 e foi cultivado com trigo.

Os experimentos nas cooperativas (COTRISOJA, COTRIJAL, COTREL, COPALMA, COTRIJUI, COTRIPAL) em convênio com a FUNDACEP apresentaram o mesmo delineamento fatorial (4 x 4), composto por culturas e doses de potássio aplicado sempre a lanço. No fator dose de K<sub>2</sub>O, os tratamentos foram compostos por testemunha com zero de K<sub>2</sub>O, quantidades de K<sub>2</sub>O exportadas pelos grãos, uma vez, e 1,5 vezes a dose de K<sub>2</sub>O recomendada pela Comissão... (1995). No fator cultura, os tratamentos foram compostos por uma parcela da seqüência soja/trigo e três parcelas da seqüência soja/aveia preta, soja/aveia preta + ervilhaca, milho/trigo (rotação de inverno e de verão em diferentes etapas, de modo a ter todas as culturas em todos os anos).

Um experimento foi conduzido pela UFSM, em Santa Maria, com doses de potássio (0, 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O) aplicado na superfície, na

instalação do experimento sob sistema plantio direto de cultivo por quatro anos, com soja e milho no verão e aveia preta no inverno.

Os experimentos instalados em Santo Ângelo (COTRISA-FUNDACEP) e em Cruz Alta (FUNDACEP) foram adubados sempre a lanço, com doses de potássio (0, 30, 60, 90 e 120 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O) nas parcelas principais, aplicado na cultura do trigo, e doses de potássio recomendadas pela Comissão..., 1995 (0, 1/3, 2/3, 3/3 e 4/3 da dose de K<sub>2</sub>O para as culturas) aplicado nas sub-parcelas nas culturas da soja e milho, sob sistema plantio direto de cultivo.

Os experimentos conduzidos pela COTRIJUI (seis) e pela COTRIBÁ (um) foram instalados em parcelas com doses de potássio (0, 300 e 600 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O) aplicado a lanço na superfície antes do cultivo da soja sob sistema plantio direto.

### **5.2.3. Amostragem do solo e rendimento de grãos**

Nos experimentos conduzidos antes de 1999, as amostras de solo das camadas 0-20 e 0-10 cm de profundidade, utilizadas neste estudo, foram obtidas dos bancos de solos das instituições que os conduziram. Nesse caso as amostras de solo foram todas retiradas com pá-de-corte. Nos experimentos conduzidos a partir de 1999 (UFRGS, Embrapa Trigo, Cooperativas e Cooperativas em convênio com a FUNDACEP), as amostras de solo foram retiradas com pá de corte, com cinco repetições, sendo de 5 cm de espessura por 10 cm de largura e profundidade de 0-20 e 0-10 cm.

Os resultados de rendimento de grãos das culturas soja, trigo e milho dos experimentos utilizados neste estudo foram obtidos a partir de colheitas feitas pelas instituições que os conduziram. Nos experimentos de parcelas sem repetição (parcelões), colheram-se duas ou três parcelas menores por parcelão e utilizaram-se os dados médios na apresentação dos resultados.

### **5.2.4. Análises e determinações**

As amostras de solo que não estavam preparadas para análise foram secas a 40-45 °C em estufa com circulação forçada de ar, moídas em moinho de martelo e peneiradas (2 mm).

Nos tratamentos-testemunha de cada experimento, com dose zero do fertilizante testado, foram determinados o pH do solo, os teores de argila, a matéria orgânica, os macronutrientes (fósforo, potássio, cálcio e magnésio) e o alumínio, conforme procedimentos de rotina (Tedesco et al., 1995).

O fósforo e o potássio das amostras de todos os tratamentos dos experimentos foram determinados pelos métodos Mehlich-1 e resina, conforme procedimentos descritos em Tedesco et al. (1995) e pelo método Mehlich-3, conforme procedimentos descritos em Mehlich (1984). Foram introduzidas algumas modificações nos procedimentos dos métodos da resina e Mehlich-3 descritas nos Apêndices 1 e 3, respectivamente. Todos os procedimentos de laboratório foram feitos em duplicata e foram utilizados os dados médios na apresentação dos resultados.

#### **5.2.5. Procedimentos de interpretação**

O rendimento relativo das culturas foi determinado a partir das funções de produção obtidas das respostas das mesmas nos experimentos com doses de fósforo e/ou potássio. A calibração foi feita com os rendimentos relativos de cada experimento e o fósforo ou o potássio determinado pelo método a ser calibrado. Na calibração foram estimados o teor crítico e as faixas de fertilidade e foram estabelecidas as doses de fertilizantes fosfatado e potássico para as culturas.

Alguns resultados discrepantes da maioria, principalmente nas funções de produção, na calibração e na quantificação de doses  $P_2O_5$  ou  $K_2O$  para a adubação das culturas, foram descartados. Segundo Fitts (1959) as produções agrícolas são influenciadas por fatores da cultura, do solo, do clima e do manejo e as respostas inesperadas muitas vezes não podem ser explicadas quando não se tem um acompanhamento direto dos experimentos, tal como estes que foram conduzidos por diferentes instituições no RS. Além disso, os teores de fósforo e potássio do solo sob sistema plantio direto obtidos pela análise de solo também apresentam muita variabilidade (Schlindwein & Anghinoni, 2000), podendo apresentar resultados inesperados.

### 5.2.5.1. Rendimento relativo

O rendimento relativo das culturas foi obtido pela relação:

$$RR(\%) = \frac{\text{Rendimento da cultura sem o fertilizante testado}}{\text{Rendimento máximo da cultura para a dose do fertilizante testado}} \times 100 \quad (1)$$

O rendimento da cultura sem o fertilizante testado, utilizado no cálculo do rendimento relativo, foi o estimado pela função de produção ajustada, ou seja, o coeficiente “a” da equação de regressão entre as doses de fertilizantes e o rendimento de grãos. Para o valor de rendimento máximo da cultura foi utilizado o valor estimado pela equação de regressão até no máximo da dose de fertilizante aplicado. No caso do uso de equações lineares com respostas positivas à utilização de fertilizantes, o valor de rendimento máximo foi o correspondente à maior dose utilizada e no caso de resposta negativa, o rendimento máximo foi o correspondente à dose zero do fertilizante testado (coeficiente “a” da equação de regressão). Quando foram empregadas funções polinomiais de segundo grau, utilizou-se a técnica de derivação das funções para a obtenção do valor de rendimento máximo a ser empregado na relação (1).

Na avaliação dos rendimentos das culturas nos experimentos com doses de fertilizantes fosfatado e potássico, as análises de regressão foram calculadas com os programas SIGMAPLOT e SIGMASTAT, utilizando-se equações polinomiais de primeiro e segundo grau que proporcionaram o melhor ajuste dos dados pelo método dos quadrados mínimos. Nas análises de regressão dos experimentos onde houve o cultivo de várias culturas com uma única aplicação de fertilizantes, foram utilizadas as mesmas doses para todos os cultivos. Para os experimentos que receberam mais de uma aplicação de fertilizantes, foi utilizado o somatório das doses aplicadas até a avaliação da cultura.

Este procedimento foi adotado porque alguns tratamentos receberam doses de fertilizantes maiores do que as necessidades das plantas, propiciando o acúmulo no solo na seqüência dos cultivos e outros receberam doses menores de fertilizantes ou não receberam, como o tratamento testemunha, resultando em diminuição dos teores no solo ao longo das

avaliações. Além disso, a incorporação ou não dos fertilizantes, especialmente para o fósforo, associada ao teor no solo, ao tempo de adição, à dose aplicada e às características da mineralogia do solo, pode influenciar na sua eficiência e no efeito residual em solos de baixa fertilidade (Scholles et al., 1978; Yost et al., 1979; Rodrigues et al., 1985).

#### **5.2.5.2. Calibração**

A curva de calibração foi obtida pela relação entre os valores de fósforo ou potássio determinados pelos diferentes métodos em estudo e os valores de rendimento relativo calculado pela equação (1).

A escolha da função a ser utilizada no ajuste dos dados da calibração foi feita pelo programa de computação "TABLE CURVE 2D v 5" da SPSS (1999), que classificou as mesmas pelo valor de  $r^2$ . A equação selecionada ( $y = a + b \ln x$ ) que melhor se ajustou à maioria dos dados passa próximo da origem e apresenta um formato curvilíneo, semelhante ao obtido na resposta das plantas a teores de nutriente no solo.

O teor crítico foi definido como o valor do nutriente no solo para a probabilidade de aproximadamente 90% do rendimento máximo, como foi definido nos Programas de Adubação no RS e SC (Mielniczuk et al., 1969 a, b; Universidade..., 1973; Tabelas..., 1976; Manual..., 1981; Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995) e em SP (Raij et al., 1997).

O teor crítico de fósforo e de potássio no solo foi ajustado para valores ímpares e dividido por três para formar faixas de teores equidistantes, denominadas muito baixo, baixo e médio. Acima do teor crítico também foram estabelecidas duas faixas de fertilidade com os mesmos valores equidistantes, denominadas alto e muito alto.

A estimativa da dose de fertilizantes  $P_2O_5$  e  $K_2O$  para as culturas foi obtida pela metodologia proposta por Kussow et al. (1976). Partindo-se da relação entre os rendimentos relativos e os teores do nutriente em questão, obtidos com os métodos Mehlich-1, Mehlich-3 e resina de troca iônica (curva de calibração), determinou-se a dose média de fertilizantes para a obtenção de 90% do rendimento relativo máximo em cada classe de teor de argila para o fertilizante  $P_2O_5$  e em todos os solos para o  $K_2O$ .

Neste trabalho pressupõe-se que a dose de fertilizante necessária para um rendimento de 90% da máxima eficiência técnica também corrige o valor do nutriente no solo para valores próximos do teor crítico. A diferença entre o valor de fósforo ou de potássio no teor crítico e o valor original de cada solo representa o aumento da fertilidade proporcionado pela adição do fertilizante. Assim, foi possível elaborar uma tabela de recomendações com base nos valores em  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ou  $\text{K}_2\text{O}$  necessários para elevar o teor em  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  no solo, até atingir o teor crítico.

A quantificação da dose de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ou  $\text{K}_2\text{O}$  para uma determinada faixa de fertilidade foi feita multiplicando-se a dose necessária para elevar o teor em  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo pela diferença entre o valor do teor crítico e o valor intermediário da faixa de fertilidade em estudo.

A dose de fertilizante, estimada para um rendimento em torno de 90% da máxima eficiência técnica e capaz de corrigir o valor do nutriente no solo para valores próximos do teor crítico, pode não ser a dose de máxima eficiência econômica. Por isso, somou-se a esta (mais duas vezes) a quantidade estimada de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ou  $\text{K}_2\text{O}$  exportada pelos grãos (Wiethölter et al., 1998) e dividiu-se por três, referente a três cultivos. Pressupõe-se, desta forma, que o teor do nutriente no solo é elevado a valores próximos do teor crítico no período de três cultivos.

### **5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste item são apresentados os dados de rendimento das culturas soja, trigo e milho, cultivadas sob sistema plantio direto. Com eles foram calculados os rendimentos relativos destas culturas, utilizados na calibração dos valores de fósforo e potássio, obtidos com os métodos Mehlich-1, Mehlich-3 e resina de troca iônica. Após a obtenção da curva de calibração foram definidos o teor crítico, as faixas de fertilidade destes nutrientes no solo e as doses de máxima eficiência econômica de  $\text{P}_2\text{O}_5$  ou  $\text{K}_2\text{O}$  em  $\text{kg ha}^{-1}$  para as culturas soja, trigo e milho.

### 5.3.1. Produtividade das culturas

As equações de regressão polinomial da resposta das culturas à adição de fertilizantes estão descritas nas Tabelas 13 a 18 e foram selecionadas pelo maior coeficiente de determinação a partir dos rendimentos médios. Foram utilizados os rendimentos médios nas avaliações de regressão, pois muitos experimentos foram conduzidos em parcelões, sem um delineamento experimental adequado para análises estatísticas. Nesses casos, foram utilizados os rendimentos médios das culturas obtidos pela avaliação de parcelas menores dentro dos parcelões. Para alguns experimentos conduzidos por outras instituições e já encerrados, foram obtidos apenas os dados médios de rendimento dos tratamentos.

As funções não lineares polinomiais foram as que melhor se ajustaram à maioria dos dados das curvas de resposta das plantas à adição de doses de fertilizantes  $P_2O_5$  e  $K_2O$ . Colwel (1966) também obteve um melhor ajuste com as funções quadrática e linear, se comparado ao obtido com as de Mitcherlich e da raiz quadrada em experimentos de calibração de fósforo e potássio com culturas de trigo e batata. O autor concluiu que a equação quadrática é adequada para expressar a curva de resposta das culturas à aplicação de fósforo e potássio.

Ao comparar a produtividade das culturas, observou-se uma grande variabilidade de rendimento, tanto na ausência do fertilizante em estudo (coeficiente de regressão "a"), como no aumento do rendimento por kg do fertilizante em estudo adicionado (coeficiente de regressão "b"). Esta diferença deve estar associada às diferenças nas características químicas e mineralógicas dos solos estudados, à eficiência de utilização do fertilizante adicionado, ao clima e ao manejo. Depende também do modo de adubação e das quantidades que influenciam no efeito residual (Scholles et al., 1978; Yost et al., 1979; Rodrigues et al., 1985).

A baixa resposta das culturas em alguns locais deveu-se, em parte, às doses baixas de fertilizantes aplicados, associadas ao modo de adubação e aos níveis originais de fertilidade. Isso influenciou na escolha da função para ajuste dos dados, pois a resposta à aplicação do fertilizante foi linear (Tabelas 13, 14, 15, 17 e 18). A falta de resposta da cultura à adubação, verificada pelo

Tabela 13. Instituição condutora dos experimentos no RS, ano de condução, equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação e rendimento relativo de soja cultivada sob sistema plantio direto com doses de  $P_2O_5$ .

Instituição	Ano	Equação de regressão polinomial	$r^2$	Rendimento Relativo <sup>(1)</sup>
				--- % ---
COTRIJUI (Ajuricaba)	2002	$Y = 3507 + 0,25P$	0,49	96
COTRIJUI (C.Bicaco)	2002	$Y = 2833 - 0,04P$	0,04	100
COTRIJUI (Redentora)	2002	$Y = 2500 - 0,04P$	0,43	100
COTRIJUI (S. Augusto)	2002	$Y = 2532 - 0,85P$	0,87	100
COTRIBÁ (Ibirubá)	2002	$Y = 3474 + 0,08P$	0,43	99
COTRIJUI (S. Valério)	2002	$Y = 3049 + 1,01P$	0,93	88
COTRIJUI (S. Valério)	2002	$Y = 2055 + 0,78P$	0,55	88
COTRISOL-FUNDACEP	1999	$Y = 3670 + 29,80P - 0,590P^2$	0,99	91
COTRISOL-FUNDACEP	2000	$Y = 2587 + 9,36P - 0,060P^2$	0,96	83
COTRISOL-FUNDACEP	2001	$Y = 1409 + 9,22P - 0,005P^2$	0,99	73
COTRIJAL-FUNDACEP	1999	$Y = 2033 + 13,50P - 0,100P^2$	0,84	87
COTRIJAL-FUNDACEP	2000	$Y = 2881 + 9,90P$	0,71	83
COTRIJAL-FUNDACEP	2001	$Y = 1831 + 10,88P - 0,080P^2$	0,93	83
COTREL-FUNDACEP	1999	$Y = 1885 + 14,48P - 0,240P^2$	0,79	90
COPALMA-FUNDACEP	1999	$Y = 325 + 2,35P - 0,005P^2$	0,98	62
EMBRAPA Trigo (Marau)	1994	$Y = 1942 + 12,54P - 0,020P^2$	0,92	60
EMBRAPA Trigo	2000	$Y = 1486 + 12,44P - 0,020P^2$	0,94	55
COTRIUI-FUNDACEP	2001	$Y = 2335 + 9,46P - 0,020P^2$	0,99	82
COTRIPAL-FUNDACEP	2001	$Y = 1547 + 9,53P - 0,020P^2$	0,85	68
COTRISA-FUNDACEP	1994	$Y = 2766 + 3,06P$	0,42	89
COTRISA-FUNDACEP	2000	$Y = 2318 + 20,25P - 0,120P^2$	0,39	73
FUNDACEP	1994	$Y = 2908 + 1,54P - 0,007P^2$	0,02	97
FUNDACEP	1995	$Y = 2441 + 2,67P - 0,020P^2$	0,02	96
FUNDACEP	1997	$Y = 2975 + 1,70P - 0,020P^2$	0,02	96
FUNDACEP	2000	$Y = 2923 + 6,02P - 0,190P^2$	0,19	93
<b>Média</b>		<b><math>Y = 2408 + 7,20P - 0,10P^2</math></b>	<b>0,63</b>	<b>85</b>

(1)  $RR(\%) = \frac{\text{Rendimento da cultura sem o fertilizante testado}}{\text{Rendimento máximo da cultura para a dose do fertilizante testado}} \times 100$

Tabela 14. Instituição condutora dos experimentos no RS, ano de condução, equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação e rendimento relativo de trigo cultivado sob sistema plantio direto com doses de  $P_2O_5$ .

Instituição	Ano	Equação de regressão polinomial	$r^2$	Rendimento Relativo <sup>(1)</sup> --- % ---
UFRGS	1996	$Y = 1013 + 14,8P - 0,035P^2$	0,93	40
UFRGS	1997	$Y = 1447 + 7,38P - 0,016P^2$	0,98	64
COTRISOL-FUNDACEP	2000	$Y = 2591 + 52,80P - 1,110P^2$	0,99	80
COTRIJAL-FUNDACEP	2000	$Y = 1147 + 25,69P - 0,350P^2$	0,99	71
COTREL-FUNDACEP	2000	$Y = 1585 + 11,45P - 0,050P^2$	0,73	72
EMBRAPA Trigo (Marau)	1994	$Y = 1376 + 3,51P - 0,003P^2$	0,96	56
EMBRAPA Trigo	2000	$Y = 1076 + 5,03P - 0,009P^2$	0,99	63
EMBRAPA Trigo	2001	$Y = 1368 + 8,34P - 0,010P^2$	0,99	53
COTRISA-FUNDACEP	1999	$Y = 950 - 1,16P$	0,10	100
FUNDACEP	1997	$Y = 2134 + 5,04P - 0,020P^2$	0,45	85
FUNDACEP	1999	$Y = 2895 + 3,19P - 0,020P^2$	0,12	96
<b>Média</b>		<b><math>Y = 1598 + 12,37P - 0,160P^2</math></b>	<b>0,75</b>	<b>71</b>

$$(1) \quad RR(\%) = \frac{\text{Rendimento da cultura sem o fertilizante testado}}{\text{Rendimento máximo da cultura para a dose do fertilizante testado}} \times 100$$

Tabela 15. Instituição condutora dos experimentos no RS, ano de condução, equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação e rendimento relativo de milho cultivado sob sistema plantio direto com doses de  $P_2O_5$ .

Instituição	Ano	Equação de regressão polinomial	$r^2$	Rendimento Relativo <sup>(1)</sup> --- % ---
UFRGS	1996	$Y = 3973 + 48,02P - 0,125P^2$	0,95	46
UFRGS	1997	$Y = 5234 + 31,82P - 0,064P^2$	0,90	57
UFRGS	1998	$Y = 3732 + 22,89P - 0,033P^2$	0,96	50
UFRGS	2000	$Y = 6264 + 24,58P - 0,040P^2$	0,79	60
COTRISOL-FUNDACEP	1999	$Y = 2581 + 104,44P - 1,310P^2$	0,99	56
COTRISOL-FUNDACEP	2000	$Y = 4225 + 48,75P - 1,000P^2$	0,90	90
COTRISOL-FUNDACEP	2001	$Y = 3512 + 14,51P - 0,130P^2$	0,99	73
COTRIJAL-FUNDACEP	1999	$Y = 3468 + 113,56P - 2,660P^2$	0,91	86
COTRIJAL-FUNDACEP	2000	$Y = 3853 + 20,96P$	0,59	75
COTRIJAL-FUNDACEP	2001	$Y = 2736 + 7,27P$	0,79	63
COTREL-FUNDACEP	1999	$Y = 7026 + 184,64P - 2,950P^2$	0,87	76
COPALMA-FUNDACEP	1999	$Y = 7013 + 120,72P - 1,450P^2$	0,94	53
EMBRAPA Trigo	2000	$Y = 3196 + 10,22P - 0,020P^2$	0,99	69
COTRIJUI-FUNDACEP	2001	$Y = 3710 + 27,70P - 0,240P^2$	0,96	83
COTRIPAL-FUNDACEP	2001	$Y = 2699 + 16,89P - 0,040P^2$	0,99	69
COTRISA-FUNDACEP	1996	$Y = 4214 + 30,97P - 0,180P^2$	0,51	76
COTRISA-FUNDACEP	1998	$Y = 940 + 10,80P - 0,050P^2$	0,41	60
FUNDACEP	1996	$Y = 7939 + 9,06P - 0,020P^2$	0,54	91
<b>Média</b>		<b><math>Y = 4239 + 47,10P - 0,640P^2</math></b>	<b>0,83</b>	<b>68</b>

$$(1) \quad RR(\%) = \frac{\text{Rendimento da cultura sem o fertilizante testado}}{\text{Rendimento máximo da cultura para a dose do fertilizante testado}} \times 100$$

Tabela 16. Instituição condutora dos experimentos no RS, ano de condução, equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação e rendimento relativo de soja cultivada sob sistema plantio direto com doses de K<sub>2</sub>O.

Instituição	Ano	Equação de regressão polinomial	r <sup>2</sup>	Rendimento Relativo <sup>(1)</sup> --- % ---
COTRIJUI (Ajuricaba)	2001	Y = 3821 - 0,49K	0,98	100
COTRIJUI (C.Bicaco)	2001	Y = 2761 + 0,38K	0,23	93
COTRIJUI (Redentora)	2001	Y = 2144 + 0,37K	0,11	91
COTRIJUI (S. Augusto)	2001	Y = 1834 + 0,68K	0,97	82
COTRIBÁ (Ibirubá)	2001	Y = 3464 - 0,03K	0,11	100
COTRIJUI (S. Valério)	2001	Y = 2987 + 1,23K	0,99	87
COTRIJUI (S. Valério)	2001	Y = 2731 - 2,46K	0,82	100
COTRISOL-FUNDACEP	1999	Y = 3662 + 10,39K - 0,090K <sup>2</sup>	0,98	92
COTRISOL-FUNDACEP	2000	Y = 2585 + 7,08K - 0,020K <sup>2</sup>	0,99	83
COTRISOL-FUNDACEP	2001	Y = 1403 + 7,08K - 0,020K <sup>2</sup>	0,96	73
COTRIJAL-FUNDACEP	1999	Y = 1932 + 11,13K - 0,050K <sup>2</sup>	0,94	82
COTRIJAL-FUNDACEP	2000	Y = 2886 + 6,30K	0,75	82
COTRIJAL-FUNDACEP	2001	Y = 1837 + 7,61K - 0,040K <sup>2</sup>	0,89	84
COTREL-FUNDACEP	1999	Y = 1882 + 7,00K - 0,060K <sup>2</sup>	0,79	90
COPALMA-FUNDACEP	1999	Y = 322 + 1,94K - 0,002K <sup>2</sup>	0,99	61
UFSM (S. Fransisco)	1995	Y = 2606 + 3,86K - 0,010K <sup>2</sup>	0,60	88
UFSM (S. Fransisco)	1996	Y = 2837 + 6,28K - 0,020K <sup>2</sup>	0,61	85
UFSM (S. Fransisco)	1997	Y = 2303 + 5,31K - 0,010K <sup>2</sup>	0,60	82
UFSM (S. Fransisco)	1998	Y = 1186 + 2,69K - 0,008K <sup>2</sup>	0,87	83
COTRIJU-FUNDACEP	2001	Y = 2335 + 7,00K - 0,004K <sup>2</sup>	0,99	82
COTRIPAL-FUNDACEP	2001	Y = 1526 + 7,89K - 0,006K <sup>2</sup>	0,91	67
COTRISA-FUNDACEP	1995	Y = 2372 + 2,96K - 0,008K <sup>2</sup>	0,47	90
COTRISA-FUNDACEP	1996	Y = 2108 + 3,34K - 0,004K <sup>2</sup>	0,27	84
COTRISA-FUNDACEP	1999	Y = 1586 + 4,47K - 0,010K <sup>2</sup>	0,44	82
COTRISA-FUNDACEP	2000	Y = 1887 + 2,35K - 0,005K <sup>2</sup>	0,05	91
FUNDACEP	1994	Y = 2784 + 6,31K - 0,010K <sup>2</sup>	0,42	84
FUNDACEP	1997	Y = 3348 - 2,08K	0,07	100
FUNDACEP	2000	Y = 2536 + 12,40K - 0,080K <sup>2</sup>	0,39	84
<b>Média</b>		<b>Y = 2345 + 4,32K - 0,020K<sup>2</sup></b>	<b>0,75</b>	<b>75</b>

(1)  $RR(\%) = \frac{\text{Rendimento da cultura sem o fertilizante testado}}{\text{Rendimento máximo da cultura para a dose do fertilizante testado}} \times 100$

Tabela 17. Instituição condutora dos experimentos no RS, ano de condução, equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação e rendimento relativo de trigo cultivado sob sistema plantio direto com doses de K<sub>2</sub>O.

Instituição	Ano	Equação de regressão polinomial	r <sup>2</sup>	Rendimento Relativo <sup>(1)</sup> --- % ---
COTRISOL-FUNDACEP	2000	Y = 2591 + 57,10K - 0,815K <sup>2</sup>	0,99	80
COTRIPAL-FUNDACEP	2000	Y = 1176 + 25,73K - 0,340K <sup>2</sup>	0,96	71
COTREL-FUNDACEP	2000	Y = 1632 + 10,16K - 0,040K <sup>2</sup>	0,66	74
COTRISA-FUNDACEP	1996	Y = 2723 + 2,70K - 0,010K <sup>2</sup>	0,02	96
COTRISA-FUNDACEP	1999	Y = 1809 + 3,27K - 0,008K <sup>2</sup>	0,39	87
FUNDACEP	1997	Y = 2206 + 5,15K - 0,030K <sup>2</sup>	0,15	91
FUNDACEP	1999	Y = 2860 + 4,96K - 0,060K <sup>2</sup>	0,23	97
<b>Média</b>		<b>Y = 2142 + 15,58K - 0,168K<sup>2</sup></b>	<b>0,49</b>	<b>85</b>

$$(1) \quad RR(\%) = \frac{\text{Rendimento da cultura sem o fertilizante testado}}{\text{Rendimento máximo da cultura para a dose do fertilizante testado}} \times 100$$

Tabela 18. Instituição condutora dos experimentos no RS, ano de condução, equação de regressão polinomial, coeficiente de determinação e rendimento relativo de milho cultivado sob sistema plantio direto com doses de K<sub>2</sub>O.

Instituição	Ano	Equação de regressão polinomial	r <sup>2</sup>	Rendimento Relativo <sup>(1)</sup> --- % ---
UFRGS	2000	Y = 9212 + 2,85K - 0,020K <sup>2</sup>	0,01	90
COTRISOL-FUNDACEP	1999	Y = 2582 + 63,32K - 0,250K <sup>2</sup>	0,79	61
COTRISOL-FUNDACEP	2000	Y = 4215 + 27,79K - 0,020K <sup>2</sup>	0,99	87
COTRISOL-FUNDACEP	2001	Y = 3576 + 23,27K - 0,120K <sup>2</sup>	0,83	77
COTRIJAL-FUNDACEP	1999	Y = 3403 + 100,49K - 2,910K <sup>2</sup>	0,99	80
COTRIJAL-FUNDACEP	2000	Y = 3958 + 13,84K	0,63	76
COTRIJAL-FUNDACEP	2001	Y = 2860 + 13,39K	0,88	63
COTREL-FUNDACEP	1999	Y = 7010 + 204,85K - 4,170K <sup>2</sup>	0,94	74
COPALMA-FUNDACEP	1999	Y = 1197 + 10,56K - 0,030K <sup>2</sup>	0,80	59
UFSC (S. Francisco)	1999	Y = 3629 + 19,91K - 0,040K <sup>2</sup>	0,97	61
COTRIJUI-FUNDACEP	2001	Y = 3767 + 15,54K - 0,100K <sup>2</sup>	0,83	83
COTRIPAL-FUNDACEP	2001	Y = 3903 + 20,00K - 0,080K <sup>2</sup>	0,99	69
COTRISA-FUNDACEP	1994	Y = 7801 + 6,93K - 0,020K <sup>2</sup>	0,06	94
<b>Média</b>		<b>Y = 4393 + 40,21K - 0,0705K<sup>2</sup></b>	<b>0,75</b>	<b>75</b>

$$(1) \quad RR(\%) = \frac{\text{Rendimento da cultura sem o fertilizante testado}}{\text{Rendimento máximo da cultura para a dose do fertilizante testado}} \times 100$$

decréscimo de produção em relação ao aumento da dose de fertilizante em estudo (nos experimentos da FUNDACEP, da COTRISA, da COTRIBÁ e alguns da COTRIJUI), deveu-se aos altos teores originais do nutriente em estudo (Tabelas 9 e 10) e/ou à influência de outros fatores de produção (cultura, solo, clima ou manejo) - (Fitts, 1959).

Os rendimentos de grãos de soja, trigo e milho, obtidos nos experimentos em parcelas testemunha do fertilizante em estudo, são em média um pouco superiores aos rendimentos médios do RS nas últimas safras (1785, 1969 e 3142 kg ha<sup>-1</sup> para a soja, trigo e milho, respectivamente, IBGE, 2003). Isso indica que, em muitos casos, os solos utilizados para os experimentos são representativos do estado de fertilidade dos solos no RS.

A soja foi a cultura que menos respondeu à aplicação de fertilizantes, e aumentou em média 7,20 e 4,32 kg de grãos para cada kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O adicionados ao solo, respectivamente. O trigo teve respostas intermediárias, e aumentou em média 12,37 e 15,58 kg de grãos para cada kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O adicionado ao solo, respectivamente. O milho teve o maior aumento, em média 47,10 e 40,21 kg de grãos para cada kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O adicionado ao solo, respectivamente (Tabelas 13-18).

A soja necessita mais P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O para a produção de 1 t<sup>-1</sup> de grãos do que necessitam as culturas de trigo e milho. Estes dados estão de acordo com Raij et al. (1997), que demonstrou que as plantas inteiras precisam de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> na quantidade de 36,6, 13,7 e 11,4 kg t<sup>-1</sup> de grãos da soja, trigo e milho, respectivamente, e de K<sub>2</sub>O na quantidade de 137,3, 27,7 e 21,7 kg t<sup>-1</sup> de grãos de soja, trigo e milho, respectivamente. A quantidade exportada de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O pelos grãos também é maior para cultura da soja, se comparada às quantidades para o trigo e para o milho (Raij, et al., 1997; Wiethölter et al., 1998).

A eficiência agronômica dos fertilizantes é, portanto, maior para o milho e menor para cultura da soja. No entanto ao se implantar uma lavoura, considera-se o aspecto econômico e neste caso a cultura da soja é mais eficiente, devido ao valor de mercado do grão produzido, ao baixo custo de implantação e condução da lavoura e ao menor risco de frustração de safra, se comparada às culturas do trigo e do milho (FECOAGRO/RS, 2002).

Os coeficientes de determinação entre o rendimento e doses crescentes do nutriente em estudo foram altos para a maioria dos resultados, mostrando a eficiência dos fertilizantes (Tabelas 13-18). Embora os rendimentos sejam provenientes de médias dos tratamentos (repetições ou parcelões), observa-se que na maioria dos casos os coeficientes foram maiores do que 0,80.

Os incrementos no rendimento relativo de milho com adubação fosfatada foram em média menores do que os de trigo e soja. Normalmente a resposta da primeira cultura à adição de fertilizantes é maior do que as subseqüentes, especialmente em solos de menor fertilidade e/ou quando as doses de fertilizantes aplicadas são menores.

Ao se estabelecer o teor crítico de fósforo para cada cultura, aquelas com menor rendimento relativo necessitariam de mais fósforo para atingir 90% do rendimento relativo máximo, ou seja, o teor crítico seria maior. Pelos dados obtidos, o milho teria o maior teor crítico seguido do trigo e da soja. Um teor crítico de fósforo maior para a cultura do trigo em relação à soja também foi obtido por Kochhann et al. (1982), Olson et al. (1984) e Lentmann et al. (1996). Entretanto, o teor crítico maior para a cultura do milho, em relação à do trigo obtido neste trabalho, difere dos resultados apresentados por Kochhann et al. (1982) e por Olson et al. (1984).

### **5.3.2. Calibração de fósforo e potássio determinados pelos métodos Mehlich-1, Mehlich-3 e resina de troca iônica em solos sob sistema plantio direto de cultivo**

A calibração ou a relação dos valores de fósforo e potássio dos experimentos determinados pelos métodos Mehlich-1, Mehlich-3 e resina de troca iônica, em amostras de solo dos tratamentos sem o fertilizante testado, com os rendimentos relativos das culturas soja, trigo e milho sob sistema plantio direto foi obtida pelas equações de regressão que melhor se ajustaram à maioria dos dados (Figuras 10 a 21).

A calibração pode ser dividida basicamente em duas etapas, que são, segundo Evans (1987), Fixen & Grove (1990) e Sims (1999), a identificação de um teor crítico do nutriente acima do qual a probabilidade de resposta é pequena ou nula e, em havendo deficiência, a estimativa da

quantidade deste nutriente necessária para se obter o rendimento esperado (esta segunda etapa será apresentada no item 5.3.3).

O teor crítico é um estado de fertilidade do solo em que acima deste, a probabilidade de resposta à aplicação do fertilizante é baixa, e abaixo do teor crítico, a probabilidade de resposta aumenta na proporção inversa da diminuição do teor crítico. Assim, poder-se-ia estabelecer o teor crítico pelo gráfico de regressão no ponto de inflexão da curva, onde a probabilidade de resposta diminui acentuadamente à medida que aumenta o teor no solo do nutriente em estudo, ou estabelecer um percentual do rendimento relativo. Ainda, poderia ser utilizado o método Cate & Nelson (Cate & Nelson, 1971) pela forma gráfica ou matemática.

O ponto de inflexão da curva depende do modelo matemático utilizado. A função escolhida neste trabalho foi a que melhor ajustou os dados (pelo maior coeficiente de determinação). No entanto, o ponto de inflexão para a maioria dos casos ficou entre 60 e 80% do rendimento relativo máximo (Figuras 10-21), muito abaixo do rendimento relativo selecionado como o ponto de máxima eficiência econômica que corresponde a um valor de nutriente próximo ao teor crítico (Mielniczuk et al., 1969 a, b; Universidade..., 1973; Tabelas..., 1976; Manual..., 1981; Anghinoni & Volkweiss, 1984; Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995; Raij et al., 1997).

Goepfert et al. (1974a) utilizaram o ponto de inflexão da curva de regressão e encontraram o teor crítico de  $12 \text{ mg kg}^{-1}$  de fósforo em um argissolo do RS, para um rendimento em torno de 90% do rendimento máximo, valor de teor crítico muito menor do que o estabelecido ( $30 \text{ mg kg}^{-1}$ ) por Universidade... (1973). Vidor & Freire (1974) encontraram teor crítico de fósforo entre 20-25 e 8-10  $\text{mg kg}^{-1}$  para um solo franco argiloso e um argiloso do RS, respectivamente, concordando com os teores críticos estabelecidos por Universidade... (1973). Neste caso o rendimento foi aproximadamente 95% do rendimento máximo.

Goepfert et al. (1974b) utilizaram o modelo gráfico de Cate & Nelson e obtiveram um teor crítico ao redor de 85% do rendimento máximo, com um teor de  $12 \text{ mg kg}^{-1}$  de fósforo, para um solo franco do RS, abaixo do teor crítico ( $18 \text{ mg kg}^{-1}$ ) definido por Universidade... (1973).

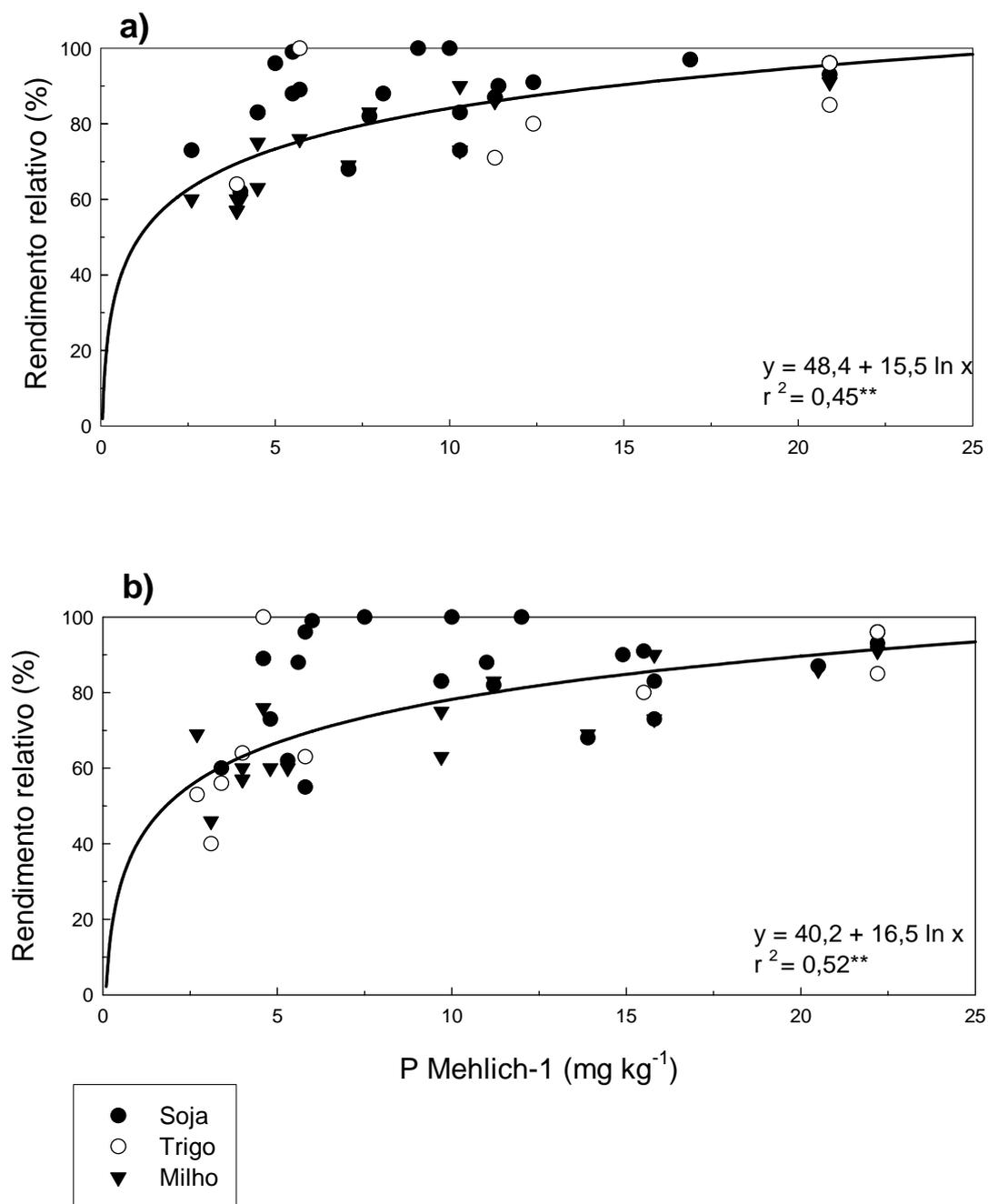


Figura 10. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem P / rendimento máximo com adição de P] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo em função do teor original de fósforo Mehlich-1, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de a) 0-20cm, b) 0-10 cm. \*\* Significativo ( $P < 0,01$ ).

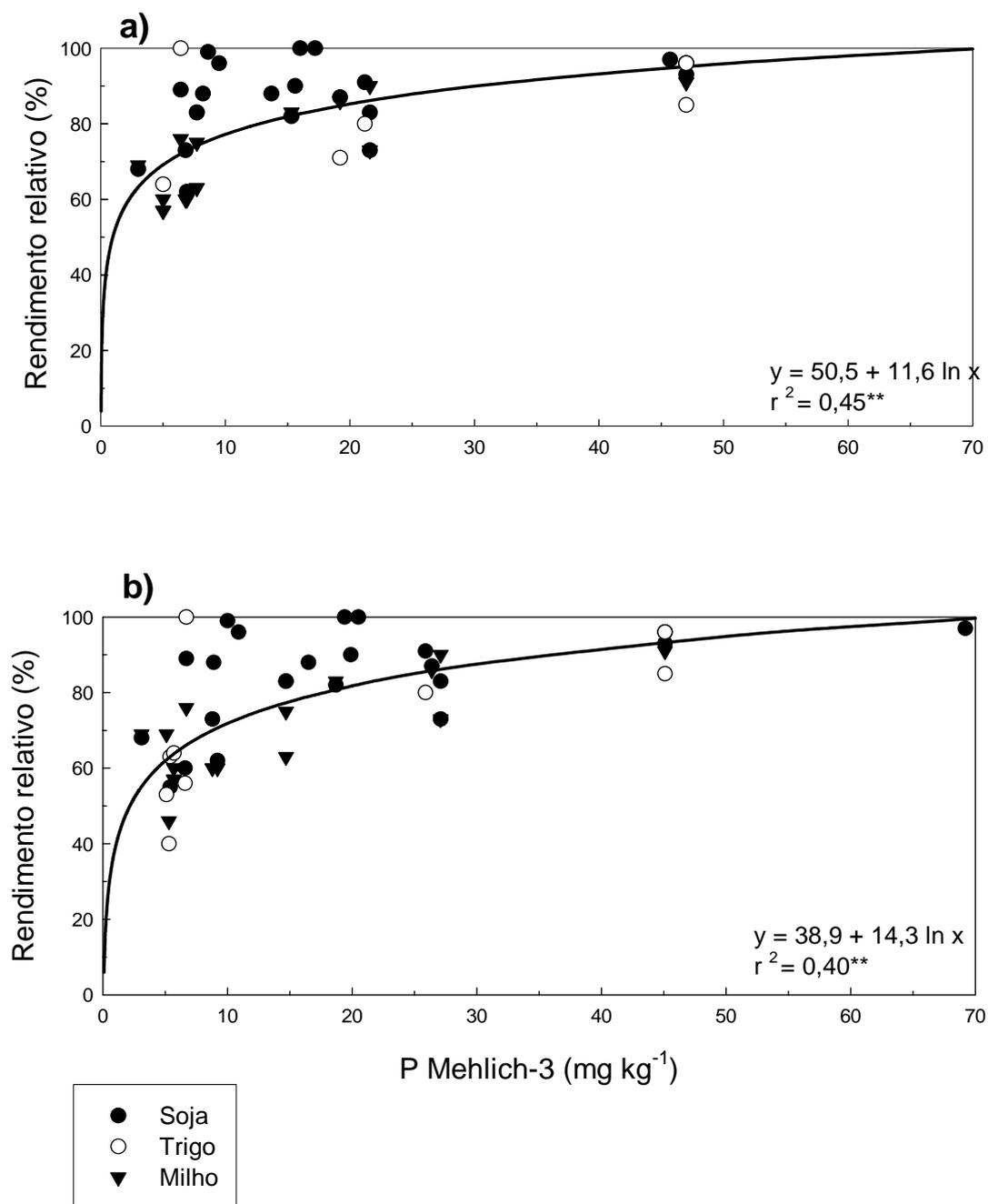


Figura 11. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem P / rendimento máximo com adição de P] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo em função do teor original de fósforo Mehlich-3, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de a) 0-20cm, b) 0-10 cm. \*\* Significativo ( $P < 0,01$ ).

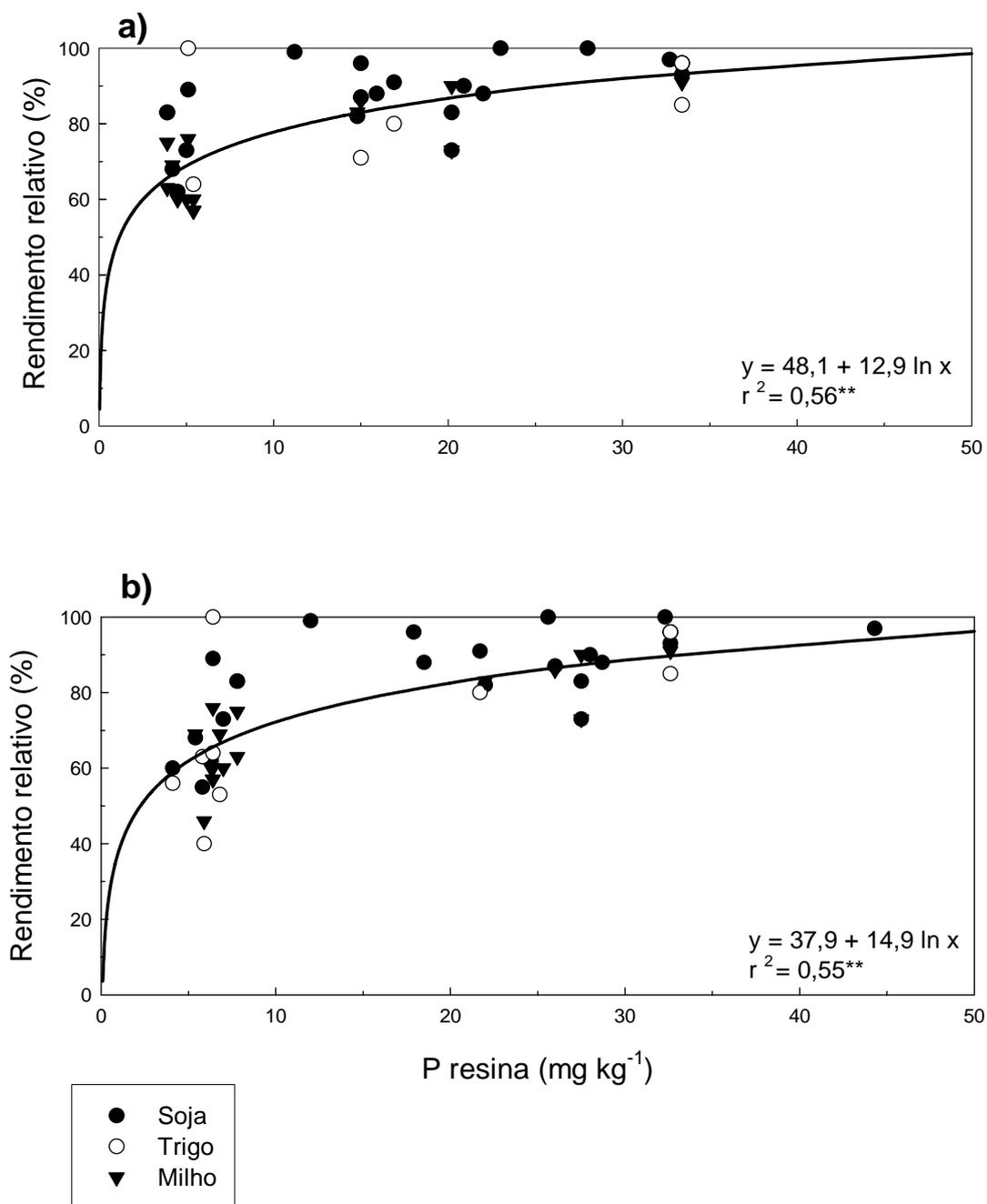


Figura 12. Rendimento relativo ( $RR = [\text{rendimento de grãos sem P} / \text{rendimento máximo com adição de P}] \times 100$ ) de soja, trigo e milho cultivados no sistema plantio direto em função do teor original de fósforo resina, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de a) 0-20cm, b) 0-10 cm. **\*\*** Significativo ( $P < 0,01$ ).

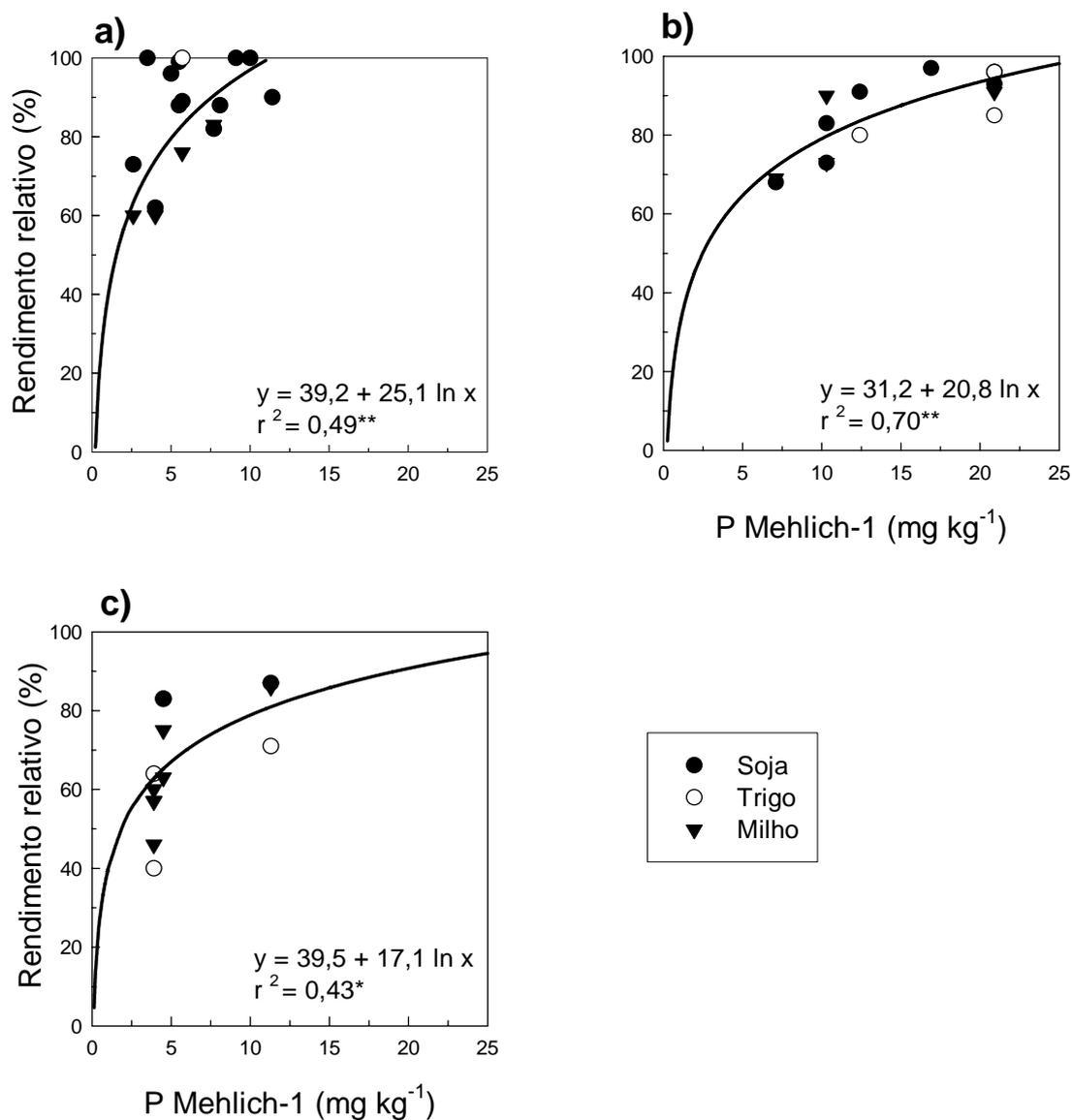


Figura 13. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem P / rendimento máximo com adição de P] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo em função do teor original de fósforo Mehlich-1, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de 0-20cm, a) classe textural 1, b) classe textural 2, c) classe textural 3. \*\* Significativo (P < 0,01), \* Significativo (P < 0,05).

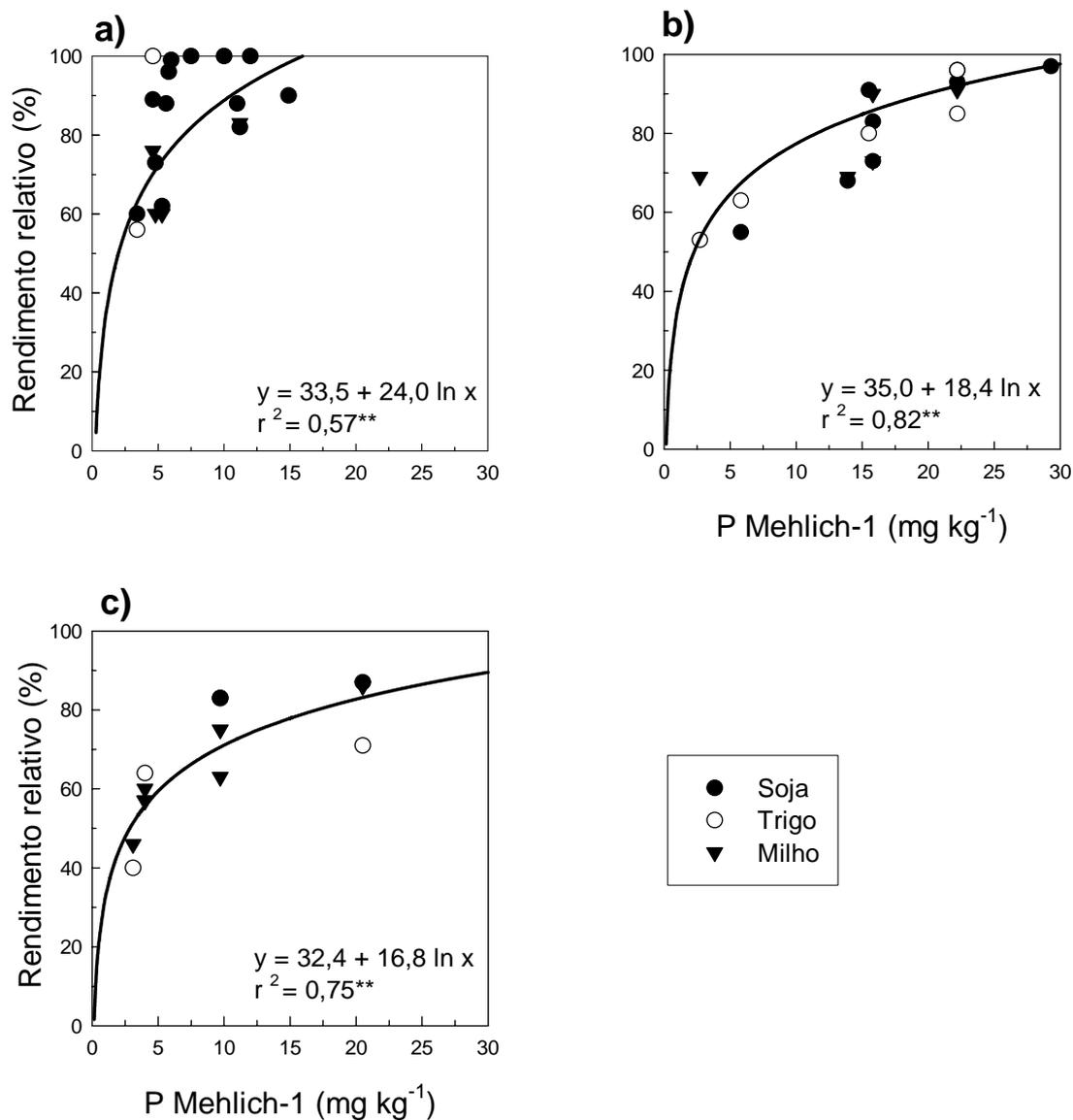


Figura 14. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem P / rendimento máximo com adição de P] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo em função do teor original de fósforo Mehlich-1, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de 0-10cm, a) classe textural 1, b) classe textural 2, c) classe textural 3. \*\* Significativo ( $P < 0,01$ ).

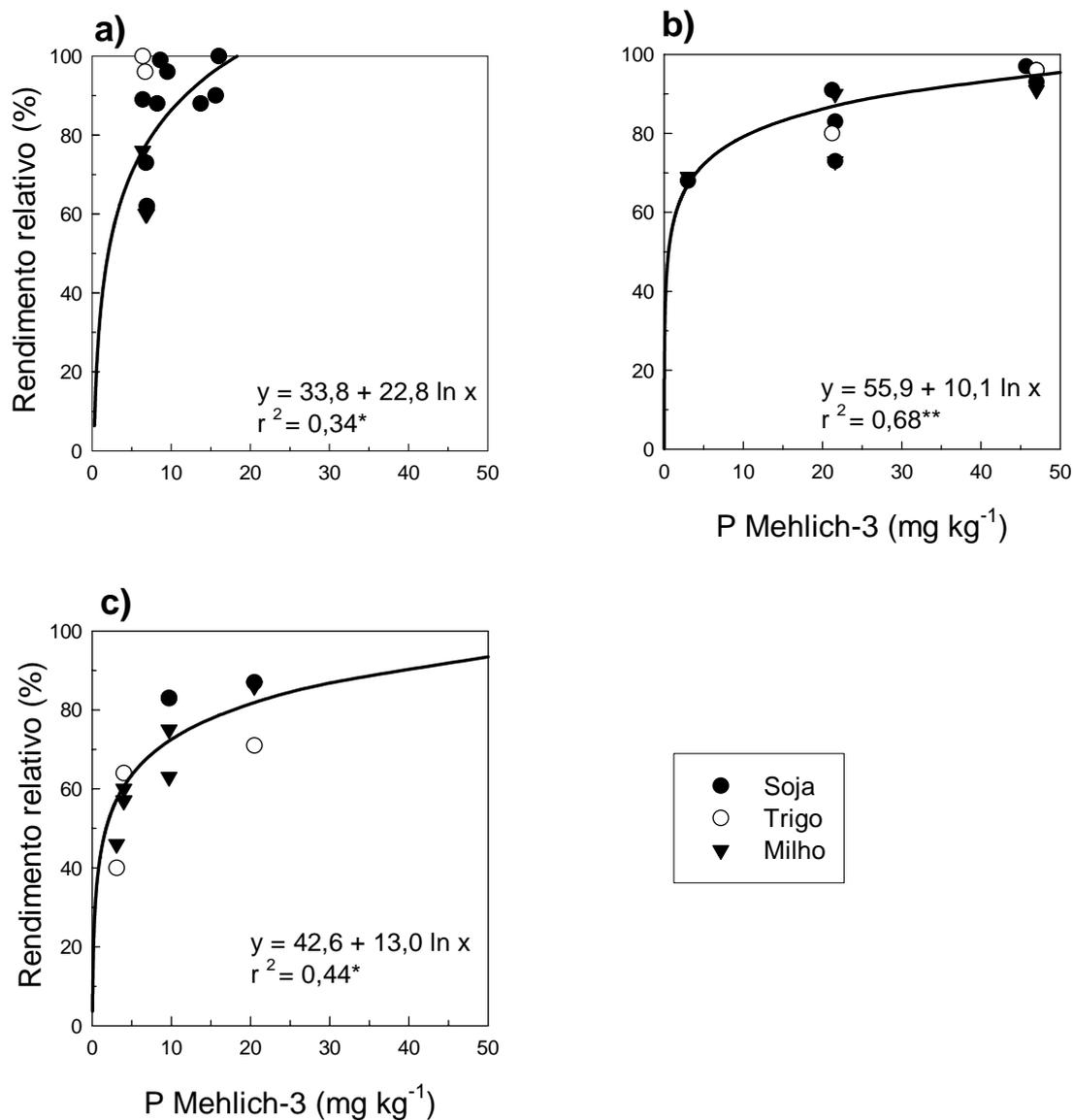


Figura 15. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem P / rendimento máximo com adição de P] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em função do teor original de fósforo Mehlich-3, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de 0-20cm, a) classe textural 1, b) classe textural 2, c) classe textural 3. \*\* Significativo (P < 0,01). \* Significativo (P < 0,05).

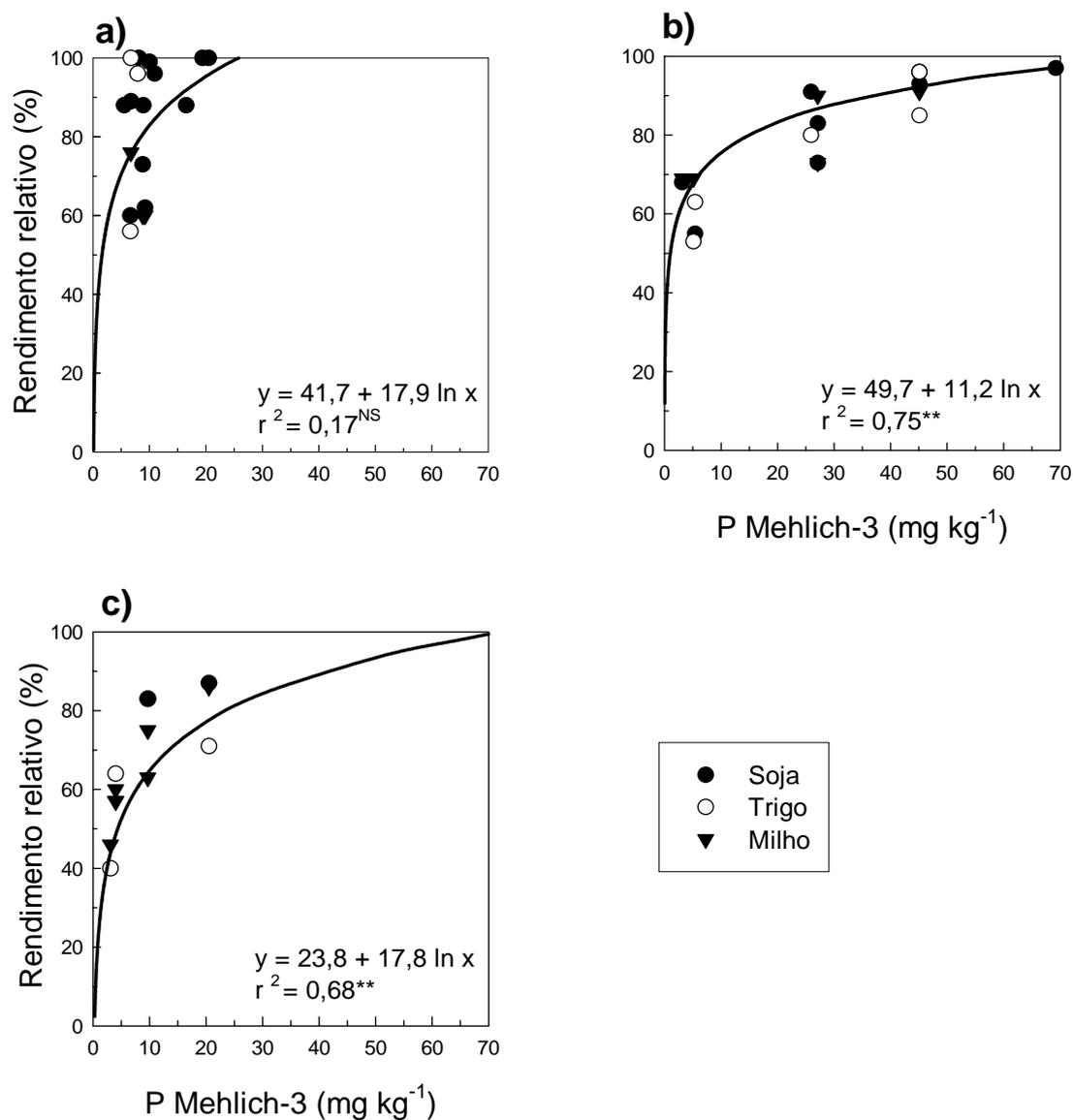


Figura 16. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem P / rendimento máximo com adição de P] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em função do teor original de fósforo Mehlich-3, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de 0-10cm, a) classe textural 1, b) classe textural 2, c) classe textural 3. \*\* Significativo ( $P < 0,01$ ). <sup>NS</sup> Não significativo ( $P > 0,05$ ).

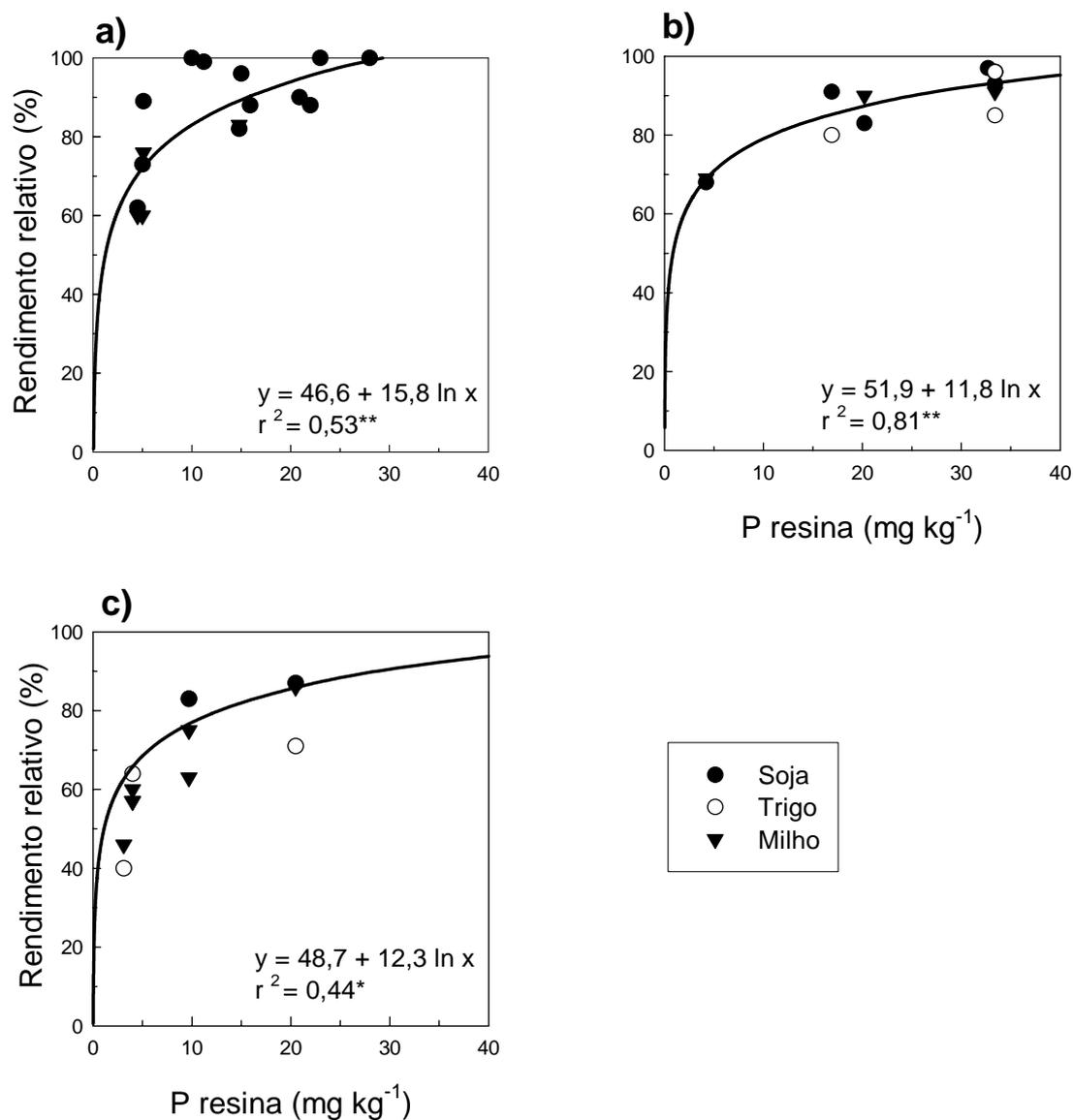


Figura 17. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem P / rendimento máximo com adição de P] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em função do teor original de fósforo resina, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de 0-20cm, a) classe textural 1, b) classe textural 2, c) classe textural 3. \*\* Significativo (P < 0,01). \* Significativo (P < 0,05).

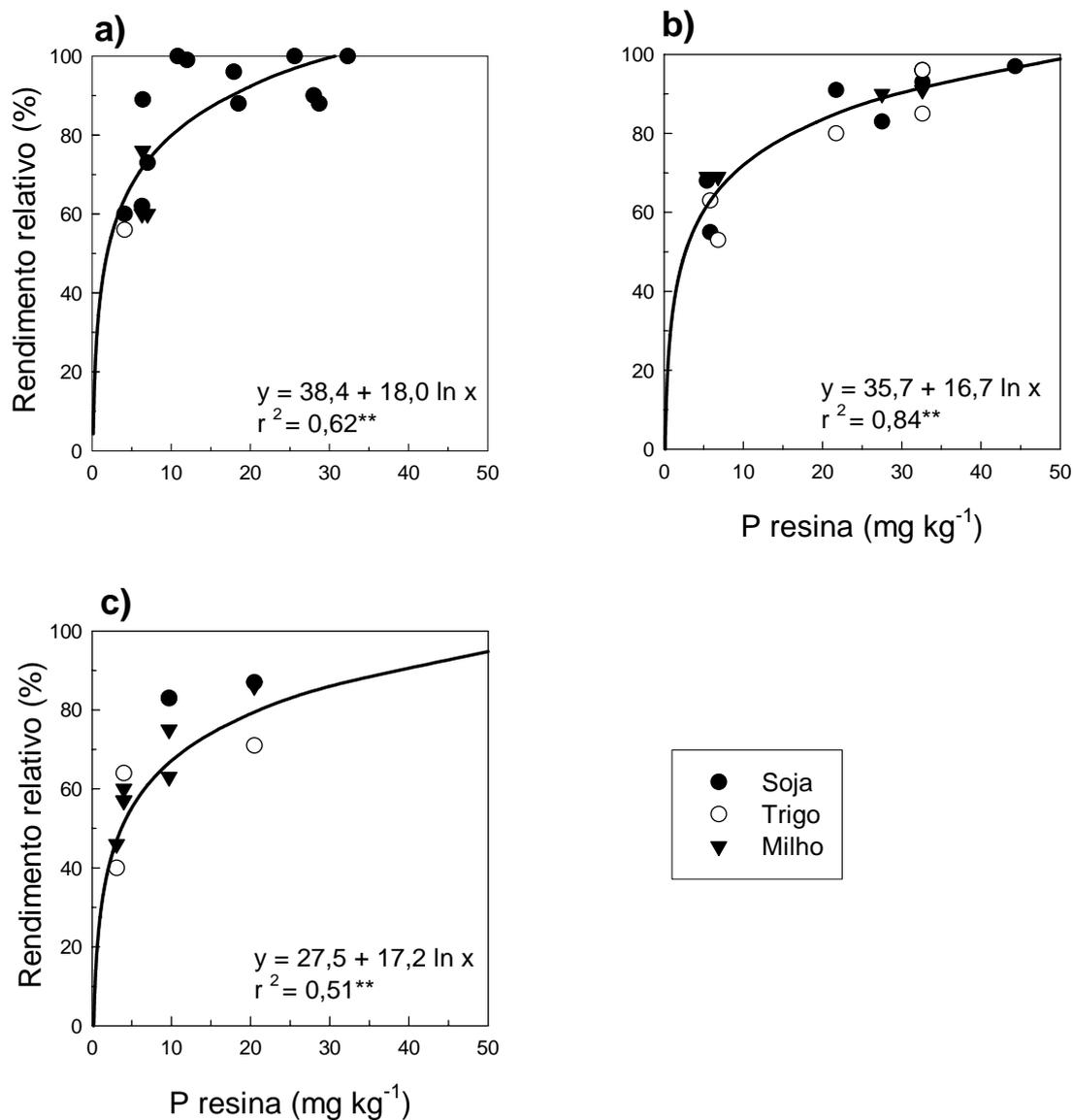


Figura 18. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem P / rendimento máximo com adição de P] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em função do teor original de fósforo resina, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de 0-10cm, a) classe textural 1, b) classe textural 2, c) classe textural 3. \*\* Significativo ( $P < 0,01$ ).

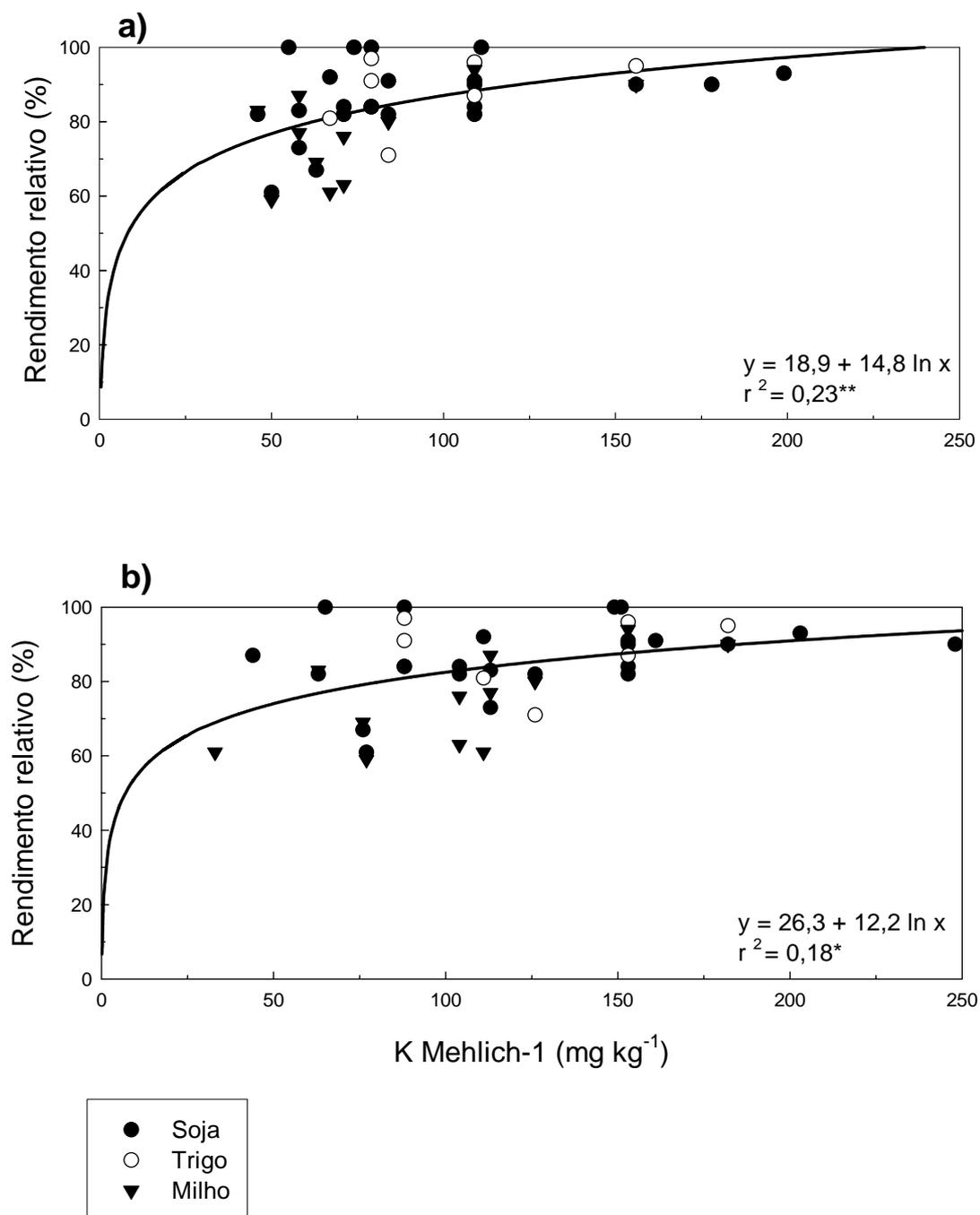


Figura 19. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem K / rendimento máximo com adição de K] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em função do teor original de potássio Mehlich-1, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de a) 0-20cm, b) 0-10 cm. \*\* Significativo ( $P < 0,01$ ), \* Significativo ( $P < 0,05$ ).

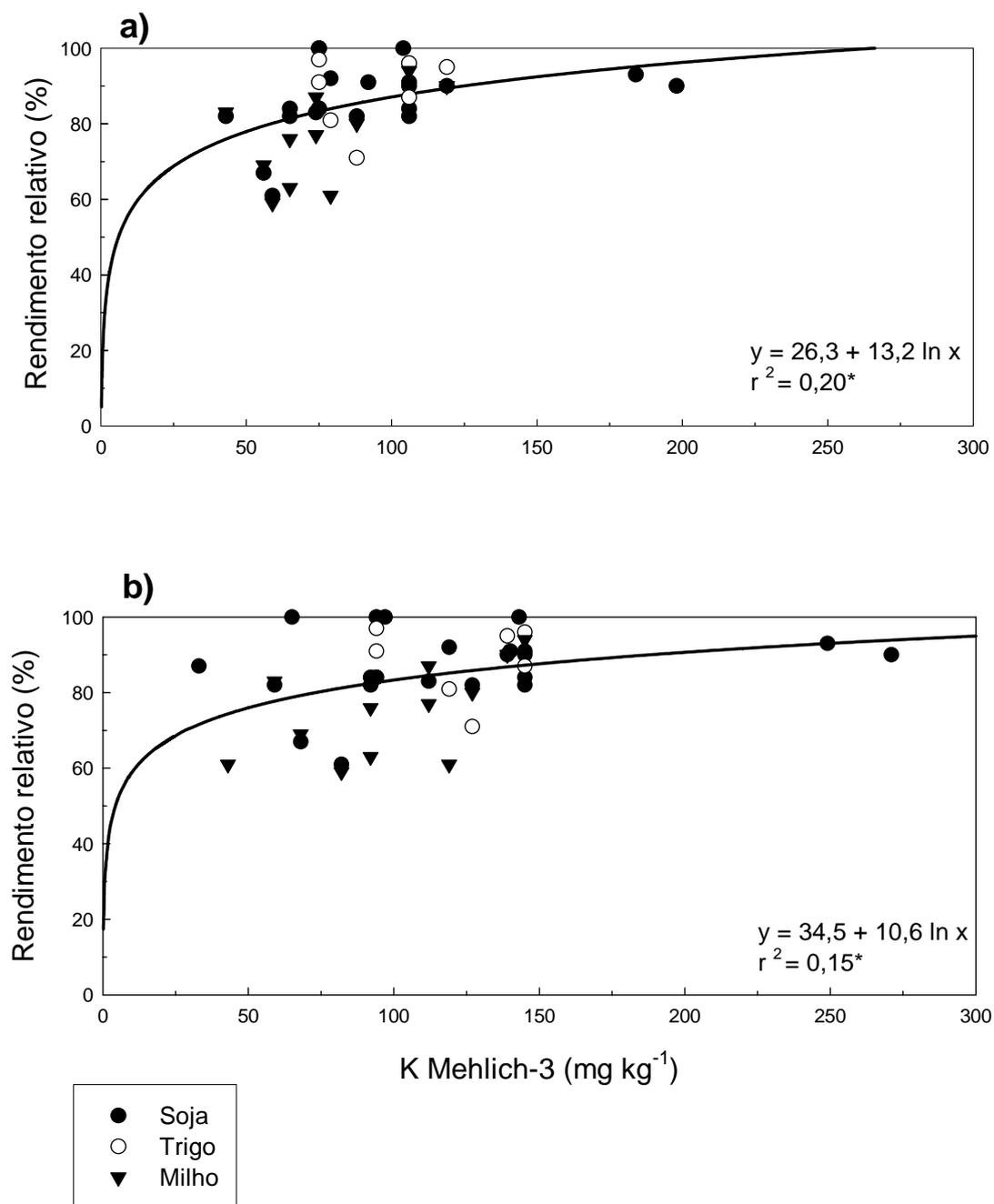


Figura 20. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem K / rendimento máximo com adição de K] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em função do teor original de potássio Mehlich-3, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de a) 0-20cm, b) 0-10 cm. \* Significativo ( $P < 0,05$ ).

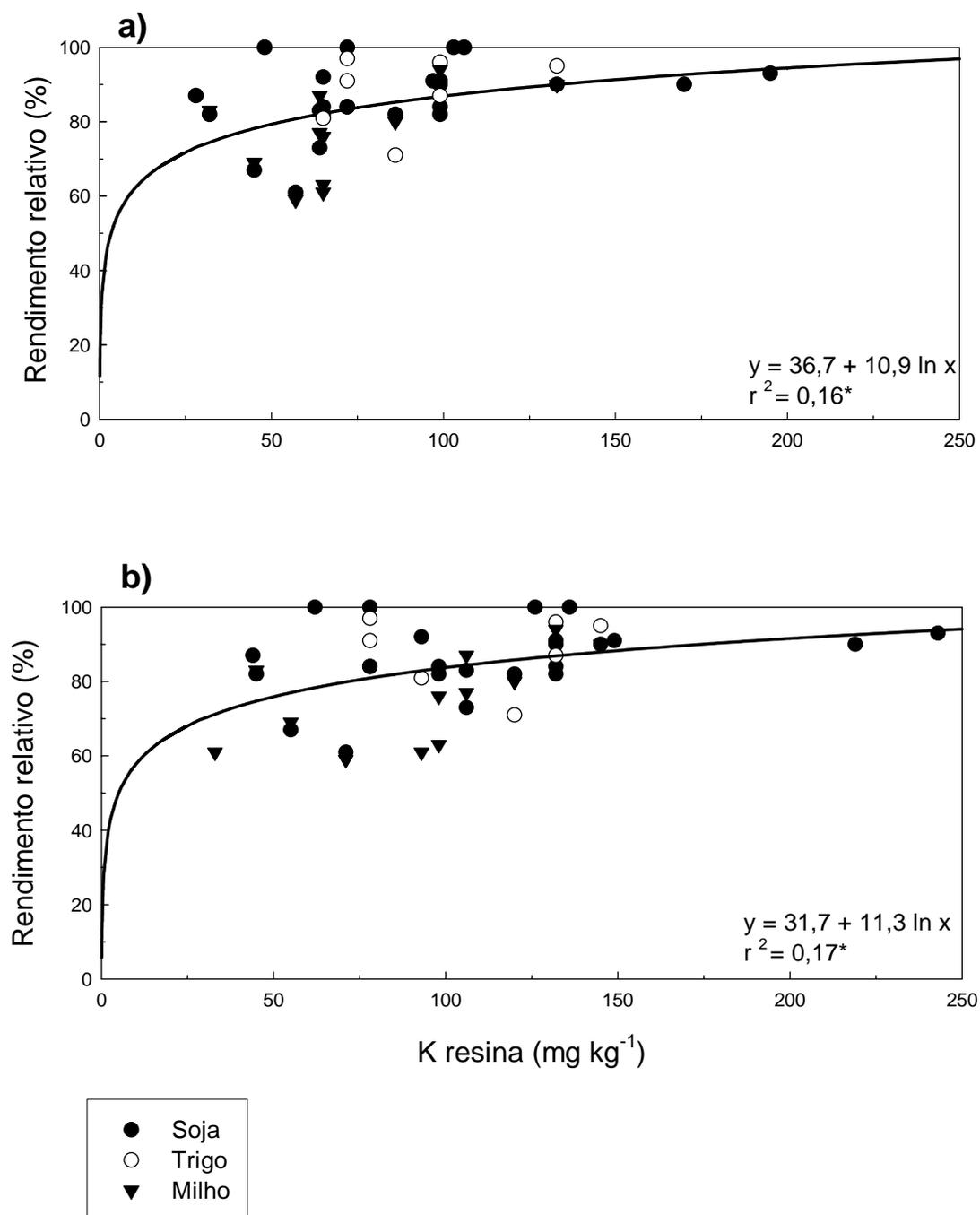


Figura 21. Rendimento relativo (RR= [rendimento de grãos sem K / rendimento máximo com adição de K] x 100) de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em função do teor original de potássio resina, de vários solos do RS, amostrados na profundidade de a) 0-20cm, b) 0-10 cm. \*\* Significativo ( $P < 0,01$ ), \* Significativo ( $P < 0,05$ ).

### 5.3.2.1. Teor crítico de fósforo

Na estimativa do teor crítico, o critério considerado é a resposta máxima da cultura à aplicação do nutriente, e o valor numérico é subjetivo, pois pode mudar com uso de funções alternativas. O valor do teor crítico utilizado nas tabelas de recomendação pode ser definido pelo cálculo econômico, determinando-se o ponto de máxima da função lucro, ou arbitrariamente, escolhendo-se um valor de rendimento relativo. Neste trabalho foi considerado como ponto de maior retorno econômico, aproximadamente 90% de rendimento relativo ou 90% da máxima eficiência técnica. O teor crítico foi estimado pelo cálculo do valor de X no valor de 90% de Y para a função estabelecida (Mielniczuk et al., 1969 a, b; Universidade..., 1973; Tabelas..., 1976; Manual..., 1981; Anghinoni & Volkweiss, 1984; Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995; Raj et al., 1997). Os resultados assim obtidos para fósforo e potássio nos solos amostrados na camada 0-20 e 0-10 cm de profundidade estão nas Tabelas 19 e 20. As equações de regressão que deram origem aos mesmos estão representadas nas Figuras 10-21.

O teor crítico de fósforo obtido para o método Mehlich-1, para todos os solos na profundidade de 0-20 cm foi  $14,6 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo (Figura 10a, Tabela 19), valor semelhante à média ( $14,2 \text{ mg kg}^{-1}$ ) dos teores críticos de fósforo das cinco classes de argila estabelecidos pela Comissão... (1995). Por outro lado, o teor crítico de  $25,7 \text{ mg kg}^{-1}$  (Figura 12a, Tabela 19) obtido para método da resina de troca iônica, para todos os solos independentemente do fator argila, é superior ao teor crítico de  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  estabelecido em 2001 pela Comissão ... (2003), e muito menor do que o teor de  $40 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo utilizado no Estado de SP para o mesmo método (Raj et al., 1997).

O teor de argila do solo, devido a sua influência na extração do fósforo disponível às plantas pelo método Mehlich-1, é um fator considerado na elaboração das tabelas de recomendação de adubação para os estados do RS e SC (Mielniczuk et al., 1969 a, b; Universidade..., 1973; Tabelas..., 1976; Manual..., 1981; Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995). Neste trabalho os solos foram agrupados por classes texturais 1, 2 e 3+4, com teores de argila  $>550$ ,  $550-410$  e  $400-110 \text{ g kg}^{-1}$  respectivamente, tal como determinado pela Comissão... (1995). Optou-se por agrupar as classes 3 e 4 em apenas uma classe. Os teores críticos de fósforo obtidos para o método Mehlich-1, na

Tabela 19. Teor crítico de fósforo<sup>(1)</sup> estimado por alguns métodos de extração em profundidades de amostragem de solo nos experimentos cultivados com soja, trigo e milho sob sistema plantio direto, em alguns solos do RS com diferentes classes de argila.

Classe <sup>(2)</sup>	Métodos de análise de solo					
	Mehlich-1		Mehlich-3		Resina	
	0-20 cm	0-10 cm	0-20 cm	0-10 cm	0-20 cm	0-10 cm
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----					
1	7,6	10,5	11,8	14,9	15,6	17,6
2	16,8	19,9	29,3	36,5	25,2	25,8
3+4	19,2	30,8	38,3	41,2	28,7	37,8
Todas	16,6	20,5	30,1	35,6	25,7	33,0

<sup>(1)</sup> Teor crítico calculado a partir das equações de regressão entre rendimento relativo e teores originais do solo (Figuras 10-18). <sup>(2)</sup> Classe 1, argila >550 g kg<sup>-1</sup> de solo; Classe 2, argila de 410-550 g kg<sup>-1</sup> de solo, classe 3, argila de 260-400 g kg<sup>-1</sup> de solo e classe 4, argila de 110-250 g kg<sup>-1</sup>.

Tabela 20. Teor crítico de potássio<sup>(1)</sup> estimado por alguns métodos de extração em duas profundidades de amostragem de solo nos experimentos cultivados com soja, trigo e milho sob sistema plantio direto em alguns solos do RS.

Solos <sup>(2)</sup>	Métodos de análise de solo					
	Mehlich-1		Mehlich-3		Resina	
	0-20 cm	0-10 cm	0-20 cm	0-10 cm	0-20 cm	0-10 cm
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----					
Todos	122	185	125	188	133	174

<sup>(1)</sup> Teor crítico calculado a partir das equações de regressão entre rendimento relativo e teores originais do solo (Figuras 19-21). <sup>(2)</sup> Classe 1, argila >550 g kg<sup>-1</sup> de solo; Classe 2, argila de 410-550 g kg<sup>-1</sup> de solo, classe 3, argila de 260-400 g kg<sup>-1</sup> de solo e classe 4, argila de 110-250 g kg<sup>-1</sup>.

profundidade de 0-20 cm, foram 7,6, 16,8 e 19,2 mg kg<sup>-1</sup> (Figura 13, Tabela 19), contra 6, 9 e 14 mg kg<sup>-1</sup> estabelecidos pela Comissão... (1995). A diferença entre os teores para solos da classe de argila 1 é relativamente pequena (1,2 mg kg<sup>-1</sup>). A maior diferença ocorreu nos solos da classe 2.

Os resultados mostram que o teor crítico de fósforo no solo para o método Mehlich-1, para o rendimento de aproximadamente 90% do rendimento máximo das culturas cultivadas sob sistema plantio direto, é na média maior do que o teor crítico estabelecido pela Comissão... (1995), com base nas calibrações realizadas entre 1969 e 1980, sob sistema convencional de cultivo. Isto pode ser devido ao maior potencial de rendimento das culturas, ao melhoramento genético e/ou à seleção de cultivares visando a aumentos de produtividade. O rendimento médio das culturas tem aumentado ao longo dos anos nas lavouras no RS (Emater/RS, 1998; Emater/RS, 2003; IBGE, 2003), conseqüentemente pode ser necessário um teor crítico de nutrientes maior do que o estabelecido atualmente. Assim, a quantidade de fertilizante a aplicar para um rendimento de 90% do máximo também seria aumentada.

Se o teor crítico de fósforo na camada 0-20 cm de profundidade, para o método Mehlich-1, é maior em solos sob sistema plantio direto (Figuras 13, Tabela 19) do que sob sistema convencional de cultivo (Comissão..., 1995), na camada 0-10 cm de profundidade é, provavelmente, ainda maior devido à concentração de fósforo e potássio na superfície ou sub-superfície do solo (Eltz et al., 1989; Schlindwein & Anghinoni, 2000). Os resultados de Schlindwein & Anghinoni (2000) mostram uma concentração de fósforo aproximadamente 50% maior na camada 0-10 cm do que na 0-20 cm de profundidade, em experimentos de longa duração cultivados sob sistema plantio direto.

Os valores de teor crítico de fósforo dos solos da classe 2 estão mais próximos das classes 3+4 do que da classe 1, principalmente para os métodos Mehlich-3 e resina, mostrando o que na prática já se conhece: solos muito argilosos, com alto poder tampão, apresentam alta capacidade de suprimento de fósforo para as plantas. Por outro lado, o método da resina extrai menos fósforo em solos arenosos se comparado ao método Mehlich-1, provavelmente devido à diminuição da difusão em solos arenosos. Além disso, o método Mehlich-1 extrai mais de solos arenosos devido à menor readsorção

de fósforo e à menor perda de capacidade extrativa. (Kamprath & Watson, 1980). Estas relações foram discutidas no estudo-I.

Os teores críticos de fósforo obtidos para os métodos Mehlich-3 e resina foram sempre superiores aos obtidos para o método Mehlich-1, para os solos agrupados ou separados por classes texturais. (Figuras 10-18, Tabela 19). Essa característica é vantajosa, pois permite o estabelecimento de faixas de fertilidade mais amplas, resultando em maior precisão nos resultados e nas recomendações de fertilizantes.

Os coeficientes de determinação, embora significativos para todos os métodos, à exceção do método Mehlich-3 na profundidade de 0-10 cm, foram variáveis e mostram mais tendências na eficiência dos métodos em quantificar a disponibilidade de nutrientes para determinar o rendimento relativo das plantas do que uma definição de valores exatos, devido à grande variabilidade dos dados obtidos e ao pequeno número de experimentos (Figuras 10-21, Tabelas 21 e 22). O método da resina apresentou o maior coeficiente de determinação na calibração de fósforo (Tabela 21), confirmando os dados obtidos em estudos de casa-de-vegetação onde esse método foi equivalente ou superior aos demais (Rein, 1991; Salet et al., 1994; Miola et al., 1994; Miola, 1995; Braida et al., 1996; Silva, 1996; Kroth, 1998). Os maiores coeficientes de determinação para o potássio foram obtidos com o método Mehlich-1 (Tabela 21). Os valores de potássio no solo obtidos com esse método correlacionam-se, normalmente, com os valores de potássio trocável do solo, que por sua vez apresenta altos coeficientes de determinação, em regressão, com parâmetros de plantas (Oliveira, 1970; Mielniczuk & Selbach, 1978; Nachtigall & Vahl, 1991).

Quando os solos foram separados por classes de teores de argila, todos os coeficientes aumentaram, especialmente nas calibrações realizadas com os solos amostrados na camada 0-10 cm de profundidade (Tabela 22). Na camada 0-20 cm, o coeficiente de determinação obtido com o método da resina foi maior, em contraste à camada 0-10 cm em que o método Mehlich-1 apresentou maior coeficiente. Entretanto, na média geral, ambos os métodos se equivaleram e foram superiores ao método Mehlich-3.

Embora os coeficientes de determinação da regressão, entre o rendimento relativo e os teores de fósforo do solo, não tenham sido

apresentados nas calibrações feitas no RS e SC, observa-se pelos gráficos (Mielniczuk et al., 1969b; Kochhann et al., 1982; Mielniczuk, 1995) que, em alguns casos, ocorreu uma distribuição irregular dos pontos. O mesmo ocorreu neste trabalho (Figuras 10-21), onde o rendimento relativo variou de 50 a 90% em estados de fertilidade muito próximos. Essa variação pode ser atribuída aos efeitos dos fatores de produção (cultura, solo, clima e manejo) sobre o rendimento (Fitss, 1959), resultando em alguns casos em coeficientes de determinação muito baixos, embora significativos, como por exemplo, para o potássio (Figura 19-21).

### 5.3.2.2. Teor crítico de potássio

O teor crítico para o potássio praticamente não diferiu entre os métodos de análise de solo (Mehlich-1, Mehlich-3 e resina) nas amostras de ambas as camadas amostradas (Figura 19, 20, 21). Os teores críticos muito próximos entre os métodos estão associados à capacidade dos mesmos em extrair o potássio trocável que se correlaciona significativamente com parâmetros de plantas (Oliveira, 1970; Mielniczuk & Selbach, 1978; Nachtigall & Vahl, 1991). A diferença entre teores críticos obtidos neste trabalho e os obtidos em calibrações anteriores está na grandeza numérica. O valor obtido de  $125 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo é praticamente o dobro do valor  $60 \text{ mg kg}^{-1}$  obtido em calibrações anteriores e utilizado como teor crítico até 1986 (Mielniczuk et al., 1969 a, b; Universidade..., 1973; Tabelas..., 1976; Manual..., 1981) e maior do que  $80 \text{ mg kg}^{-1}$ , utilizado a partir das recomendações de Siqueira et al. (1987).

O teor crítico de potássio na camada 0-10 cm de profundidade foi em torno de 50% maior do que na camada 0-20 cm (Figura 19, 20, 21). Assim como o fósforo, o potássio também se acumula na superfície e subsuperfície do solo sob sistema plantio direto de cultivo (Eltz et al., 1989; Schlindwein & Anghinoni, 2000). No trabalho de Schlindwein & Anghinoni (2000) conduzido em experimentos de longa duração sob esse sistema, o aumento de potássio na camada de 0-10 cm em relação à de 0-20 cm de profundidade foi em torno de 30%.

Os coeficientes de determinação foram todos significativos para os três métodos de quantificação de potássio em ambas as profundidades de amostragem, independentemente da cultura ou do tipo de solo. Porém, na

Tabela 21. Coeficiente de determinação entre o fósforo e potássio, determinados por diferentes métodos de extração em amostras de solo retiradas das camadas 0-20 e 0-10 cm de profundidade, e o rendimento relativo das culturas soja, trigo e milho, sob sistema plantio direto de cultivo.

Método	Fósforo			Potássio		
	0-20 cm	0-10 cm	Média	0-20 cm	0-10 cm	Média
	----- $r^2$ -----					
Mehlich-1	0,45**	0,52**	0,49	0,23**	0,18*	0,21
Mehlich-3	0,45**	0,40**	0,43	0,20*	0,15*	0,18
Resina	0,56**	0,55**	0,56	0,16*	0,17*	0,17

\* Significativo (P < 0,05), \*\* Significativo (P < 0,01).

Tabela 22. Coeficiente de determinação entre o fósforo, determinado por diferentes métodos de extração em amostras de solo retiradas das camadas 0-20 e 0-10 cm de profundidade, e o rendimento relativo das culturas soja, trigo e milho, sob sistema plantio direto de cultivo.

Método	Classes textural <sup>(1)</sup> (0-20 cm)				Classes textural <sup>(1)</sup> (0-10 cm)				Média geral
	1	2	3+4	Média	1	2	3+4	Média	
	----- $r^2$ -----								
Mehlich-1	0,49**	0,70**	0,43*	0,54	0,57**	0,82**	0,75**	0,71	0,63
Mehlich-3	0,34*	0,68**	0,44*	0,49	0,17 <sup>NS</sup>	0,75**	0,68**	0,53	0,51
Resina	0,53**	0,81**	0,44*	0,59	0,62*	0,84**	0,51**	0,66	0,63

<sup>(1)</sup> Classe 1, argila >550 g kg<sup>-1</sup> de solo; Classe 2, argila de 410-550 g kg<sup>-1</sup> de solo, classe 3, argila de 260-400 g kg<sup>-1</sup> de solo e classe 4, argila de 110-250 g kg<sup>-1</sup>. \* Significativo (P < 0,05), \*\* Significativo (P < 0,01), <sup>NS</sup> Não significativo (P>0,05).

maioria dos casos, foram muito baixos e menores do que os coeficientes encontrados para a relação entre o fósforo e o rendimento relativo, tal como foi observado por Mielniczuk et al. (1969b). Isto pode ser devido à falta de experimentos com baixos teores originais de potássio para representar a curva de calibração em toda a sua extensão, à grande variação nas respostas das culturas à adição do mesmo, à ação de outros fatores de produção e ao alto consumo de potássio pelas plantas, sendo considerado, em muitos casos, como consumo de luxo.

### **5.3.2.3. Faixas de fertilidade**

Após a definição dos teor crítico, tanto de fósforo como de potássio, para os diferentes métodos de análise e profundidade de amostragem, pode-se detalhar melhor a porção da curva abaixo desse ponto, estabelecendo-se faixas de fertilidade. As faixas de fertilidade podem ser subdivididas a partir do rendimento relativo, como foi estabelecido nas Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo (Raij et al., 1997), ou em teores no solo em quantidades eqüidistantes, tal como estabelecido no RS (Mielniczuk et al., 1969 a, b; Universidade..., 1973; Tabelas..., 1976; Manual..., 1981; Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995). Neste trabalho optou-se por estabelecer faixas de fertilidade do solo com valores ajustados para números inteiros e/ou que facilitassem a divisão em faixas eqüidistantes, denominadas de muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto (Tabelas 23-32).

Ao ajustar as faixas de fertilidade do solo, determinaram-se novos teores críticos para facilitar as interpretações de fertilidade em faixas de teores e para estabelecer as doses de fertilizantes com o objetivo de máxima eficiência econômica e aumento gradativo da fertilidade do solo. Assim, o valor superior de fósforo ou potássio da faixa de teor médio, representa o teor crítico ajustado (Tabelas 23-32).

### **5.3.3. Doses de fertilizantes**

O cálculo das doses de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  para as culturas foi feito com base nos dados experimentais utilizando-se funções de produção (Tabelas 13-18). Considerou-se o rendimento correspondente a 90% do rendimento de máxima eficiência técnica para cada cultura em cada experimento como

Tabela 23. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado por diferentes métodos, em amostras de solo da camada de 0-20 cm de profundidade de experimentos localizados no RS.

Método	Faixas de fertilidade				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----				
Mehlich-1	0-5	5-10	10-15	15-20	>20
Mehlich-3	0-10	10-20	20-30	30-40	>40
Resina	0-9	9-18	18-27	27-36	>36

Tabela 24. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado por diferentes métodos, em amostras de solo da camada de 0-10 cm de profundidade de experimentos localizados no RS.

Método	Faixas de fertilidade				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----				
Mehlich-1	0-7	7-14	14-21	21-28	>28
Mehlich-3	0-12	12-24	24-36	36-48	>48
Resina	0-11	11-22	22-33	33-44	>44

Tabela 25. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado pelo método Mehlich-1, em amostras de solo da camada de 0-20 cm de profundidade de experimentos localizados no RS, em função das classes de argila.

Classes de argila <sup>(1)</sup>	Faixas de fertilidade				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----				
1	0-2,5	2,6-5,0	5,1-7,5	7,6-10,0	>10,0
2	0-5,0	5,1-10,0	10,1-15,0	15,1-20,0	>20,0
3+4	0-7,0	7,1-14,0	14,1-21,0	21,1-28,0	>28,0

<sup>(1)</sup> Classe 1, argila >550 g kg<sup>-1</sup> de solo; Classe 2, argila de 410-550 g kg<sup>-1</sup> de solo, classe 3, argila de 260-400 g kg<sup>-1</sup> de solo e classe 4, argila de 110-250 g kg<sup>-1</sup>.

Tabela 26. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado pelo método Mehlich-1, em amostras de solo da camada de 0-10 cm de profundidade de experimentos localizados no RS, em função das classes de argila.

Classes de argila <sup>(1)</sup>	Faixas de fertilidade				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----				
1	0-4,0	4,1-8,0	8,1-12,0	12,1-16,0	>16
2	0-7,0	7,1-14,0	14,1-21,0	21,1-28,0	>28
3+4	0-10,0	10,1-20,0	20,1-30,0	30,1-40,0	>40

<sup>(1)</sup> Classe 1, argila >550 g kg<sup>-1</sup> de solo; Classe 2, argila de 410-550 g kg<sup>-1</sup> de solo, classe 3, argila de 260-400 g kg<sup>-1</sup> de solo e classe 4, argila de 110-250 g kg<sup>-1</sup>.

Tabela 27. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado pelo método Mehlich-3, em amostras de solo da camada de 0-20 cm de profundidade de experimentos localizados no RS, em função das classes de argila.

Classes de argila <sup>(1)</sup>	Faixas de fertilidade				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----				
1	0-4,0	4,1-8,0	8,1-12,0	12,1-16,0	>16
2	0-10,0	10,1-20,0	20,1-30,0	30,1-40,0	>40
3+4	0-15,0	15,1-30,0	30,1-45,0	45,1-60,0	>60

<sup>(1)</sup> Classe 1, argila >550 g kg<sup>-1</sup> de solo; Classe 2, argila de 410-550 g kg<sup>-1</sup> de solo, classe 3, argila de 260-400 g kg<sup>-1</sup> de solo e classe 4, argila de 110-250 g kg<sup>-1</sup>.

Tabela 28. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado pelo método Mehlich-3, em amostras de solo da camada de 0-10 cm de profundidade de experimentos localizados no RS, em função das classes de argila.

Classes de argila <sup>(1)</sup>	Faixas de fertilidade				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----				
1	0-5,0	5,1-10,0	10,1-15,0	15,1-20,0	>20
2	0-12,0	12,1-24,0	24,1-36,0	36,1-48,0	>48
3+4	0-20,0	20,1-40,0	40,1-60,0	60,1-80,0	>80

<sup>(1)</sup> Classe 1, argila >550 g kg<sup>-1</sup> de solo; Classe 2, argila de 410-550 g kg<sup>-1</sup> de solo, classe 3, argila de 260-400 g kg<sup>-1</sup> de solo e classe 4, argila de 110-250 g kg<sup>-1</sup>.

Tabela 29. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado pelo método resina, em amostras de solo da camada de 0-20 cm de profundidade de experimentos localizados no RS, em função das classes de argila.

Classes de argila <sup>(1)</sup>	Faixas de fertilidade				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----				
1	0-5,0	5,1-10,0	10,1-15,0	15,1-20,0	>20
2	0-8,0	8,1-16,0	16,1-24,0	24,1-32,0	>32
3+4	0-10,0	10,1-20,0	20,1-30,0	30,1-40,0	>40

<sup>(1)</sup> Classe 1, argila >550 g kg<sup>-1</sup> de solo; Classe 2, argila de 410-550 g kg<sup>-1</sup> de solo, classe 3, argila de 260-400 g kg<sup>-1</sup> de solo e classe 4, argila de 110-250 g kg<sup>-1</sup>.

Tabela 30. Fósforo nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado pelo método resina, em amostras de solo da camada de 0-10 cm de profundidade de experimentos localizados no RS, em função das classes de argila.

Classes de argila <sup>(1)</sup>	Faixas de fertilidade				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----				
1	0-7,0	7,1-14,0	14,1-21,0	21,1-28,0	>28
2	0-10,0	10,1-20,0	20,1-30,0	30,1-40,0	>40
3+4	0-12,0	12,1-24,0	24,1-36,0	36,1-48,0	>48

<sup>(1)</sup> Classe 1, argila >550 g kg<sup>-1</sup> de solo; Classe 2, argila de 410-550 g kg<sup>-1</sup> de solo, classe 3, argila de 260-400 g kg<sup>-1</sup> de solo e classe 4, argila de 110-250 g kg<sup>-1</sup>.

Tabela 31. Potássio nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado por diferentes métodos, em amostras de solo da camada de 0-20 cm de profundidade de experimentos localizados no RS.

Método	Faixas de fertilidade				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----				
Mehlich-1	0-40	40-80	80-120	120-160	>160
Mehlich-3	0-40	40-80	80-120	120-160	>160
Resina	0-40	40-80	80-120	120-160	>160

Tabela 32. Potássio nas faixas de fertilidade do solo no sistema plantio direto, determinado por diferentes métodos, em amostras de solo da camada de 0-10 cm de profundidade de experimentos localizados no RS.

Método	Faixas de fertilidade				
	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
	----- mg kg <sup>-1</sup> -----				
Mehlich-1	0-60	60-120	120-180	180-240	>240
Mehlich-3	0-60	60-120	120-180	180-240	>240
Resina	0-60	60-120	120-180	180-240	>240

Tabela 33. Dose de  $P_2O_5$  estimada para elevar o fósforo em  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo, para o rendimento relativo de 90%, nas culturas soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em solos de diferentes classes texturais, profundidade de amostragem e métodos de análise.

Cultura	Profundidade 0-20 cm			Profundidade 0-10 cm		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3+4	Classe 1	Classe 2	Classe 3+4
----- kg ha <sup>-1</sup> -----						
----- Mehlich-1 -----						
Soja	35,4	12,0	10,0	19,0	11,8	6,0
Trigo	27,2	10,4	7,5	17,0	7,9	4,8
Milho	30,8	12,0	7,0	15,7	7,0	4,5
<b>Média</b>	<b>31,1</b>	<b>11,5</b>	<b>8,2</b>	<b>17,2</b>	<b>8,9</b>	<b>5,1</b>
----- Mehlich-3 -----						
Soja	24,4	7,6	4,3	16,9	5,9	3,5
Trigo	16,0	5,6	3,3	12,0	4,3	3,3
Milho	15,4	5,0	3,0	10,3	3,5	3,0
<b>Média</b>	<b>18,6</b>	<b>6,1</b>	<b>3,5</b>	<b>13,1</b>	<b>4,6</b>	<b>3,3</b>
----- Resina -----						
Soja	11,8	6,0	3,7	8,4	4,2	3,0
Trigo	14,4	7,5	5,2	8,9	5,6	4,3
Milho	10,1	6,0	4,8	7,2	4,4	4,0
<b>Média</b>	<b>12,1</b>	<b>6,5</b>	<b>4,6</b>	<b>8,2</b>	<b>4,7</b>	<b>3,8</b>

Classes de argila: Classe 1, argila  $>550 \text{ g kg}^{-1}$  de solo; Classe 2, argila de  $400-550 \text{ g kg}^{-1}$  de solo, classe 3+4, argila de  $260-400 + 110-250 \text{ g kg}^{-1}$ . R: reposição das quantidades exportadas pelos grãos.

Tabela 34. Dose de  $K_2O$  estimada para elevar o potássio em  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo, para o rendimento relativo de 90%, nas culturas soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, em solos de diferentes profundidade de amostragem e métodos de análise.

Cultura	Profundidade 0-20 cm			Profundidade 0-10 cm		
	Mehlich-1	Mehlich-3	Resina	Mehlich-1	Mehlich-3	Resina
----- kg ha <sup>-1</sup> -----						
Soja	2,6	2,5	2,2	1,0	1,1	1,0
Trigo	1,2	1,2	1,2	0,7	0,7	0,7
Milho	1,9	2,2	1,8	1,1	1,4	1,1
<b>Média</b>	<b>1,9</b>	<b>2,0</b>	<b>1,7</b>	<b>0,9</b>	<b>1,1</b>	<b>0,9</b>

equivalente à dose de máxima eficiência econômica (Mielniczuk et al., 1969 a, b; Universidade..., 1973; Tabelas..., 1976; Manual..., 1981; Anghinoni & Volkweiss, 1984; Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995; Raij et al., 1997). O teor do nutriente no solo correspondente ao rendimento de 90% foi obtido resolvendo-se a equação para a variável  $x$  da função. Um valor aproximado pode também ser obtido traçando-se uma reta paralela ao eixo  $y$  e o valor obtido pela intersecção com o eixo  $x$ .

O trigo foi a cultura que menos necessitou de potássio para atingir 90% do rendimento de máxima eficiência técnica (Tabela 34). A necessidade de  $K_2O$  dessa cultura é  $28 \text{ kg t}^{-1}$  de grãos, contra  $137$  e  $22 \text{ kg t}^{-1}$  de grãos para a soja e o milho, respectivamente (Raij et al., 1997). Supondo uma produção média igual a 90% do rendimento de máxima eficiência técnica a partir das Tabelas 16-18 ( $2,6$ ,  $2,2$  e  $5,7 \text{ t ha}^{-1}$  de soja, trigo e milho, respectivamente), a necessidade de potássio na forma de  $K_2O$  é de  $361$ ,  $61$  e  $124 \text{ kg}$  para a soja, trigo e milho, respectivamente. O trigo é mais eficiente do que a soja no aproveitamento do potássio. Para cada  $\text{kg}$  de  $K_2O$  produz  $15,6 \text{ kg ha}^{-1}$  (Tabela 17), enquanto a soja produz  $4,3 \text{ kg ha}^{-1}$  (Tabela 16). Essa maior eficiência do trigo deve estar relacionada à fisiologia e ao seu sistema radicular mais abundante.

A diferença das doses de  $P_2O_5$  entre os métodos na Tabela 33 é aparente, pois os métodos possuem faixas de fertilidade com diferentes amplitudes. As doses foram obtidas pela divisão da quantidade estimada de  $P_2O_5$  necessária para a produção de 90% do rendimento máximo pelo teor crítico de fósforo neste ponto, obtido pelos métodos (Mehlich-1, Mehlich-3 e resina) no tratamento testemunha (sem o fertilizante testado). A quantidade de  $P_2O_5$  necessária para cada cultura foi dividida pelo teor intermediário de cada faixa de fertilidade e dentro de cada classe textural para todos os métodos. Dessa forma, os métodos que extraem menos fósforo do solo, como o Mehlich-1, possuem intervalos de faixas de fertilidade e teor crítico menores do que, por exemplo, o Mehlich-3. Assim, os valores para elevar o fósforo em  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo são maiores (Tabela 33).

As diferentes doses de  $P_2O_5$  para as classes texturais são esperadas (Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995), uma vez que parte do fósforo aplicado como fertilizante é adsorvido a óxidos e hidróxidos de ferro

Tabela 35. Dose média de  $P_2O_5$  estimada por diferentes métodos e profundidade de amostragem para a produção de 90% do rendimento máximo de grãos de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo no RS em diferentes faixas de fertilidade e classes de argila.

Faixas de fertilidade	Classe 1	Classe 2	Classe 3+4
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----		
----- Soja -----			
Muito baixo	195	160	135
Baixo	110	90	70
Médio	35	30	30
Alto	R	R	R
Muito alto	R	R	R
----- Trigo -----			
Muito baixo	165	140	130
Baixo	100	80	75
Médio	35	30	30
Alto	R	R	R
Muito alto	R	R	R
----- Milho -----			
Muito baixo	150	125	125
Baixo	90	70	70
Médio	35	30	30
Alto	R	R	R
Muito alto	R	R	R

Classes de argila: Classe 1, argila >550 g kg<sup>-1</sup> de solo; Classe 2, argila de 410-550 g kg<sup>-1</sup> de solo, classe 3+4, argila de 260-400 + 110-250 g kg<sup>-1</sup>. R: reposição das quantidades exportadas pelos grãos.

Tabela 36. Dose média de  $K_2O$  estimada por diferentes métodos e profundidade de amostragem para a produção de 90% do rendimento máximo de grãos de soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo no RS em diferentes faixas de fertilidade.

Faixas de fertilidade	Soja	Trigo	Milho
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----		
Muito baixo	200	115	205
Baixo	120	65	120
Médio	45	25	40
Alto	R	R	R
Muito alto	R	R	R

R: reposição das quantidades exportadas pelos grãos.

e alumínio que estão presentes em maiores quantidades nos solos mais argilosos.

As doses de potássio (Tabela 34), necessárias para atingir 90% do rendimento máximo e elevar gradativamente a fertilidade do solo, são menores do que para o fósforo (Tabela 33). A eficiência de utilização de potássio do solo pelas plantas é maior devido à menor reatividade com os componentes do solo. Além disso, a variação dos teores críticos entre os métodos foi menor, com valores de teor crítico semelhantes para ambos os métodos. A necessidade de  $K_2O$  foi maior apenas para o método Mehlich-3 na cultura do milho.

As doses de fertilizantes para as culturas nas futuras análises de solo (considerando-se as classes texturais, no caso do fósforo) são obtidas subtraindo-se o valor intermediário da faixa de fertilidade do nutriente em questão, do valor de teor crítico (Tabelas 25-32) e multiplicando-se o valor obtido pela quantidade de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  necessária para elevar o teor em  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo. Os valores médios encontrados descritos nas Tabelas 35 e 36, oriundos das médias de  $P_2O_5$  (Tabela 35) e de  $K_2O$  (Tabela 36) são diferentes entre as culturas em função das suas diferentes necessidades (Raij et al., 1997; Wiethölter et al., 1998) e eficiência de utilização dos fertilizantes. A maior necessidade de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  para a soja e a menor necessidade de  $K_2O$  para o trigo obtida neste trabalho já foi discutida anteriormente.

A primeira etapa da calibração (Item 5.3.2.) tem por objetivo estimar o grau de deficiência ou suficiência de nutrientes para as plantas. Pode ser feita por várias metodologias, obedecendo logicamente os critérios de eficiência do método, praticidade a nível de laboratório e economicidade nas análises.

Os solos do RS apresentam grandes diferenças na constituição química, física e mineralógica. Podem ser fertilizados com produtos de diferentes reatividades, como por exemplo, os fosfatos naturais que reagem com a acidez do método Mehlich-1, superestimando a disponibilidade de fósforo para as plantas (Raij, 1991; Kroth, 1998). Assim, os métodos de análise de solo podem estimar de forma diferenciada as quantidades de nutrientes necessárias para as plantas, sendo importante apenas escolher aquele que melhor se adapta ao tipo de solo e ao manejo adotado.

A segunda etapa da calibração tem por objetivo quantificar as doses necessárias para a produção de máxima eficiência econômica (neste caso). Esta etapa deve ser simples para facilitar as recomendações e não apresenta razões para dosagens específicas para cada método de análise de solo e para cada profundidade de amostragem. Ao contrário, a elaboração de doses médias para os três métodos (Mehlich-1, Mehlich-3 e resina) e as duas profundidades de amostragem (0-20 e 0-10 cm) pode amenizar possíveis distorções devidas à variabilidade nos valores das análises de solo e respostas das culturas, nos cálculos das doses de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  para as culturas na segunda etapa da calibração.

Assim, dependendo do tipo de solo, do tempo de adoção do sistema plantio direto, das doses e modos de aplicação de fertilizantes, que influem na estratificação da fertilidade do solo, o produtor pode amostrar o solo na profundidade de 0-20 ou 0-10 cm, utilizando qualquer método (Mehlich-1, Mehlich-3 ou resina) que a calibração irá enquadrar o teor da análise em uma faixa de fertilidade (muito baixo, baixo, médio, alto ou muito alto) e a recomendação será única para qualquer método ou profundidade. Na realidade, as plantas absorvem os nutrientes do solo em várias profundidades do perfil e os métodos têm por objetivo apenas correlacionar os teores determinados pelos mesmos com o rendimento das culturas.

As doses de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  foram definidas para 90% do rendimento de máxima eficiência técnica das culturas sob sistema plantio direto de cultivo. Pressupõe-se que com essa dose a fertilidade do solo seja elevada até o teor crítico estimado (procedimento de cálculo explicado anteriormente). Estas doses são para apenas um cultivo e podem não ser economicamente viáveis, especialmente na faixa de fertilidade muito baixo que exige altas doses de fósforo ou potássio, devido às variações de preços dos insumos (kg de  $P_2O_5$  ou  $K_2O$ ) e dos grãos das culturas (kg de soja, trigo ou milho). O rendimento, esperado em 90% do máximo, pode também não ser obtido em razão do modo de aplicação do adubo e da interação deste com os processos químicos, físicos e biológicos que influenciam na nutrição das plantas. Há ainda o efeito de outros fatores de produção, de solo, de clima, da cultura e de manejo.

Com o objetivo de diminuir o alto custo dos investimentos imediatos e os riscos de não obter retorno econômico do investimento, as doses foram

subdivididas em três cultivos, à semelhança das recomendações atuais para os estados do RS e SC (Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995), cujo critério é a obtenção do rendimento de máxima eficiência econômica (em torno de 90% da máxima eficiência técnica) das culturas e elevação progressiva da fertilidade do solo a partir do terceiro cultivo. No entanto, para efeito de dose total nos três cultivos adicionou-se o equivalente a 2 vezes a quantidade de  $P_2O_5$  ou  $K_2O$  exportada pelos grãos (Wiethölter et al., 1998), estimada para 90% do rendimento de máxima eficiência técnica (Tabela 13-18).

Os rendimentos da soja, do trigo e do milho (90% do rendimento de máxima eficiência técnica) com adição de  $P_2O_5$  foram de 2,7, 2,2 e 5,6 t ha<sup>-1</sup>, e a exportação foi de 80, 44 e 92 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Com a adição de  $K_2O$  foram de 2,6, 2,2 e 5,7 t ha<sup>-1</sup>, e a exportação foi de 105, 23 e 68 kg ha<sup>-1</sup> de  $K_2O$ , respectivamente.

Considerou-se para efeitos de cálculo que as quantidades desses nutrientes para atender todos os processos fisiológicos da planta, inclusive a produção de grãos, são supridas no primeiro cultivo. O que não for retirado pelos grãos será reciclado com a palhada e estará disponível para os próximos cultivos. Dessa forma é necessário adicionar apenas o valor de exportação de mais duas safras para manter a fertilidade do solo próximo ao teor crítico. Após esse período se faz necessária nova análise de solo para ajustar os teores e programar as adubações subseqüentes.

As doses de  $P_2O_5$  (Tabela 37) e  $K_2O$  (Tabela 38) recomendadas para as culturas estão ajustadas para valores inteiros e subdivididos em aproximadamente 50% da dose total no primeiro cultivo, 30% no segundo cultivo e 20% no terceiro cultivo, considerando-se o efeito residual de fósforo (Fole & Grimm, 1973; Barrow, 1980; Kochhann et al., 1982; Rodrigues et al., 1985; Cassol, 1999). O efeito residual do fósforo permite que a quantidade total de fósforo disponível para as plantas seja aproximadamente igual à dose do primeiro cultivo. O conceito de efeito residual utilizado para a divisão da dose é exemplificado para a seqüência das culturas soja, trigo e soja, em solo classe 1 de textura e faixa de fertilidade muito baixo. As plantas de soja utilizam o fósforo residual dos cultivos anteriores (não quantificado) mais a dose atual (140 kg ha<sup>-1</sup>). No segundo cultivo, (trigo) as plantas absorvem 20% do fósforo residual do antepenúltimo cultivo (residual não quantificado), 30 % do

Tabela 37. Dose de  $P_2O_5$  estimada para a produção de 90% do rendimento máximo numa seqüência de três cultivos (soja, trigo e milho) sob sistema plantio direto de cultivo no RS, em solos com diferentes classes texturais e faixas de fertilidade (média dos métodos Mehlich-1, Mehlich-3 e resina e das profundidades 0-20 e 0-10 cm).

Faixas fertilidade	Classe 1			Classe 2			Classe 3, 4		
	1º ano	2º ano	3º ano	1º ano	2º ano	3º ano	1º ano	2º ano	3º ano
----- kg ha <sup>-1</sup> -----									
----- <b>Soja</b> -----									
M. baixo	140	85	55	120	75	50	110	65	45
Baixo	95	60	C	85	50	C	75	45	C
Médio	60	C	C	60	C	C	60	C	C
Alto	C	C	C	C	C	C	C	C	C
M. alto	C	C	C	C	C	C	C	C	C
----- <b>Trigo</b> -----									
M. baixo	105	65	45	95	55	40	90	55	35
Baixo	75	45	30	65	40	C	60	40	C
Médio	40	C	C	40	C	C	40	C	C
Alto	C	C	C	C	C	C	C	C	C
M. alto	C	C	C	C	C	C	C	C	C
----- <b>Milho</b> -----									
M. baixo	120	75	50	110	70	50	110	70	50
Baixo	90	65	C	80	C	C	80	C	C
Médio	60	C	C	60	C	C	60	C	C
Alto	C	C	C	C	C	C	C	C	C
M. alto	C	C	C	C	C	C	C	C	C

Classe 1, argila >550 g kg<sup>-1</sup> de solo; Classe 2, argila de 410-550 g kg<sup>-1</sup> de solo, classe 3, argila de 260-400 g kg<sup>-1</sup> de solo e classe 4, argila de 110-250 g kg<sup>-1</sup>. C: expectativa de rendimento da cultura x exportação. Exportação da soja, trigo e milho: 15,0; 10,0 e 8,2 kg de  $P_2O_5$  t<sup>-1</sup>.

Tabela 38. Dose de  $K_2O$  estimada para a produção de 90% do rendimento máximo numa seqüência de três cultivos (soja, trigo e milho) sob sistema plantio direto de cultivo no RS, em solos com diferentes faixas de fertilidade (média dos métodos Mehlich-1, Mehlich-3 e resina e das profundidades 0-20 e 0-10 cm).

Faixas fertilidade	Soja			Trigo			Milho		
	1º ano	2º ano	3º ano	1º ano	2º ano	3º ano	1º ano	2º ano	3º ano
----- kg ha <sup>-1</sup> -----									
M. baixo	150	90	60	70	45	30	135	80	55
Baixo	115	70	C	45	25	C	95	60	C
Médio	75	C	C	25	C	C	55	C	C
Alto	C	C	C	C	C	C	C	C	C
M. alto	C	C	C	C	C	C	C	C	C

c = expectativa de rendimento da cultura x exportação da cultura  
Exportação da soja, trigo e milho: 20,0; 5,3 e 6,0 kg de  $K_2O$  t<sup>-1</sup>.

penúltimo cultivo (não quantificado), 50% do último cultivo ( $70 \text{ kg ha}^{-1}$ ), mais uma aplicação de  $65 \text{ kg ha}^{-1}$ , totalizando mais de  $135 \text{ kg}$ . No terceiro cultivo (soja) a planta absorve 20% do aplicado no antepenúltimo cultivo (residual não quantificado), 30% do primeiro cultivo ( $33 \text{ kg ha}^{-1}$ ), 50% do segundo cultivo ( $42,5 \text{ kg ha}^{-1}$ ), mais a adição de  $\text{P}_2\text{O}_5$  de  $55 \text{ kg ha}^{-1}$  (totalizando mais de  $130 \text{ kg ha}^{-1}$ ). No próximo ciclo de cultivos, após nova análise de solo, se estabelece um novo ciclo de efeitos residuais para os próximos cultivos, e assim sucessivamente.

As doses de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{K}_2\text{O}$  (Tabelas 37, 38), recomendadas para a soja e o milho sob sistema plantio direto de cultivo, são maiores neste trabalho do que as doses para as mesmas faixas de fertilidade das recomendações para o sistema convencional de cultivo, sugeridas pela Comissão... (1995). Provavelmente é devido à maior necessidade e exportação nas variedades com maior potencial genético de produção cultivadas atualmente. Em contraste com as menores doses recomendadas para a cultura do trigo. As menores doses de potássio para o trigo em relação à soja podem ter sido consequência da maior eficiência de utilização de potássio (Tabela 17) e da menor exportação de potássio pela cultura do trigo.

A cultura do trigo tem a maior eficiência de utilização dos fertilizantes fósforo e potássio (Tabelas 14 e 17), obtendo-se rendimentos elevados de grãos com doses pequenas de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{K}_2\text{O}$  (Tabelas 39, 40). Isso é devido à baixa necessidade de fósforo e potássio nas plantas inteiras (Raij et al., 1997) e à baixa exportação pelos grãos (Raij et al., 1997; Wiethölter et al., 1998). O lucro obtido com a cultura do trigo sob sistema plantio direto de cultivo, para uma produção de  $2400 \text{ kg ha}^{-1}$ , é menor ( $26,48 \text{ US\$ ha}^{-1}$ ) do que o obtido com milho ( $149 \text{ US\$ ha}^{-1}$  para uma produção de milho de apenas  $4500 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e com soja ( $164 \text{ US\$ ha}^{-1}$  para uma produção de soja de  $2400 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Foram considerados os custos de produção médios de cinco anos e o preço médio da soja, trigo e milho de 10 anos (FECOAGRO, 2002).

A análise dos dados de rendimento de trigo obtidos nas curvas de resposta desse trabalho e do retorno econômico da cultura indicam que não há justificativa para a utilização de doses mais elevadas de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{K}_2\text{O}$ , semelhantes às da soja e do milho, como as sugeridas para o trigo sob sistema convencional de cultivo pela Comissão... (1995).

Tabela 39. Média da dose de  $P_2O_5$  e do rendimento de grãos para a máxima eficiência técnica e econômica e recomendação média da Comissão, de experimentos em diversos locais no RS, cultivados sob sistema plantio direto com soja, trigo e milho.

Cultura	Locais --- n° ---	MET		MME		Comissão <sup>(1)</sup>
		$P_2O_5$	Rto grãos	$P_2O_5$	Rto grãos	$P_2O_5$
		kg ha <sup>-1</sup>				
Soja	14	121	2995	78	2942	56
Trigo	9	169	2479	74	2288	77
Milho	16	141	6410	109	6346	57

MMT: máxima eficiência técnica, MEE: máxima eficiência econômica com critério de capital ilimitado. <sup>(1)</sup> Dose média para os experimentos, recomendado pela Comissão... (1995).

Tabela 40. Média da dose de  $K_2O$  e rendimento de grãos para a máxima eficiência técnica e econômica e recomendação média da Comissão para experimentos em diversos locais no RS, cultivados no sistema plantio direto com soja, trigo e milho.

Cultura	Locais --- n° ---	MET		MME		Comissão <sup>(1)</sup>
		$K_2O$	Rto grãos	$K_2O$	Rto grãos	$K_2O$
		kg ha <sup>-1</sup>				
Soja	16	182	2705	120	2631	69
Trigo	7	95	2567	49	2518	79
Milho	10	114	6056	88	6023	59

MMT: máxima eficiência técnica, MEE: máxima eficiência econômica com critério de capital ilimitado. <sup>(1)</sup> Dose média para os experimentos, recomendado pela Comissão... (1995).

### 5.3.4. Dose de máxima eficiência técnica e máxima eficiência econômica

A dose média de  $P_2O_5$  (Tabela 39) e de  $K_2O$  (Tabela 40) para o rendimento de máxima eficiência técnica (MET) foi estimada individualmente para cada experimento, derivando-se e igualando-se a zero as funções quadráticas de produção das Tabelas 13-18 que melhor se ajustaram aos dados de cada experimento (equação 2, 3) (Grimm, 1970; Alvarez, 1991; Tiesdale et al, 1993).

$$y = a + bx + cx^2 \quad (2)$$

$$\frac{dy}{dx} : \cdot b + 2cx = 0 \quad (3)$$

A dose de máxima eficiência econômica com critério de capital ilimitado (MEE) é baseada no preço do kg do fertilizante (f) testado no experimento e no preço do kg de grãos da cultura cultivada (v). Esses valores são aplicados na equação derivada da função receita (quadrática, equação 4), descrita nas Tabelas 13-18 (Grim, 1970; Alvarez, 1991; Tiesdale et al., 1993; Blak, 1993) e igualado-se a mesma a zero (Equação 5).

$$y = v(a + bx + cx^2) - f \quad (4)$$

$$\frac{dy}{dx} : \cdot v(b + 2cx) - f = 0 \quad (5)$$

O custo do fertilizante é composto pelo valor de mercado do produto, mais os custos financeiros e de transporte (a aplicação do fertilizante normalmente não aumenta o custo, pois este é atribuído ao plantio na operação conjugada), totalizando US\$ 0,5294  $kg^{-1}$  de  $P_2O_5$  e US\$ 0,2740  $kg^{-1}$  de  $K_2O$  (FECOAGRO/RS, 2002; ANDA, 2001; pesquisa de mercado). O preço do kg do grão é composto pelo valor de venda, menos os custos dos impostos, da colheita e do transporte, totalizando US\$ 0,1853  $kg^{-1}$  de soja, 0,1287  $kg^{-1}$  de trigo e 0,1038  $kg^{-1}$  de milho (FECOAGRO/RS, 2002).

O rendimento médio de máxima eficiência técnica nos experimentos cultivados com soja, trigo e milho, com doses crescentes de fósforo ou potássio (Tabela 39, 40), foi semelhante aos rendimentos obtidos em estudos de

pesquisas e em lavouras de produtores de maior nível tecnológico. O rendimento de máxima eficiência econômica foi superior à média do rendimento nas lavouras no RS para as mesmas culturas, no ano agrícola de 2000/01 (1969, 1785 e 3142 kg ha<sup>-1</sup> de soja, trigo e milho, respectivamente – IBGE, 2003).

As doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para o rendimento de máxima eficiência econômica para a cultura do trigo obtidas por Pöttker (1999) foram muito próximas àquelas recomendadas pela Comissão... (1995), variando de 50-67 kg ha<sup>-1</sup>, com uma relação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/grãos de 5,53. Esta relação é maior do que a utilizada neste trabalho (4,1), podendo ser um dos fatores de diminuição de doses de máxima eficiência econômica. Isso está de acordo com o observado por Cordeiro et al. (1979), cujas doses para a soja foram de 99 e 142 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> para uma relação de preço de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/grão de 4,5 e 4,0, respectivamente. Em outro trabalho com trigo sob sistema convencional de cultivo Sfredo & Winkler (1979) obtiveram a dose de 106 e 168 kg ha<sup>-1</sup> para a máxima eficiência econômica para o trigo em dois solos com uma relação de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/grão igual a 4, e de 201 e 258 para uma relação igual a 0,2. Esses valores são muito superiores às doses recomendadas na época (75 kg ha<sup>-1</sup> na adubação de manutenção, Tabelas... 1976), que também foram calibradas sob sistema convencional de cultivo.

Estudos mais recentes (Borkert et al. 1993) mostram que a dose de máxima eficiência econômica para a soja cultivada sob sistema convencional no Paraná, em um solo com baixos teores de potássio, foi de 126 kg ha<sup>-1</sup>, enquanto que a dose de máxima eficiência técnica foi de 200 kg ha<sup>-1</sup>, para rendimentos muito próximos, semelhante ao encontrado na Tabela 40. No trabalho de Borkert et al. (1993), a dose de K<sub>2</sub>O entre 40 e 80 kg ha<sup>-1</sup> propiciou altas produções de soja, mas o aumento dos teores de potássio no solo somente foi possível com doses maiores do que 80 kg ha<sup>-1</sup>, semelhante aos resultados obtidos por Scherer (1998).

As doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O podem variar muito em função da eficiência das plantas na utilização dos fertilizantes. Além dos modos de aplicação e das fontes, a eficiência depende também dos demais fatores de produção, como solo, cultura clima e manejo (Fitss, 1959). Além disso, a dose de máxima eficiência econômica varia com a alteração de preços dos fertilizantes e dos

produtos; fatores, como distância, época do ano e entre anos influenciam no preço e na relação produto, conseqüentemente na dose recomendada para a máxima eficiência econômica.

A dose média de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  para a soja e o milho recomendada pela Comissão... (1995) está subestimada quando comparada à dose estimada para a máxima eficiência econômica para essas culturas neste trabalho (Tabelas 39, 40). Há semelhança entre a dose média de  $P_2O_5$  para a cultura do trigo recomendada pela Comissão... (1995) e a estimada neste trabalho. No entanto, a dose de  $K_2O$  está superestimada. Mielniczuk et al. (1969b) concluíram que o trigo respondeu mais à aplicação de  $P_2O_5$  do que à de  $K_2O$ . A menor dose de potássio estimada neste trabalho pode ser devido às baixas necessidades de potássio das plantas, à menor exportação pelos grãos, e ao baixo preço de comercialização do kg de grão de trigo em relação ao preço do kg de fertilizante  $K_2O$  (relação 2,13). Segundo Raij et al. (1997), a quantidade de potássio para a cultura de trigo produzir 1 (uma) tonelada de grãos é de 28 kg de  $K_2O$ . Este valor multiplicado pelo rendimento de máxima eficiência econômica totaliza 70,5 kg, maior do que a dose de máxima eficiência econômica estimada neste trabalho e semelhante à dose recomendada pela Comissão... (1995).

No caso da exportação de fósforo que corresponde a  $5,3 \text{ kg t}^{-1}$  de grãos (Wiethölter et al., 1998), a quantidade de  $K_2O$  exportada para o rendimento de máxima eficiência econômica totaliza 13,3 kg. Valor muito menor do que a dose de máxima eficiência econômica obtida neste trabalho e do que a recomendada pela Comissão... (1995). A dose de  $K_2O$  de  $49 \text{ kg ha}^{-1}$  (Tabela 40) está acima do valor encontrado pelo procedimento de Wiethölter et al. (1998) e abaixo da recomendada pela Comissão... (1995). Aparentemente é uma dose adequada, se for considerado um rendimento de máxima eficiência técnica de  $2318 \text{ kg ha}^{-1}$  e econômica de  $1994 \text{ kg ha}^{-1}$ , valores estes acima da média do RS em 2001 (1969) (IBGE, 2003).

As maiores doses de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  estimadas para o rendimento de máxima eficiência econômica da soja e do milho sob sistema plantio direto de cultivo, podem ser devido à maior produtividade e preço da soja e à alta produtividade do milho. As variedades atuais são mais produtivas do que aquelas utilizadas nas calibrações anteriores, principalmente na década de

1970. Além disso, se compararmos à cultura do trigo, a soja e o milho necessitam mais nutrientes para o desenvolvimento e exportam quantidades maiores do que a cultura de trigo.

As doses de fertilizantes para as culturas sob sistema plantio direto de cultivo (Tabelas 37, 38) são as de máxima eficiência econômica. Nas tabelas 39 e 40 são mostradas as doses médias de máxima eficiência econômica para o conjunto de solos, independentemente das faixas de fertilidade. Entretanto, se as doses fossem separadas por faixa de fertilidade, essas seriam 224, 129 e 217 kg ha<sup>-1</sup> para soja, trigo e milho, respectivamente, na faixa de fósforo muito baixo, determinado pelo método Mehlich-1 na camada de 0-20 cm. Para o potássio na faixa muito baixo, com o mesmo método e para amostras retiradas na profundidade de 0-20 cm, as doses médias de máxima eficiência econômica seriam 144, 100 e 216 kg ha<sup>-1</sup> para soja, trigo e milho, respectivamente.

O rendimento médio de máxima eficiência econômica obtido por derivação das funções de produção foi de 96 e 98% do rendimento médio de máxima eficiência técnica da soja, trigo e milho, respectivamente para a adubação com P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O. Esses valores estão acima dos 90% normalmente utilizados (Mielniczuk et al., 1969 a, b; Universidade..., 1973; Tabelas..., 1976; Manual..., 1981; Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995; Raij et al., 1997) para a recomendação de adubação das culturas soja, trigo e milho. O valor adotado por esses autores e neste trabalho é conservador. Mantém-se, desta forma, uma faixa de segurança para a eventualidade de a relação fertilizante/grãos se elevar.

#### **5.3.5. Doses de fertilizantes para o sistema plantio direto vs doses das calibrações anteriores sob sistema convencional de cultivo**

O teor crítico para o método Mehlich-1 (valor superior da faixa de fertilidade médio) e as faixas de fertilidade em solos sob sistema plantio direto (Figuras 22 e 23) são maiores do que os valores estabelecidos para o sistema convencional (Siqueira et al., 1997; Comissão..., 1989, 1995). Isso pode aumentar a precisão na interpretação das análises de solo e na elaboração das recomendações de fertilizantes, especialmente para o fósforo, cuja amplitude

dentro de cada faixa de fertilidade é pequena (Comissão..., 1995). Para os métodos Mehlich-3 e resina, as amplitudes dentro de cada faixa de fósforo são maiores do que as do método Mehlich-1 e se assemelham às deste no caso de potássio (Tabelas 23-32).

A hipótese deste trabalho, de que o teor crítico para fósforo e potássio é maior sob sistema plantio direto do que sob sistema convencional de cultivo, foi confirmada. Em geral, também as doses de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  recomendadas são maiores sob esse sistema, para as culturas da soja e milho, confirmando parcialmente esta hipótese. Entretanto, essas diferenças podem ser maiores quando são usados os valores das análises de solo e não as faixas de fertilidade (Figuras 22 e 23). Por exemplo, a recomendação de  $P_2O_5$  (Figura 22) para uma seqüência de três cultivos (soja, trigo e milho), em uma análise de solo com um teor de fósforo menor do que  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo, é maior (em 40 kg) para o sistema convencional (Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995) do que para o sistema plantio direto, independentemente da profundidade de amostragem do solo. Por outro lado, se a análise do solo tiver  $2,2 \text{ mg kg}^{-1}$ , a dose recomendada para o sistema convencional é menor (em 75 kg) do que para sistema plantio direto. Ainda, se a análise de solo tiver um teor de fósforo maior do que  $1 \text{ mg kg}^{-1}$  de solo e a amostragem tiver sido feita na profundidade de 0-10 cm, a dose de  $P_2O_5$  para o sistema plantio direto será sempre, relativamente, maior do que a dose recomendada para o sistema convencional (Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995).

Para o  $K_2O$  (Figura 23), dependendo de cada análise de solo (faixa de fertilidade) e da profundidade de amostragem do solo sob sistema plantio direto, a dosagem pode ser também maior do que a dose recomendada para o sistema convencional de cultivo por Siqueira et al. (1987) e pela Comissão... (1989, 1995). As doses de  $K_2O$  recomendadas para o sistema plantio direto são maiores nas faixas muito baixo e baixo e nas amostras retiradas na profundidade de 0-10 cm. Nas faixas de maior fertilidade na camada de 0-20 cm no sistema plantio direto, essa diferença diminui, pois o valor de reposição recomendado por Siqueira et al. (1987) e pela Comissão... (1987 e 1989), para uma produção semelhante a deste trabalho, é de 65, 60 e 60  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $K_2O$  para a soja, trigo e milho, respectivamente. Estes valores são maiores do

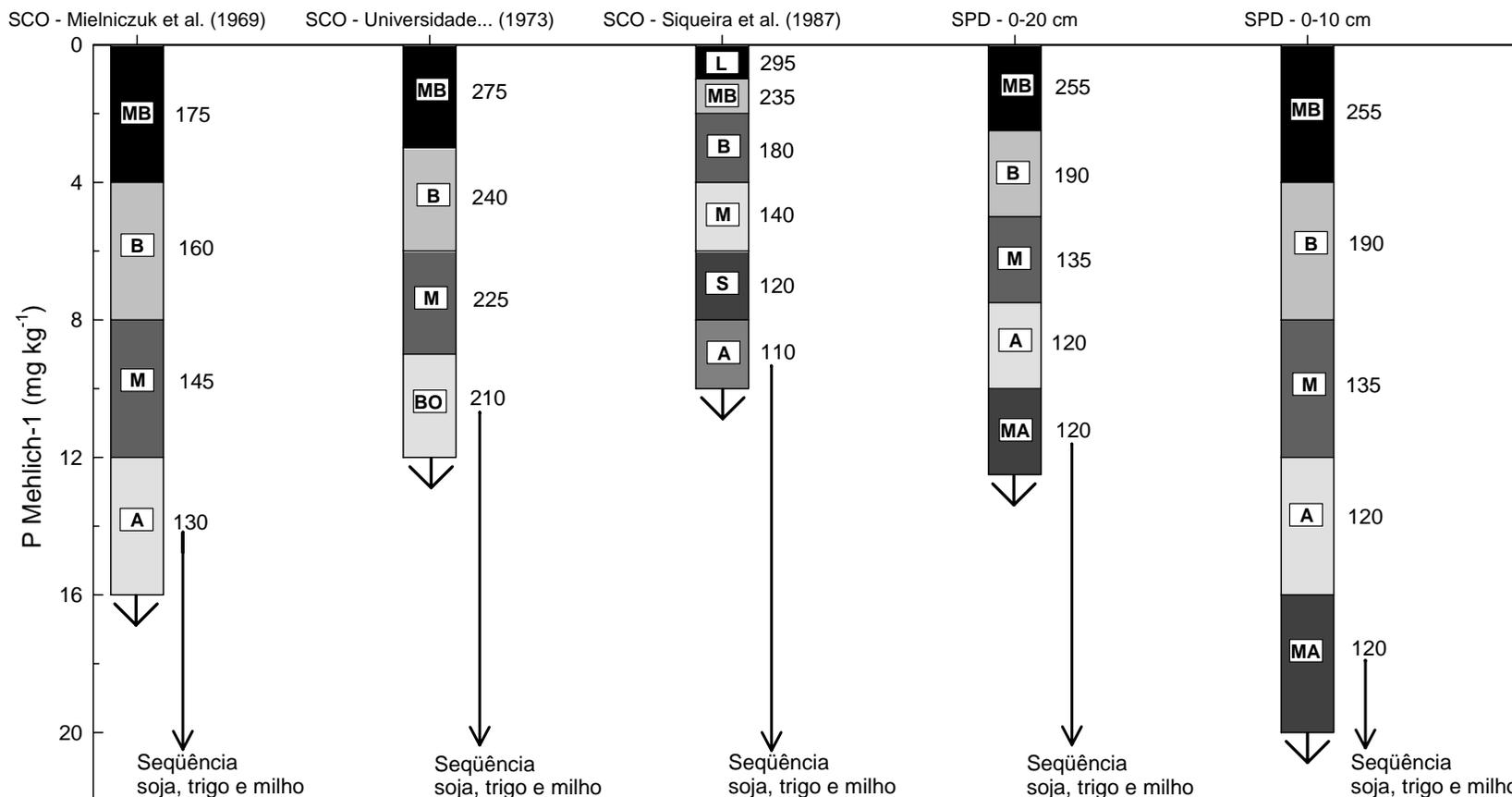


Figura 22. Doses acumuladas de fósforo em solos argilosos para uma seqüência de culturas (soja, trigo e milho) nas faixas de fertilidade (MB: muito baixo, B: baixo, M: médio, A: alto, MA: muito alto, BO: bom, L: limitante, S: suficiente), cultivadas sob SCO (sistema convencional, amostra de solo na profundidade de 0-20 cm) e sob SPD (sistema plantio direto, amostra de solo nas profundidades de 0-20 e 0-10 cm). Mielniczuk et al. (1969) e Universidade... (1973) valores estimados das doses de manutenção mais 3/8 da dose de correção; Siqueira et al. (1987) valores estimados da recomendação dos três cultivos com valor R para rendimentos de 2-3, >2 e 3-6 t ha<sup>-1</sup> para a soja, trigo e milho, respectivamente; sob SPD, valores estimados da recomendação dos três cultivos com valor C para quantidade exportada pelos grãos com base na expectativa de rendimento.

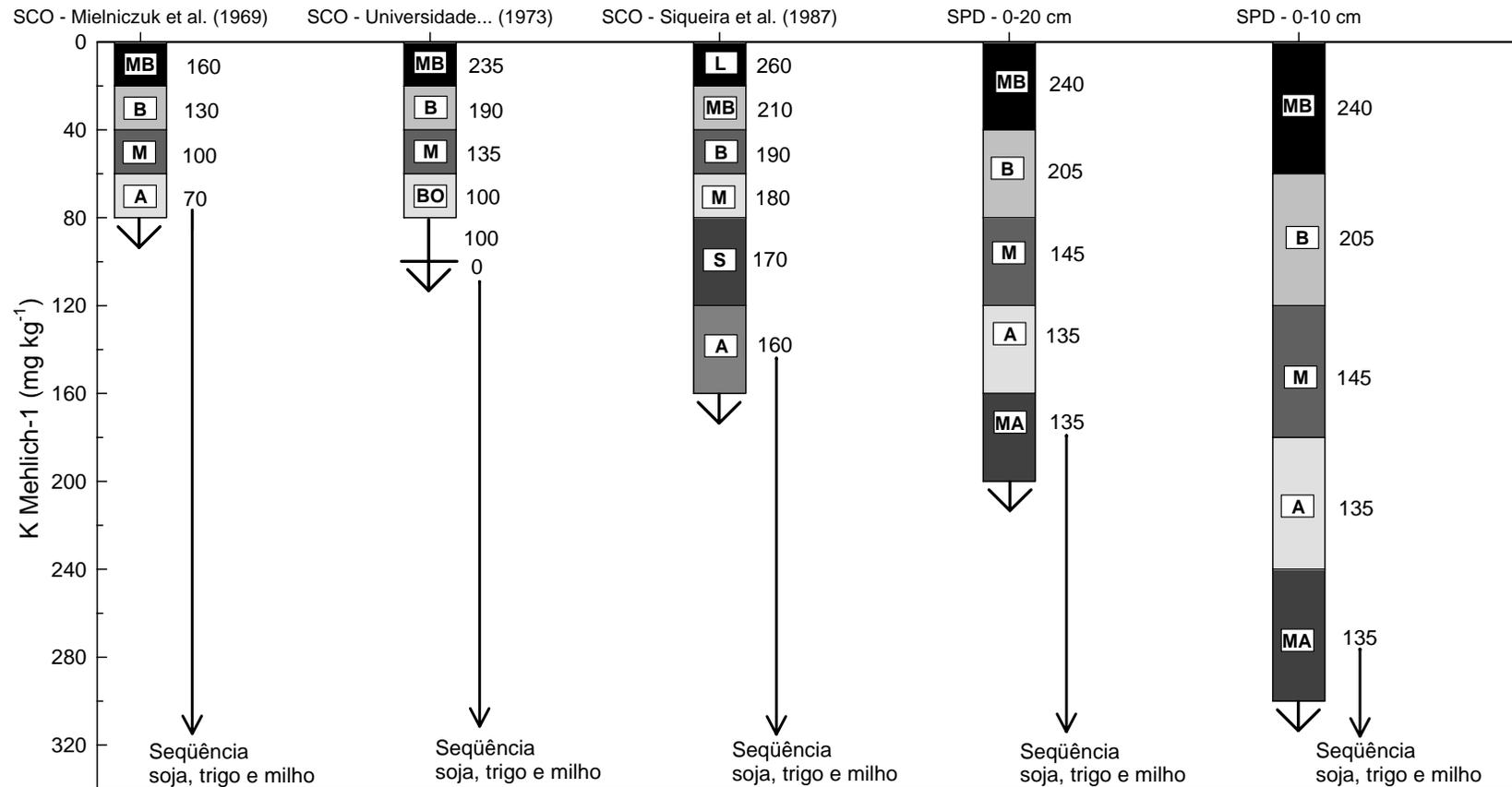


Figura 23. Doses acumuladas de potássio em solos argilosos para uma seqüência de culturas (soja, trigo e milho) nas faixas de fertilidade (MB: muito baixo, B: baixo, M: médio, A: alto, MA: muito alto, BO: bom, L: limitante, S: suficiente), cultivadas sob SCO (sistema convencional, amostra de solo na profundidade de 0-20 cm) e sob SPD (sistema plantio direto, amostra de solo nas profundidades de 0-20 e 0-10 cm). Mielniczuk et al. (1969) e Universidade... (1973) valores estimados das doses de manutenção mais 3/8 da dose de correção; Siqueira et al. (1987) valores estimados da recomendação dos três cultivos com valor R para rendimentos de 2-3, >2 e 3-6 t ha<sup>-1</sup> para a soja, trigo e milho, respectivamente; sob SPD valores estimados da recomendação dos três cultivos com valor C para quantidade exportada pelos grãos com base na expectativa de rendimento.

que os de exportação de 55, 15 e 55 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O para as mesmas culturas.

Comparando-se apenas o primeiro cultivo de cada cultura (Figura 24 e 25), observa-se que as recomendações de Siqueira et al. (1987) de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O para a soja e o milho são em geral menores do que as recomendadas para o sistema plantio direto, especialmente se a profundidade de amostragem em solos sob sistema plantio direto for na camada 0-10 cm de profundidade, podendo essa diferença ser de até duas vezes para o potássio e três vezes mais para o fósforo, dependendo da faixa de fertilidade.

As doses de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Figura 24) e de K<sub>2</sub>O (Figura 25) recomendadas por Siqueira et al. (1987) e pela comissão... (1989, 1995) para a cultura do trigo, estimadas sob sistema convencional, são maiores do que as estimadas neste trabalho sob sistema plantio direto de cultivo. Entretanto, se a amostragem for realizada na profundidade de 0-10 cm, a dose recomendada sob sistema plantio direto pode ser igual ou maior àquela do sistema convencional quando o teor de fósforo e potássio do solo for maior ou igual a 4,0 e 40 mg kg<sup>-1</sup>, respectivamente.

As doses mais altas de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O para a adubação das culturas sob sistema plantio direto, obtidas nesta calibração, se justificam a partir das hipóteses de que as variedades de soja e milho, cultivadas atualmente, são mais produtivas do que as utilizadas na época da calibração feita sob sistema convencional de cultivo (de 1969 a meados da década de 1980). A maior produtividade implica em maior exportação pelos grãos. Na outra hipótese ocorre a concentração superficial de nutrientes (Eltz, et al., 1989; Schindwein, 2000). Se verdadeira, os valores das análises de solo amostrado na camada 0-10 cm serão maiores do que quando amostrado na camada 0-20 cm. Isso nem sempre implica em maior aproveitamento dos nutrientes pelas plantas, principalmente quando estão na camada muito superficial (0-2,5 cm) e/ou sob condições de baixa umidade do solo.

Uma das possibilidades de verificar se as doses requeridas pelas culturas cultivadas atualmente são maiores do que as das recomendações utilizadas atualmente (Comissão..., 1995) é analisar a evolução do valor numérico das doses de fertilizantes usadas a partir das primeiras recomendações (Mielniczuk et al., 1969a; Universidade..., 1973; Tabelas..., 1976; Manual..., 1981,

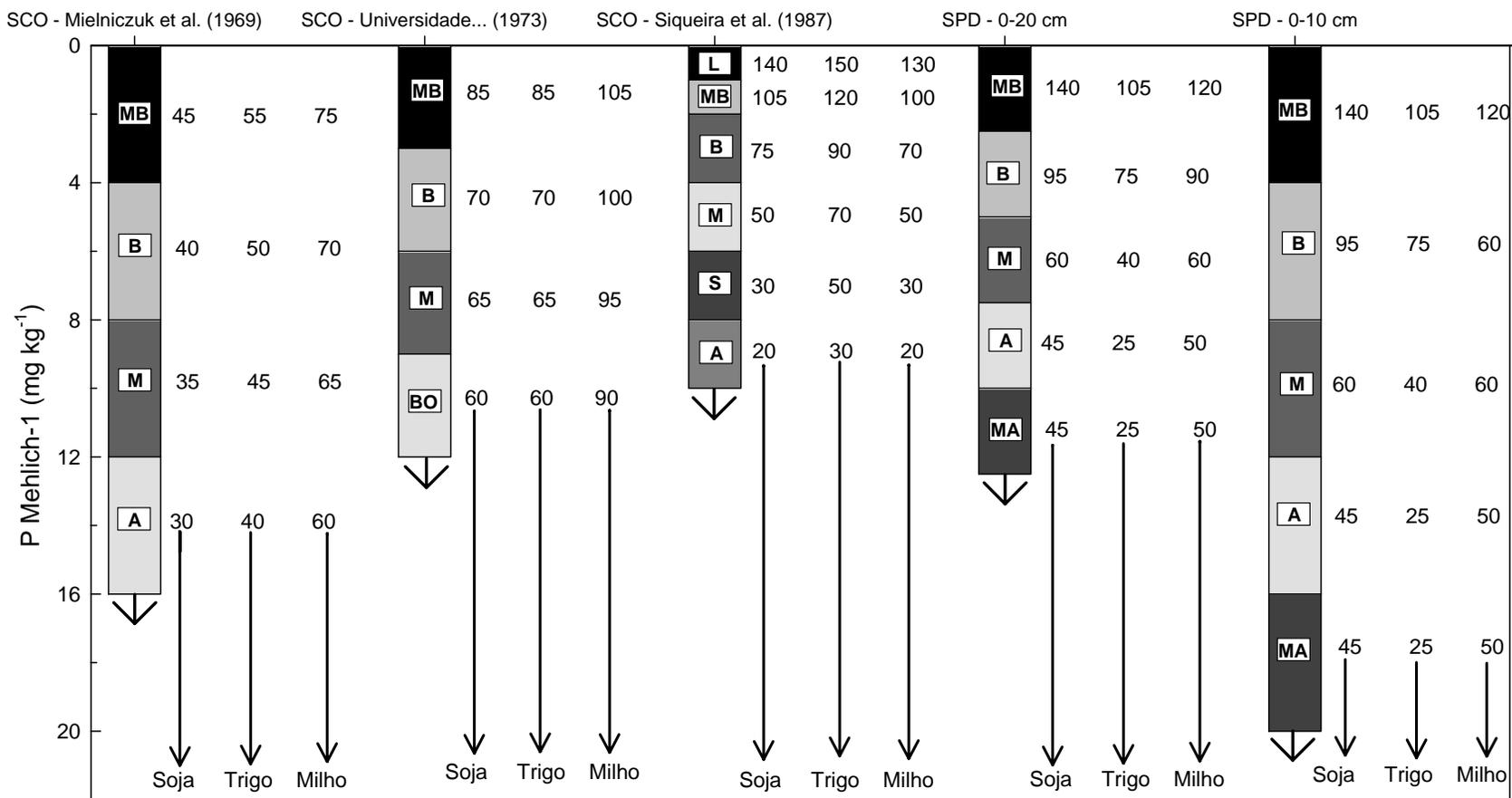


Figura 24. Doses de fósforo em solos argilosos para o primeiro cultivo da soja, do trigo e do milho nas faixas de fertilidade (MB: muito baixo, B: baixo, M: médio, A: alto, MA: muito alto, BO: bom, L: limitante, S: suficiente), cultivadas sob SCO (sistema convencional, amostra de solo na profundidade de 0-20 cm) e sob SPD (sistema plantio direto, amostra de solo nas profundidades de 0-20 e 0-10 cm). Mielniczuk et al. (1969) e Universidade... (1973) valores estimados das doses de manutenção mais 1/8 da dose de correção, Siqueira et al. (1987) primeiro cultivo da soja, do trigo e do milho; sob SPD primeiro cultivo da soja, do trigo e do milho e valor C a quantidade exportada pelos grãos baseado na expectativa de rendimento.

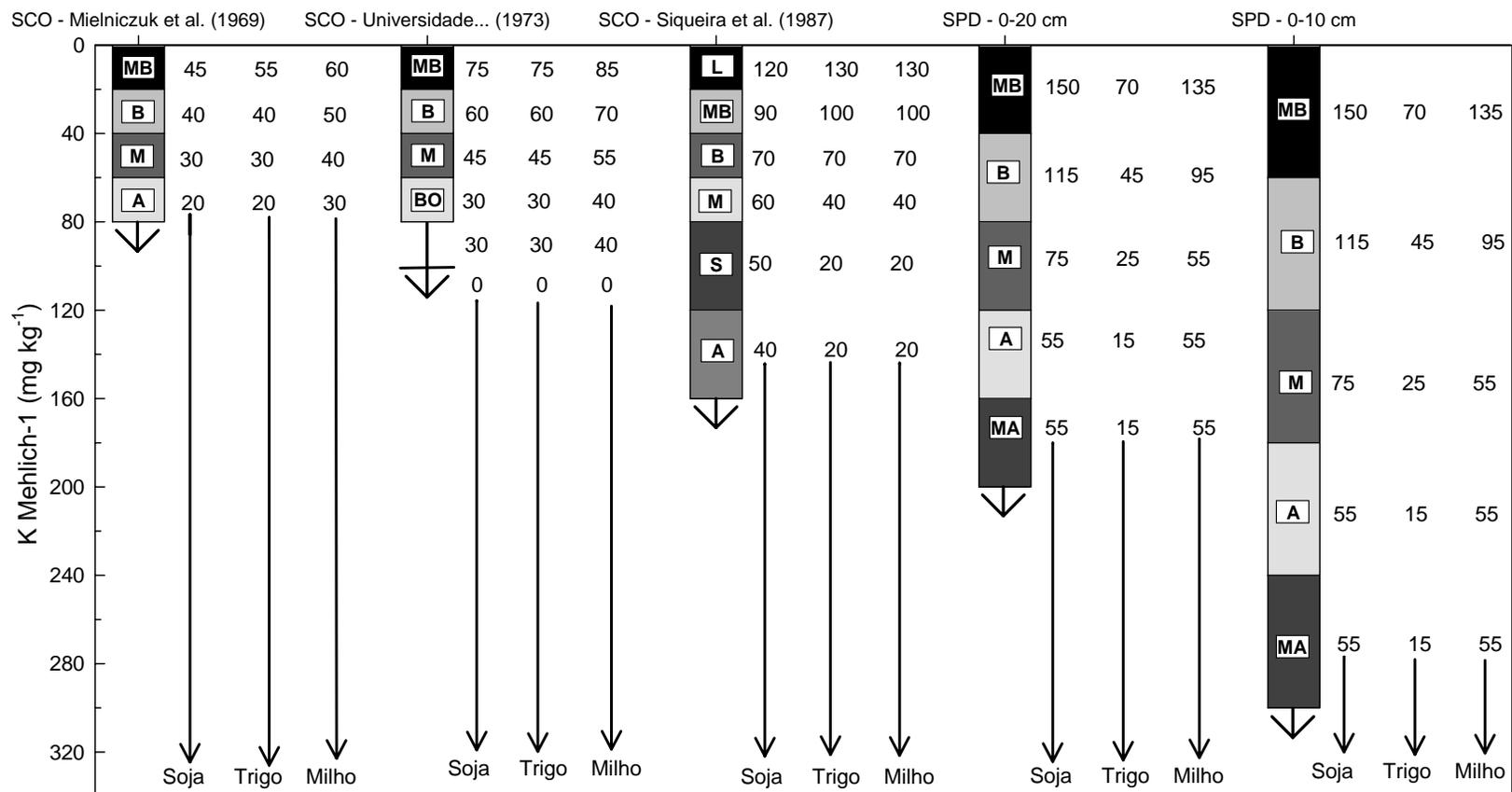


Figura 25. Doses de potássio em solos argilosos para o primeiro cultivo da soja, do trigo e do milho nas faixas de fertilidade (MB: muito baixo, B: baixo, M: médio, A: alto, MA: muito alto, BO: bom, L: limitante, S: suficiente), cultivadas sob SCO (sistema convencional, amostra de solo na profundidade de 0-20 cm) e sob SPD (sistema plantio direto, amostra de solo nas profundidades de 0-20 e 0-10 cm). Mielniczuk et al. (1969) e Universidade... (1973) valores estimados das doses de manutenção mais 1/8 da dose de correção, Siqueira et al. (1987) primeiro cultivo da soja, do trigo e do milho; no SPD primeiro cultivo da soja, do trigo e do milho e valor C a quantidade exportada pelos grãos baseado na expectativa de rendimento.

Siqueira, 1987; Comissão..., 1989, 1995) e o reflexo dessa no aumento da fertilidade dos solos no RS (Anghinoni & Bohnen, 1975; Tedesco et al., 1984; Drescher et al., 1995; Rheinheimer et al. 2001).

A Figura 22 mostra que, apesar das faixas de fertilidade serem mais amplas para os solos argilosos, as doses de  $P_2O_5$  recomendadas por Mielniczuk et al. (1969a) eram menores do que as recomendadas pela Universidade... (1973). Nas recomendações estabelecidas a partir de 1976 (Tabelas...,1976) houve o aumento de  $5 \text{ kg ha}^{-1}$  para a dose de  $P_2O_5$  na adubação de manutenção da soja e do trigo (não apresentado na Figura 22). No entanto as recomendações de Siqueira et al. (1987), reeditadas com as mesmas doses de  $P_2O_5$  pela Comissão... (1989, 1995), sugerem em geral doses menores do que a Universidade... (1973), especialmente nas faixas mais baixas de fertilidade. Em síntese, as doses de  $P_2O_5$  recomendadas em 1969 eram baixas, aumentaram nas recomendações de 1973 e 1976 e diminuíram a partir de 1987. Essas variações nas doses também se refletiram na evolução dos teores de fósforo disponível no solo. Em 1973 78,1% das análises de solo apresentavam teor de fósforo menor do que  $6 \text{ mg kg}^{-1}$  nos solos argilosos da região da grande Santa Rosa (Anghinoni & Bohnen, 1975); em 1981, com o aumento nas doses de  $P_2O_5$  em relação às de 1969, recomendadas a partir de 1973 e 1976, o percentual de solos com teores abaixo do teor crítico diminuiu para 76,4 (Tedesco et al., 1984); e em 1988, ainda sob a influência das recomendações de 1973 e 1976, o percentual de solos com teores abaixo do teor crítico diminuiu para 73 (Drescher et al., 1995). A partir das recomendações de Siqueira et al. (1987) e Comissão... (1989 e 1995), com a diminuição das doses de  $P_2O_5$  recomendadas para as culturas, verificou-se que de 1998-2000 o percentual de amostras de solo com teor de fósforo abaixo do teor crítico aumentou para 79,3 (Rheinheimer et al. 2001).

As doses de  $P_2O_5$  recomendadas pela Comissão... (1995) não foram suficientes para elevação da fertilidade do solo (conforme o critério tal destas recomendações), como pode ser visualizado na Figura 26a. Ao contrário, as doses recomendadas para as culturas da soja, trigo e milho, não foram suficientes para manter, após sete anos, os teores originais de fósforo da camada de 0-20 cm de profundidade. Este experimento foi conduzido em Santo Ângelo pela COTRISA-FUNDACEP (Item 5.2.2.1) desde 1994 até 2001 sob

sistema plantio direto de cultivo e com adubações feitas a lanço. Verifica-se pela Figura 26a que mesmo a dose de 4/3, ou seja, 33,3% maior do que a dose recomendada (3/3) não aumentou os teores de fósforo estimados pela função. Somente para a profundidade de amostragem de 0-10 cm houve aumento do teor de fósforo estimado (Figura 26b). Deve-se considerar ainda que as perdas de fósforo foram menores neste experimento do que seriam em um experimento sob sistema convencional. Assim mesmo, as doses de fósforo não foram suficientes para elevar a fertilidade ao patamar proposto pelas recomendações da Comissão... (1995).

Ao contrário das recomendações de fósforo, as recomendações de potássio (Figura 23) foram sempre crescentes ao longo do tempo. As recomendações de Mielniczuk et al. (1969a) eram relativamente baixas, pois os teores originais de potássio dos solos do RS estavam, em geral, acima do teor crítico ( $60 \text{ mg kg}^{-1}$ ). As doses foram aumentadas na recomendação de 1973 (Universidade..., 1973) e novamente em 1987 (Siqueira et al. (1987). Não há dados quantitativos do percentual de amostras de solo analisadas com teores abaixo do teor crítico até 1981, porém, segundo Mielniczuk et al. (1969a, b), a minoria dos solos apresentava teores abaixo do teor crítico. Em 1981 (Tedesco et al., 1984) e em 1988 (Drescher et al., 1995), pela influência das recomendações de 1973, o percentual de amostras de solo com teor de potássio abaixo de  $80 \text{ mg kg}^{-1}$  aumentou para 50,7 e 54,1, respectivamente. Após a implementação das recomendações de 1987 (Siqueira et al., 1987; Comissão..., 1989, 1995) com a recomendação de maiores doses de potássio, o percentual de amostras de solo com teores abaixo de  $80 \text{ mg kg}^{-1}$  no período de 1998-2000 diminuiu para 41,3 (Rheinheimer et al., 2001).

Nas recomendações anteriores a 1987 (Mielniczuk et al., 1969a; Universidade..., 1973; Tabelas..., 1976; Manual..., 1981) era utilizado o critério de adubação de máxima eficiência técnica, com uma recomendação de adubação de correção, para elevar da fertilidade até o teor crítico realizada a cada quatro ou cinco anos, acrescida de adubações de manutenção para cada cultura. A partir de 1987 (Siqueira et al. 1987; Comissão...,1989; 1995) houve a mudança de critério, introduzindo-se o conceito de adubação por

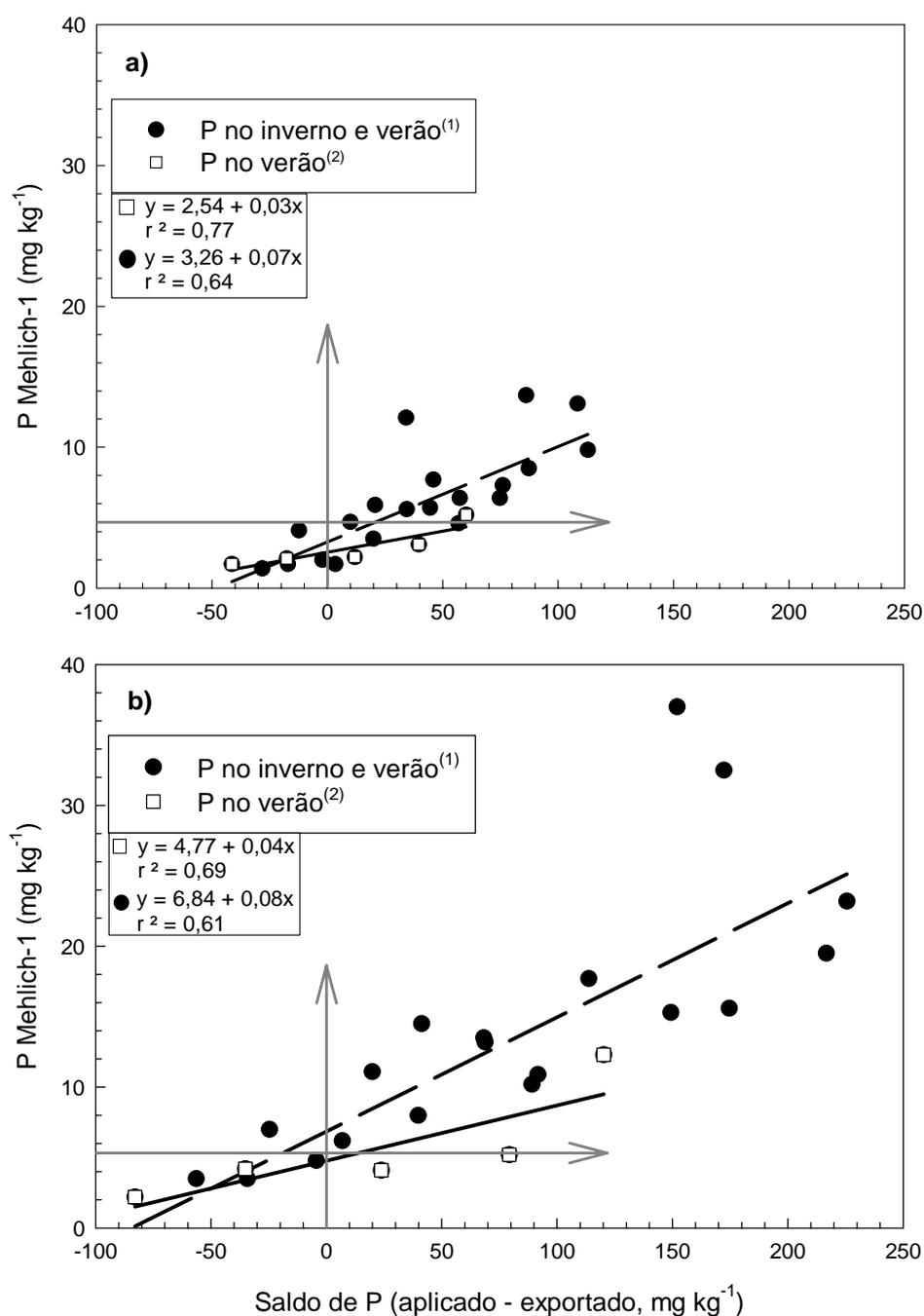


Figura 26. Fósforo no solo determinado por Mehlich-1 (seta na horizontal corresponde ao teor inicial, na implantação do experimento) em função do fósforo aplicado menos o exportado pelos grãos da soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo por sete anos em LVdf. Amostras de solo na camada a) 0-20 cm, b) 0-10 cm de profundidade. <sup>(1)</sup> aplicação de 0, 30, 60, 90 e 120  $\text{kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  nas parcelas principais apenas no início do experimento mais aplicações anuais de 0, 1/3, 2/3, 3/3 e 4/3 de  $\text{P}_2\text{O}_5$  da recomendação para as culturas de grãos (Comissão..., 1995), nas sub-parcelas; <sup>(2)</sup> aplicações anuais de 0, 1/3, 2/3, 3/3 e 4/3 de  $\text{P}_2\text{O}_5$  da recomendação para as culturas de grãos (Comissão..., 1995) nas sub-parcelas da parcela principal que não recebeu fósforo.

cultura com a elevação progressiva da fertilidade no período de três cultivos. Houve, a partir da utilização deste critério, uma diminuição na quantidade aplicada na primeira cultura.

O aumento dos teores de fósforo e potássio nas faixas de menor fertilidade do solo e de potássio nas demais faixas, observado por Rheinheimer et al. (2001), pode ser devido às menores perdas por erosão (Bertol et al., 1997; Seganfredo et al., 1997), em função do aumento da área de cultivo sob sistema plantio direto e/ou devido às amostras de solo serem feitas, em grande parte, na camada (0-10 cm) de maior concentração de fósforo e potássio. Um possível aumento de fertilidade atribuído apenas à profundidade de amostragem pode representar uma estimativa distorcida da real disponibilidade de nutrientes para as plantas que, atualmente, é avaliada pela calibração realizada em amostras retiradas na camada de 0-20 cm de profundidade.

Com base nos resultados dos levantamentos de fertilidade do solo no RS, realizados até o momento e comparando-os com as doses de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  recomendadas ao longo do tempo (de 1969 até 2003) pelos programas de fertilidade do solo no RS, verifica-se que a fertilidade do solo tem aumentado basicamente nas faixas mais baixas de fertilidade, e que o atual programa de fertilidade (Comissão..., 1995) pode não estar atingindo pelo menos um de seus objetivos, que é o de elevar a fertilidade até o teor crítico no período de três cultivos. Com isso, a probabilidade de rendimento relativo das culturas soja, trigo e milho se mantém abaixo de 90%, o que pode ser uma das causas dos baixos rendimentos médios dessas culturas no RS (IBGE, 2003).

Portanto, as doses de  $P_2O_5$  recomendadas para as culturas soja, trigo e milho sob sistema plantio direto de cultivo, estimadas neste trabalho são, em geral, maiores do que as recomendadas por Siqueira et al (1987) e pela Comissão... (1989, 1995) e menores do que as recomendadas pela Universidade (1973), especialmente nas faixas de maior fertilidade (Figura 22). No entanto, é provável que a utilização dessas doses pode elevar a fertilidade do solo e garantir altos rendimentos. (Tabela 39). O último levantamento de fertilidade (Rheinheimer et al., 2001) demonstra que os teores de potássio estão se elevando aos poucos com as atuais doses (Siqueira et al., 1987; Comissão, 1987, 1995). Porém, de maneira geral, as doses de potássio obtidas

neste trabalho são maiores e podem elevar a fertilidade em menor tempo (Tabela 40).

#### **5.4. CONCLUSÕES**

O teor crítico de fósforo e potássio em solos sob sistema plantio direto de cultivo com soja, trigo e milho é maior do que no atual programa de recomendações calibrado sob sistema convencional de cultivo, tanto para solos amostrados na camada 0-20, como na camada 0-10 cm de profundidade.

As doses dos fertilizantes fósforo e potássio são maiores para as culturas da soja e milho sob sistema plantio direto de cultivo do que no atual programa de recomendações calibrado no sistema convencional de cultivo.

As doses de potássio são menores para a cultura do trigo sob sistema plantio direto de cultivo do que no atual programa de recomendações calibrado sob sistema convencional de cultivo.

O método da resina apresentou coeficiente de determinação maior entre os teores de fósforo e menor entre os teores de potássio e o rendimento relativo das culturas, se comparado ao método Mehlich-1.

Os métodos da resina e Mehlich-3 apresentaram faixas de fertilidade mais amplas do que o método Mehlich-1, o que pode propiciar maior precisão nas recomendações de fertilizantes.

## 6. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os estudos-I, II e III foram realizados concomitantemente, o que possibilitou uma melhor compreensão dos mesmos na avaliação da extração de fósforo e potássio pelos métodos de análise de solo. Os estudos foram complementares, sendo executados à medida que necessários para entender os princípios de extração desses nutrientes em diferentes solos e sua disponibilidade para as plantas.

O método da resina é considerado por muitos autores, como o mais eficiente na determinação do fósforo disponível para as plantas. É dito também que o mesmo não é afetado por fatores de solo e de ambiente como é o método Mehlich-1. No entanto, demonstrou-se no estudo-I que a extração de fósforo é afetada tanto pelo teor de fósforo do solo como o de argila, verificada no estudo-III (Tabelas 21 e 22). Como esses fatores podem influenciar de modo diferente os diferentes métodos, não foi possível estabelecer um índice de equivalência entre os métodos Mehlich-1 e a resina de troca iônica. É possível que em outro trabalho, com a utilização de um número muito maior de solos, esse índice de equivalência possa ser obtido.

O estudo de equivalência baseou-se nos dados obtidos por Miola (1995) e Kroth (1998) que mostram uma linearidade da equação de correlação entre os valores obtidos pela resina e pelo método Mehlich-1. Entretanto, os dados dos próprios autores indicam maior relação P resina:P Mehlich-1 em solos argilosos, se comparada aos solos arenosos, evidenciando a necessidade de mais de um valor de índice de equivalência ou uma equação para a variação de teor de argila.

No estudo-I foi obtida a relação P resina:P Mehlich-1 maior para solos argilosos, sendo para os solos mais arenosos menor do que 1. Relações menores do que 1 deve ser, provavelmente, pelos altos teores de fósforo nesses solos, onde método Mehlich-1 extrai mais fósforo, devido à maior

capacidade de extração seletiva pela acidez e pela menor readsorção (Kamprath & Watson, 1980). A relação média encontrada (1,1 – Tabela 1) foi muito baixa, sugerindo a hipótese de que o teor crítico de fósforo ( $20 \text{ mg kg}^{-1}$ ) estabelecido pela Comissão... (2003) para a resina é muito alto, ou os teores críticos estabelecidos pela Comissão... (1995) para fósforo com método Mehlich-1 em solos com diferentes classes de argila são muito baixos.

No estudo-II, a relação P resina:P Mehlich-1 foi de 1,3 (Tabela 4), um pouco superior ao do estudo-I, para apenas 5 solos com baixos e altos teores de fósforo. Esta relação foi mais próxima da relação encontrada no estudo-III, entre o teor crítico de fósforo de ambos os métodos calibrados (1,5 – Tabela 19).

Os resultados obtidos no estudo-III indicam que os teores críticos para o método Mehlich-1 e para o método da resina estão subestimados. Para o método Mehlich-1, na camada 0-20 cm de profundidade de um solo classe 1, o teor crítico passou de 6,0 para  $7,5 \text{ mg kg}^{-1}$  devido, provavelmente, à maior necessidade de nutrientes das variedades mais produtivas cultivadas atualmente. Para o método da resina, o teor crítico obtido para todos os solos independentemente do teor de argila foi de  $25 \text{ mg kg}^{-1}$ , maior do que o definido pela Comissão... (2003) - ( $20 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Este aumento pode ser devido ao aumento do potencial de rendimento das culturas, uma vez que as avaliações feitas por Siqueira et al. (2000), que definiram este teor crítico, foram realizadas a partir de experimentos conduzidos nas décadas de 1970 e 1980. Pode também ser devido às diferenças de metodologia do próprio método da resina, pois Siqueira et al. (2000) utilizaram resina em esferas.

No estudo-II os coeficientes de determinação obtidos pela relação entre o fósforo absorvido pelas plantas de milho e de arroz e o extraído pelo método da resina foram inferiores, em média, aos obtidos com o método Mehlich-1. No entanto, no estudo-III o método da resina foi superior ao método Mehlich-1, tanto para os solos em conjunto quanto para os solos separados por classes texturais e amostrados na profundidade de 0-20 cm. Em ambos os estudos o método Mehlich-3 foi eficiente para a quantificação da disponibilidade de fósforo para as culturas.

As doses dos fertilizantes fosfatados e potássicos, estimadas no estudo-III, são maiores para as culturas soja e milho sob sistema plantio direto

de cultivo, entretanto são menores para o trigo. Isto acarreta uma diminuição na dose final recomendada para uma seqüência de culturas, a partir do efeito residual, principalmente para os fertilizantes potássicos, cujas doses são menores e o ciclo é iniciado com a cultura do trigo. Para contornar este problema, recomenda-se a análise de solo antes da cultura de verão e que a seqüência de cultivos seja iniciada com soja ou milho adicionando-se, no terceiro cultivo (novamente no verão), 20 a 30% mais de potássio.

As menores doses de fósforo e potássio foram indicadas para cultura do trigo. Conclui-se que esta é mais eficiente e responde mais à aplicação de fertilizantes (Tabelas 14, 17) sendo a cultura com menor rendimento médio das três utilizadas neste estudo (Emater/RS, 1998; Emater/RS, 2003). Devido a sua eficiência e ao seu menor rendimento, o trigo necessita de menores doses, o que está de acordo com a necessidade dos nutrientes fósforo e potássio no tecido da mesma (Raij et al., 1997) e com a exportação pelos grãos (Raij et al., 1997; Wiethölter et al., 1998).

O trigo cultivado sob sistema plantio direto é a cultura que apresenta o menor retorno econômico para o produtor (26,48 U\$ ha<sup>-1</sup>), se comparado à culturas soja (164,00 U\$ ha<sup>-1</sup>) e milho (149,00 U\$ ha<sup>-1</sup>), com um rendimento médio de 2400, 2400 e 4500 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (FECOAGRO, 2002). Além disto, o trigo é a cultura com mais alto risco de frustração de safra, pois é mais suscetível à alterações nos fatores climáticos. O resultado dessa conjuntura, associado à política econômica para a agricultura, resultou em uma grande variação e na diminuição da área de cultivo no RS, passando de mais de 2 milhões de ha em 1976 e 1978 a menos de 300 mil ha em 1995. A área média de cultivo do trigo no RS nos últimos anos está ao redor de 700 mil ha (Emater/RS, 1998; Emater/RS, 2003).

Ao contrário do trigo, a soja e o milho apresentaram menor variabilidade anual de área cultivada e os riscos de frustração de safra também são menores. Os menores rendimentos históricos dessas culturas no RS nos últimos anos foram de 712, 395 e 1139 kg ha<sup>-1</sup> para a soja, trigo e milho, nos anos de 1991, 1982 e 1991, respectivamente (Emater/RS, 1998; Emater/RS, 2003).

Muitos agricultores no RS deixam de cultivar trigo em parte das suas áreas, no período de inverno, por ser uma cultura de baixa produtividade,

alto risco e de baixo retorno financeiro. Quando plantam, normalmente investem menos recursos (fertilizantes corretivos, manejos, etc), obtendo rendimentos menores. Outros produtores preferem investir em pastagens para engorda de bovinos, para a produção de leite, ou simplesmente para a cobertura de solo com a produção de palhada. Entretanto, no verão, as áreas são intensamente aproveitadas, cultivadas com soja e milho, preferentemente a primeira, sem a rotação de culturas recomendada no sistema plantio direto (2/3 soja para 1/3 de milho).

De maneira geral todas as hipóteses do estudo-III foram confirmadas havendo a necessidade de mais estudos a campo para testar e validar os resultados obtidos. Este estudo foi realizado com poucos experimentos e muitos conduzidos sob diferentes tratamentos, modos de adubação, anos de estudo e outras situações não controladas, pois alguns objetivos de condução de alguns experimentos, eventualmente, não eram para estudos de calibração. Desta forma, as diferenças nos fatores que podem influenciar no rendimento das culturas também geram incertezas nos resultados, especialmente nos coeficientes de determinação das curvas de calibração de potássio.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ V., V.H. **Avaliação da fertilidade do solo: superfície de resposta – modelos aproximativos para expressar a relação fator resposta.** Viçosa: Departamento de Solos da Universidade de Viçosa, 1991. 75p.

AMER, T.; BOULDING, 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.

ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2001.** São Paulo, 1987-2001.

ANGHINONI, I.; BOHNEN, H. Avaliação da disponibilidade de fósforo para os solos do Rio Grande do Sul. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.1, p.127-136, 1974.

ANGHINONI, I.; BOHNEN, H. Levantamento da fertilidade dos solos da grande Santa Rosa. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.11, p.289-301, 1975.

ANGHINONI, I.; SALET, L.R. Amostragem do solo e as recomendações de adubação e calagem no sistema plantio direto. In: NUERNBERG, N. J. (Ed.). **Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto.** Lages: Núcleo Regional Sul/SBCS, 1998. p.27-52.

ANGHINONI, I.; VOLKWEIS, J.S. Recomendações de uso de fertilizantes. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1984, Brasília. **Anais...**Brasília: EMBRAPA/DEP, 1984. p.179-204.

BARBER, S.A. A diffusion and mass-flow concept of soil nutrient availability. **Soil Science**, Baltimore, v.93, p.39-49, 1962.

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach.** 2. ed. Toronto: J. Willey, 1995. 414p.

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

BAYER C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solo**. 1996. 240f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BERTOL, I.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. Erosão hídrica em diferentes preparos do solo logo após as colheitas de milho e trigo, na presença e na ausência dos resíduos culturais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.409-418, 1997.

BLACK, A.B. **Soil fertility evaluation and control**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1993. 746p.

BORKERT, C.M.; SFREDO, G.J.; SILVA, D.N. Calibração de potássio trocável para a soja em Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, p.223-226, 1993.

BOYD, D.A.; YUEN, L.T.K.; NEEDHAM, P. Nitrogen Requirement of cereals. 1 response curves. **Journal Agricultural Science**, Cambridge, v.87, p.149-162, 1976.

BRAGA, J.M. **Avaliação da fertilidade do solo**: Ensaio de campo. Viçosa: UFV, 1983. 101p.

BRAIDA, J.A.; CAMARGO, F.A. de O.; ROSSO, I.J. et al. Comparação de métodos de determinação da disponibilidade de fósforo do solo para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.345-347, 1996.

BRASIL, E.C.; MURAOKA, T. Extratores de fósforo em solos da Amazônia tratados com fertilizantes fosfatados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.25, p.599-606, 1997.

BRAY, R.H. Confirmation of the nutrient mobility concept of soil plant relationships. **Soil Science**, Baltimore, v.95, p.124-130, 1963.

CASSOL, P.C. **Eficiência fertilizante de estrumes de bovinos de leite e frangos de corte como fonte de fósforo às plantas**. 1999. 162f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

CATE, R.B. **Minimização de custos unitários como uma base de recomendações para adubação**. Raleigh: North Carolina State University, 1969. 29p (Relatório Preliminar, 3).

CATE, R.B.; NELSON, L.A. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. **Soil Science Society American Procedure**, Madison, v.35, p.658-660, 1971.

CATE, R.B.; NELSON, L.A. **Discontinuous models for rapid correlation, interpretation and utilization of soil analysis and fertilizer response data.** International soil fertility evaluation and improvement program [S.I.], North Carolina, 1973. 77p. (Technical Bulletin, 7).

CERRATO, M.E.; BLACKMER, A.M. Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. **Agronomy Journal**, Madison, v.82, p.138-143, 1990.

COLWELL, J.D. Calibration and assessment of soil tests for estimating fertilizer requirements- I Statistical models and tests of significance. **Australian Journal of Soil Research**, Canberra, v.5, p.275-293. 1966.

COLWELL, J.D. **Estimating fertilizer requirements a quantitative approach.** Acton: CAB INTERNATIONAL, 1994. 262p.

COLWELL, J.D.; SUHET, A.R.; RAIJ, B.van. **Statistical procedures for developing general soil fertility models for variable regions.** Camberra: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1988. 68p. (Division of Soil divisional report, 93).

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** 2. ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul: EMBRAPA/CNPT, 1989. 128p.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** 3. ed. Passo Fundo: SBCS - Núcleo Regional Sul: EMBRAPA/CNPT, 1995. 224p.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** Porto Alegre: SBCS - Núcleo Regional Sul: UFRGS, 2003. (noprolo).

CORDEIRO, D.S.; PÖTTKER, D.; BORKERT, C.M. et al. Efeito de níveis e fontes de fósforo na produção e no rendimento econômico da soja na região de Dourados (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.3, p.100-105, 1979.

COREY, R.B. Soil test procedures: correlation. In: BROWN, J.R. (Ed) **Soil testing: sampling, correlation, calibration and interpretation.** Madison: SSSA, 1987. p.15-22. (Special Publication, 21).

DAHNIKE, W.C.; OLSON, R.A. Soil test correlation, calibration and recommendation. In: WESTWERMANN, R.L. (Ed.). **Soil Testing and Plant Analysis.** 3. ed. Madison: SSSA, 1990. p.45-73.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; PÖTTKER, D. et al. Projeto Metas - Um caso de sucesso na aplicação do modelo de pesquisa e desenvolvimento. In: REUNIÃO SUL BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO - MANEJO SUSTENTÁVEL DO SOLO, 2., 1998, Santa Maria. **Resumos Expandidos**. Santa Maria: NRS/SBCS, 1998. p.263-268.

DRESCHER, M.; BISSANI, C.A.; GIASSON, E. et al. **Avaliação da fertilidade dos solos do estado do Rio Grande do Sul e necessidades de corretivos e corretivos**. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 24p. (Boletim Técnico, 7).

ECKER, D.J. Site-specific soil tests and interpretations for potassium. In: HAVLING, J.L.; JACOBSEN, J.S. **Soil Testing**: prospects for improving nutrient recommendations. Madison: SSSA-ASA, 1994. p.163-171 (SSSA Special Publication, 40).

ECKERT, D.J. Chemical attributes of soils subjected to no-till cropping with rye cover crop. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.77, p.789-792, 1991.

ELTZ, F.L.P.; PEIXOTO, R.T.G.; JASTER F. Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades físicas e químicas de um latossolo bruno álico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.13, p.259-267, 1989.

EMATER/RS. **Área plantada e rendimento das principais culturas**, Porto Alegre: Emater/RS-DEPLAN/DIDOC, 1998 (Tabelas não publicadas).

EMATER/RS. **Resultados das safras desde 1941**: consulta das médias estaduais. Disponível em <<http://www.emater.tche.br>>. Acesso em 20 de janeiro de 2003.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1997. 212p.

EVANS, E.E. Soil test calibration. In: BROWN, J.R. (ED) **Soil testing**: sampling, correlation, calibration and interpretation. Madison: SSSA, 1987. p.23-29 (Special Publication, 21).

FARIAS, A.D.; FERREIRA, T.N. Sistema plantio direto no Rio Grande do Sul. **Informativo da EMATER – RS**, Porto Alegre, v.18, n.7, p.1-3, 2000.

FECOAGRO/RS – Federação das Cooperativas Agropecuárias do Rio Grande do Sul LTDA. **Custo de produção, lavouras em plantio direto**. Porto Alegre, 2002. n.61, 32p.

FITTS, J.W. Research + extension = bigger farmer profit. **Plant Food Review Journal**, Atlanta, v.5, p.10-12, 1959.

FIXEN, P.E.; GROVE, J.H. Testing Soil for phosphorus. In: WESTWERMANN, R.L. (Ed.). **Soil Testing and Plant Analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1990. p.141-180.

FOLE, D.A.; GRIMM, S.S. Avaliação do efeito residual do fósforo por meio de métodos de extração e modelos matemáticos no oxissolo passo fundo. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.2, p.205-221, 1973.

GALRÃO, E.Z.; VOLKWEISS, S.J. Disponibilidade de fósforo do solo para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.5, p.114-118, 1981.

GOEPFERT, C.F.; SALIM, O.; MOURA, R.L. Experimento de níveis de N, P, K e calcário, e do efeito residual da adubação e da manutenção com fósforo e potássio no rendimento de trigo em solo Camaquã. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.10, p.178-188, 1974a.

GOEPFERT, C.F.; SALIM, O.; OSÓRIO, C.A.S. Experimento de calibração na cultura do milho (zea mays) em solo Bela Vista. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.1, p.21-29, 1974b.

GRIMM, S.S. **Aspectos econômicos da adubação**. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia da UFRGS, 1970. 14p. (Boletim técnico, 6).

HAUSER, G.F. **Guide to the calibration of soil tests for fertilizer recommendations**. Rome: FAO. 1985. 71p. (FAO Soils Bulletin, 18).

IBGE. **SIDRA – Banco de dados agregados**. Disponível na Internet: <<http://www.sidra.ibge.gov.br> > Acesso em 20 de janeiro de 2003.

IRGA. **Arroz irrigado**: recomendações técnicas da pesquisa para o Rio Grande do Sul do Brasil. Porto Alegre: IRGA, 2001. 128p.

KAMPRATH, E.J.; WATSON, M.E. Conventional soil and tissue test for assessing the phosphorus status of soil. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Eds.) **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: ASA, 1980. p.433-469.

KIDDER, G. Methodology for calibration soil test. **Soil and Crop Science Society of Florida**, Gainesville, v.52, p.70-73, 1993.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Modos de adubação, absorção de nutrientes e rendimento de milho em diferentes preparos de solo. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v.2, p.79-86, 1996.

KLEPKER, D. **Distribuição de fósforo e raízes e sua relação com o estresse hídrico e o crescimento do milho**. 1996. 187 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

KOCHHANN, R.; ANGHINONI, I.; MIELNICZUK, J. **Adubação fosfatada no Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. In: ADUBAÇÃO fosfatada no Brasil. Brasília: [s.n.], 1982. P.29-60.

KROTH, P.L. **Disponibilidade de fósforo no solo para as plantas e fatores que afetam a extração por resina de troca em membranas.** 1998. 167f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

KUSSOW, W.R.; CORUM, K.R.; DALL'ACQUA, F.M. **Interpretação agro-econômica de ensaios de adubação.** Goiânia: EMBRAPA, 1976. 49p. (Boletim Técnico, 4).

LANTMANN, A.F.; ROESSING, A.C.; SFREDO, M.C.N.O. et al. **Adubação fosfatada e potássica para a sucessão soja-trigo em Latossolo Roxo distrófico sob semeadura direta.** Londrina: Embrapa Soja, 1996. 44p. (Circular Técnica, 15).

LE MOS, C.A.S.; ANGHINONI, I.; VOLKWEISS, S.J. Efeito residual do fósforo e suas relações com a granulação do superfosfato triplo e com o revolvimento do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.11, p.161-166, 1987.

LIANG, J.; SCHOENAU, J.J. Speciation in metal contaminated soil as revealed by an ion exchange resin membrane fractionation procedure. **Communication Soil Science Plant Analysis**, New York, v.27, p.3013-3026, 1996.

MAGALHÃES, A.F. Uso de resina de troca aniônica na avaliação do fósforo "disponível" para as plantas. II – estudo comparativo com a solução de Mehlich (Carolina do Norte). **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.1, p. 171-176, 1974.

MAGALHÃES, A.F.; GALLEGO, M.S. Uso de resina de troca aniônica na avaliação do fósforo "disponível" para as plantas. I – adaptabilidade do método para alguns solos do Rio Grande do Sul. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.1, p.117-125, 1974.

MANUAL de adubação e calagem para cultivos agrícolas do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. **Trigo e Soja**, Porto Alegre, v.56, p.1-34, 1981.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants.** 2. ed. San Diego: ACADEMIC PRESS, 1995. 889p.

MARTINS, J.R.; GONÇALVES, C.N. Estudo da adsorção em diferentes profundidades de um solo sob cultivo convencional e plantio direto. In CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: CBCS, 1997. 4p. CD-ROM.

MEHLICH, A. **Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH<sub>4</sub> by North Carolina Soil Testing Laboratories.** Raleigh: University of North Carolina, 1953. (mimeografado).

MEHLICH, A. Mehlich 3 soil test extractant: a modification of Mehlich 2 extractant. **Communication in Soil Science Plant Analysis**, New York, v.15, p.1409-1416, 1984.

MIELNICZUK, J. Análise do solo e sua interpretação. In: GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; TEDESCO, M.J. **Princípios de fertilidade do solo**, Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. p.33-46.

MIELNICZUK, J.; LUDWICK, A.; BOHNEN, H. **Recomendações de adubo e calcário para as principais culturas do Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia e Veterinária da UFRGS, 1969a. 36p. (Boletim Técnico, 2).

MIELNICZUK, J.; LUDWICK, A.; VOLKWEIS, S. et al. **Estudos iniciais de calibração de análises para fósforo e potássio do solo com a cultura do trigo**. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia e Veterinária da UFRGS, 1969b. 10p. (Mimeografado).

MIELNICZUK, J.; SELBACH, P.A. Capacidade de suprimento de potássio de seis solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.2, p.115-120, 1978.

MIOLA G.R.; BISSANI, C.A.; TEDESCO, M.J. Estimativa da disponibilidade de fósforo em solos através dos métodos Mehlich-1, resina e difusão. In: REUNIÃO SUL BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 1994, Pelotas. **Resumos...** Pelotas: NRS-SBCS, 1994. p.33-34.

MIOLA, G.R. **Extração de P, K, Ca e Mg do solo por diferentes métodos e avaliação da disponibilidade de P para as plantas**. 1995. 127f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

MODEL, N.S.; ANGHINONI, I. Resposta do milho a modos de aplicação de adubos e técnicas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v.16, p.55-59, 1992.

NACHTIGALL, G.R.; VAHL, L.C. Capacidade de suprimento de potássio dos solos da região sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, p.37-42, 1991.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: [s.n.], 1999. 399p.

OLIVEIRA, E.L. **Influência da calagem e do revolvimento do solo nos efeitos imediatos e residuais da adubação fosfatada**. 1981. 74f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1981.

OLIVEIRA, V. de. **Formas de potássio em 21 solos do Rio Grande do Sul e sua capacidade de suprir potássio às plantas**. 1970. 91f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1970.

OLIVER, S.; BARBER, S.A. An evaluation of the mechanisms governing the supply of Ca, Mg, K and Na to soybean roots (*Glycine max*). **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.30, p.82-86, 1966.

OLSEN, S.R.; SOMMERS, L.E. Phosphorus. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. **Chemical and microbiological properties**. 2 ed. Madison: SSSA, 1992. p.403-430.

OLSON, R.A.; FRANK, K.D.; GRABOUSKI, P.H. et al. Economic and agronomic impacts of varied philosophies of soil testing **Agronomy Journal**, Madison,v.74, p.492-499, 1982.

OLSON, R.A.; ANDRESON, F.N.; FRANK, K.D.; et al. Soil testing interpretation: sufficiency vs. build-up and maintenance. In: BROWN, J.R. (ED) **Soil testing: sampling, correlation, calibration and interpretation**. Madison: SSSA, 1987. p.41-52. (Special Publication, 21).

OLSON,R.A.; VOSS, R.D.; WARD,R.C. The philosophy of soil testing. **National Corn Handbook**. Purdue: University, v.2, p.1-4, 1984.

PATELLA, J.F. **Sugestões para adubação**: Rio Grande do Sul. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 1972. 8p (mimeografado).

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

PETRERE, C.; SALET, R.L.; ANGHINONI, I. Produtividade de culturas nos sistemas plantio direto e convencional no sul do Brasil. In: REUNIÃO SUL BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 1996, Lages. **Resumos Expandidos**. Lages: NRS/SBCS, 1996. p.74-76.

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

PÖTTKER, D. **Aplicação de fósforo no sistema plantio direto**. Passo Fundo: EMBRAPA Trigo, 1999. 32p. (EMBRAPA Trigo. Boletim de Pesquisa, 2).

RAIJ, B. van. Seleção de métodos de laboratório para avaliar a disponibilidade de fósforo em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.2, p.1-9, 1978.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres: Potafos, 1991. 343p.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 2001. 284p.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2ed. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim técnico, 100).

RAIJ, B. van; FEITOSA, C.T. Correlação entre o fósforo extraído de solos por diversos extratores químicos e o absorvido pelo milho. **Bragantia**, Campinas, v.39, p.51-57, 1980.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A. Extractable phosphorus availability indices affected by liming. **Communication in soil Science of Plant Analysis**, New York, v.21, p.1267-1276, 1990.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J.A.; SILVA, M.N. Extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soil by an ion-exchange resin procedure **Communication in soil Science of Plant Analysis**, New York, v.17, p.547-566, 1986.

REIN, T.A. **Estimativa do fluxo difusivo de fósforo nos solos e avaliação de sua disponibilidade às plantas**. 1991. 170f. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI.J.; et al. **Situação da fertilidade dos solos do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Departamento de Solos da UFSM, 2001. 41p. (Boletim Técnico, 2).

RODRIGUES, A.N.A.; VOLKWEISS, S.J.; ANGHINONI, I. Efeitos imediatos e residuais do superfosfato triplo sobre o rendimento de matéria seca e absorção de fósforo por aveia forrageira em solo podzólico vermelho-escuro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.9, p.219-224, 1985.

ROUSE, R.D. **Soil test theory and calibration for cotton, corn, soybean and coastal Bermuda grass**. Auburn: Agricultural Experiment Station Auburn University, 1968. 65p. (Technical Bulletin, 375).

SALET, R.L.; PAVINATO, A.; ALCANTARA, M.A.K. Métodos de avaliação da disponibilidade de fósforo para as plantas em solos argilosos do Rio Grande do Sul. In: REUNIÃO SUL BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 1994, Pelotas. **Resumos...** Pelotas: NRS-SBCS, 1994. p.31-32.

SANCHES, P.A.; UEHARA, G. Management consideration for acid soil with high phosphorus fixation capacity. In: KHASAWNEH, F.R.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: SSSA, 1980. p.471-514.

SCHERER, E.E. Resposta da soja à adubação potássica em latossolo húmico distrófico num período de doze anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.49-55, 1998.

SCHLINDWEIN, J. A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; PIVOTTO, A. Efeito da temperatura na extração de fósforo do solo. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 4., 2002., Porto Alegre, RS. **Resumos Expandidos**. Porto Alegre: SBCS/NRS, 2002. 4p. CD-ROM.

SCHLINDWEIN, J.A.; ANGHINONI, I. Variabilidade vertical de fósforo e potássio disponíveis e profundidade de amostragem do solo no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, p.611-617, 2000.

SCHOENAU, J.; GREER, K. Field mapping of soil nutrient supply rates. **Better Crops with Plant Food**, Atlanta, v.80, p.12-17, 1996.

SCHOLLES, D.; ANGHINONI, I.; STAMMEL, J.G. Efeito residual da adubação fosfatada no rendimento, teor de P do tecido de forrageiras tropicais e no P "disponível" do solo. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.2, p.303-310, 1978.

SEGANFREDO, M.L.; ELTZ, F.L.F.; BRUM, A.C.R. de. Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em sistemas de culturas em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.287-291, 1997.

SFREDO, G.D.; WINKLER, H. Efeito da calagem e da adubação fosfatada sobre a produção do trigo e a disponibilidade de fósforo em quatro unidades de solo no estado de Santa Catarina. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.5, p.1-13, 1979.

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

SILVA, R.J.S. **Metodologia de avaliação da disponibilidade de fósforo em solos alagados**. 1996. 57f. Dissertação (Mestrado - Solos) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1996.

SILVA, W.M.; FABRICIO, M.C.; MARCHETTI, M.E. et al. Extratores de fósforo em dois Latossolos do Mato Grosso do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBCS, 1997. 3p. CD-ROM.

SIMS, J.T. Soil fertility evaluation In: SUMMER, M.E. **Handbook of Soil Science**. New York: Boca Raton, p.D-113- D-153, 1999.

SINGH, T.A.; THOMAS, G.W.; MOSSCHLER, W.W.; MARTENS, D.C. Phosphorus uptake by corn (*Zea mays* L.) under no-tillage conventional practices. **Agronomy Journal**, Madison, v.58, p.147-148, 1996.

SIQUEIRA, O.J.F de; SCHERER, E.E.; TASSINARI, G. et al. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Passo Fundo: EMBRAPA/CNPT, 1987. 100p.

SIQUEIRA, O.J.W. de; PERUZZO, G.; KOCHHANN, R.A. et al. Comparação de métodos analíticos para fósforo extraível do solo e desdobramentos para avaliação da sua disponibilidade – RS/SC. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 24.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 6.; SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 4.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 3., 2000, Santa Maria, RS. **Resumos...** Santa Maria: Fertibio, 2000. 5p. CD-ROM.

SKOGLEY, E.O.; GEORGITIS, S.J.; YANG, E.J. et al. The phytoavailability soil test-PST. **Communication in Soil Science Plant Analysis**, New York, v.21, p.1229-1243, 1990.

SOUSA, D.M.G. **Reações de grânulos de superfosfato triplo em solos e seus efeitos imediatos e residuais sobre as culturas**. 1980. 89f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1980.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIM, R.S.D. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER-RS: UFRGS, 2002. 107p.

TABELAS de adubação corretiva e adubação de manutenção para solos e culturas dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. **Trigo e Soja**, Porto Alegre, v.10, p.15-23, 1976.

TEDESCO, M.J. GOEPFERT, C.F.; LANZER, E. et al. Avaliação da fertilidade dos solos do Rio Grande do Sul. **Agronomia Sulriogradense**, Porto Alegre, v.20, p.179-184, 1984.

TEDESCO, M.J.; BOHNEN, H.; SOUZA, L.F.C.; PATELLA, J.F. A rede oficial de laboratórios de análise do solo dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina – passado e presente In: REUNIÃO SUL BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 1994, Pelotas. **Resumos...** Pelotas: NRS-SBCS, 1994. p.1-4.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 147p. (Boletim Técnico, 5).

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. et al. **Soil Fertility and fertilizers**. 5.ed. New York: Macmillan, 1993. 634p.

TRANT, T.S.; GIROUX, M.; GUILBEAUT, J.; AUDESS, P. Evaluation of Mehlich-III extractant to estimate the available P in Quebec Soils. **Communication Soil Science Plant Analysis**, New York, v.21, p.1-28, 1990.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Faculdade de Agronomia. Departamento de Solos. **Tabelas de adubação corretiva e adubação de manutenção para os solos e culturas dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Porto Alegre, 1973. 11p. (Boletim Técnico).

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Laboratório de Solos dos Cursos de Pós-Graduação da Faculdade de Agronomia e Veterinária. **Recomendações de adubação**. Porto Alegre, 1968. 3p. (mimeografado).

VARGAS, R.M.B.; MEURER, E.J.; ANGHINONI, I. Mecanismos de suprimento de fósforo, potássio, cálcio e magnésio às raízes de milho em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.143-148, 1983.

VIDOR, C.; FREIRE, J.R.J. Calibração de análises de solo para a cultura da soja. **Agronomia Sulriogradense**, Porto Alegre, v.10, p.63-72, 1974.

VIDOR, C.; FREIRE, J.R.J.; GONÇALVES, H.M.; et al. Análise de um grupo de experimentos de adubação com fósforo, potássio e calcário em *Glycine max* (L) Merrill. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 9, p.33-39, 1973.

WAGONER, P.E.; NORVELL, W.A. Fitting de law of the minimum to fertilizer application and crop yields. **Agronomy Journal**, Madison, v.71, p.352-354, 1979.

WIETHÖLTER, S. Controle de qualidade de análises de solo da ROLAS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBCS, 1997. 3p. CD-ROM.

WIETHÖLTER, S. Controle de qualidade de análises de solo da rolas na internet e dados de 1991 a 2001 In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 4., 2002., Porto Alegre, RS. **Resumos Expandidos**. Porto Alegre: SBCS/NRS, 2002. 5p. CD-ROM.

WIETHÖLTER, S.; BEN, J.R.; KOCHHANN, R. et al. Fósforo e potássio no solo no sistema plantio direto. In: NUERNBERG, N. J. (Ed.). **Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto**. Lages: Núcleo Regional Sul/SBCS, 1998. p.121-149.

WILCOX, O.W. Verification of the Mitscherlich effect law. **Agronomy Journal**, Madison, v.42, p.225-229, 1949.

YANG, J.E.; SKOGLEY, E.O.; SCHAFF, B.E. Nutrient flux to mixed-bed ion exchange resin: temperature effects. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.55, p.762-767, 1991.

YOST, R.S.; KAMPRATH, E.J.; LOBATO, E. et al. Phosphorus response of corn on an oxisol as influenced by rates and placement. **Soil Science society of American Journal**, Madison, v.43, p.338-343, 1979.

## **8. APÊNDICES**

## Apêndice 1. Extração e determinação de fósforo e de potássio do solo com resinas de troca iônica em membrana

### 1.1. Soluções

a) HCl 0,5mol L<sup>-1</sup>:

diluir 42mL de HCl concentrado a 1L com água destilada.

b) NaHCO<sub>3</sub> 0,5mol L<sup>-1</sup>:

pesar 42g de NaHCO<sub>3</sub> e diluir a 1L com água destilada. Medir o pH e ajustá-lo para 8,5 com NaOH 20% ou HCl 50%. Preparar no dia de uso e manter em frasco fechado (para evitar perda de CO<sub>2</sub>).

c) Solução de molibdato de NH<sub>4</sub> 0,38%:

dissolver 3,8g de molibdato de amônio ((NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>.4H<sub>2</sub>O) em 150mL de água destilada. Adicionar 35mL de HCl concentrado e complementar o volume a 1L. Usar no máximo em 30 dias.

d) Solução redutora ANS: (ácido 1-amino-2-naftol-4-sulfônico, sulfito de sódio e metabissulfito de sódio):

preparar um estoque de pó redutor, misturando e triturando em um almofariz: 2,50g de 1-amino-2-naftol-4-sulfônico + 5,0g de sulfito de sódio (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) + 146,0g de metabissulfito de sódio (Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Guardar em vidro fosco recoberto com folha de alumínio, por no máximo 40 dias. Dissolver 32g do pó redutor em 200mL de água destilada morna (50-60 °C) em copo de Becker. Transferir para um vidro escuro e deixar em repouso até cristalizar (3-6 dias). Filtrar antes do uso. Usar por um período máximo de 3 semanas.

e) Padrão misto de P e K (60mg L<sup>-1</sup> de P e 120mg L<sup>-1</sup> de K):

pesar 2,637g de KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> e 0,838g de KCl (seco a 105°C por 1 hora) e diluir a 1L com água destilada (esta solução contém 600mg L<sup>-1</sup> de P e 1200mg L<sup>-1</sup> de K). Diluir 100mL desta solução a 1L de água destilada.

f) Padrão de Ca (960mg L<sup>-1</sup>):

pesar 2,397g de CaCO<sub>3</sub> (seco a 105°C por 1 hora), solubilizar com 5mL de HCl concentrado e diluir a 1L com água destilada.

g) Padrão de Mg (288mg L<sup>-1</sup>):

pesar 0,288g de Mg metálico (seco a 105°C por uma hora), dissolver com 3mL de HCl concentrado e diluir a 1L com água destilada.

h) Padrão de trabalho:

transferir 0,0; 12,5; 25; 50; 75 e 100mL de cada padrão (itens e, f, g) para becker de 500 mL com água destilada, ajustar o pH para 6,5 com NaOH 0,5mol L<sup>-1</sup>. Transferir para balões volumétricos de 1.000mL numerados de A-F, e completar o volume com água destilada.

As concentrações destas soluções serão ( $\text{mg L}^{-1}$ ):

Elemento	Padrão diluído					
	A	B	C	D	E	F
P	0	0,75	1,5	3,0	4,5	6,0
K	0	1,5	3,0	6,0	9,0	12,0
Ca	0	12,0	24,0	48,0	72,0	96,0
Mg	0	3,6	7,2	14,4	21,6	28,8

g) solução coquetel (P, K, Ca e Mg):

adicionar 1g de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 1g de  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 1g de  $\text{MgSO}_4$  e 10mL de HCl  $1\text{mol L}^{-1}$  a um balão volumétrico de 1L e completar com água destilada.

## 1.2. Material

- Balança analítica.
- Frascos “snap cap” de 50mL com tampa e de 90mL e, copos plásticos de 50mL (tipo “cafezinho”).
- Suportes para frascos “snap cap” de 50 e 90mL e “tipo cafezinho” de 50mL.
- Pipetas automáticas de 3 e 40mL.
- Agitador “end-over-end” (27rpm) e agitador horizontal (110 oscilações por minuto).
- Membranas de resina de 2,5 x 4,0cm (aniônica com cantos cortados), unidas por argolas de plástico (Figura abaixo).



## 1.3. Preparo das resinas

- Recortar as membranas no tamanho de 2,5 x 4,0 cm.
- Perfurar as membranas de resina com perfurador de papel e juntar, a membrana de resina de troca aniônica à de troca catiônica utilizando as argolas de plástico (as membranas devem ficar separadas pelos espaçadores das argolas).
- Deixar em solução coquetel durante 3 dias, com agitação ocasional (a solução deve cobrir as membranas de resina).
- Lavar o excesso de sais 3 vezes com água destilada.
- Eluir com HCl  $0,5\text{mol L}^{-1}$  (2 vezes, 2 horas por vez), cobrindo as resinas.
- Lavar com água destilada várias vezes (3 ou 4) durante  $\frac{1}{2}$  hora. Deixar em água destilada até o dia de uso.
- Saturar com  $\text{NaHCO}_3$   $0,5\text{mol L}^{-1}$  (2 vezes, 1 hora por vez) no dia de uso. Cobrir as resinas e agitar periodicamente.
- Lavar com água destilada várias vezes (3 ou 4) durante  $\frac{1}{2}$  hora.

## 1.4. Recuperação das resinas para nova extração

Conforme itens e-h do preparo

### **1.5. Procedimento para extração com agitação (adaptado de Tedesco et al., 1995)**

- a) medir 2,5g de solo e colocá-lo em frasco “snap cap” de 50mL.
- b) Adicionar 40mL de água destilada.
- c) Colocar um conjunto de membranas de resinas e tampar os frascos.
- d) Agitar (agitador end-over-end) por 16 horas (27 rpm).
- e) retirar as resinas com pinça, lavando-as com jatos de água destilada.
- f) Colocar as resinas em frasco “snap-cap” de 90mL, contendo 40mL de HCl  $0,5\text{mol L}^{-1}$ .
- g) Deixar em repouso durante 1 hora para liberar  $\text{CO}_2$  e depois agitar por 30 min em agitador horizontal (110-120 oscilações por minuto). Esta solução é o extrato de eluição.

#### **1.5.1. Curva padrão**

- a) Colocar em frasco “snap cap” 40mL das soluções padrão.
- b) Adicionar as resinas e seguir o procedimento para extração com agitação (Item 1.5, d-g).
- c) Fazer as mesmas diluições dos extratos das amostras, conforme descrição a seguir.

#### **1.6. Determinação de P**

- a) Pipetar 3mL do extrato de eluição e colocar em copo plástico.
- b) Adicionar 3mL de solução de molibdato de amônio.
- c) Adicionar 3 gotas da solução redutora ANS.
- d) Determinar a absorvância em 660 nanômetros, após 30 min.

#### **1.7. Determinação de K**

- a) Pipetar 6mL do extrato de eluição e colocar em copo plástico.
- b) Adicionar 6mL de água destilada.
- c) Determinar o K em fotômetro de chama (por emissão), ou em espectrofotômetro de absorção atômica (AA) por emissão ou absorvância (requer lâmpada de K).

## **Apêndice 2. Procedimento para extração de fósforo por resina enterrada (resina-cc. e resina-sat.)**

**2.1. Soluções:** Apêndice 1.

**2.2. Material:** Apêndice 1, item b-e.

Membranas de resinas aniônica com tamanho de 5,0 cm de comprimento por 1,5 cm de largura (sem furo, sem as argolas).

### **2.3. Procedimentos**

- a) Enterrar as membranas de resinas aniônica previamente saturadas com  $\text{NaHCO}_3$  (Apêndice 1, item 1.3, c-h).
- b) Retirar a resina do solo, após um tempo pré-determinado, e lavar com água destilada.
- f) Colocar as resinas em frasco “snap-cap” de 90mL, contendo 40mL de  $\text{HCl}$   $0,5\text{mol L}^{-1}$ .
- g) Deixar em repouso durante 1 hora para liberar  $\text{CO}_2$  e depois agitar por 30 min no agitador horizontal (110-120 oscilações por minuto). Este é o extrato de eluição.
- h) Seguir os mesmos procedimentos de determinação de fósforo (Apêndice 1, item 1.6.).

#### **2.3.1. curva padrão**

- a) Colocar em frasco “snap cap” 40mL das soluções padrão.
- b) Adicionar as resinas aniônicas preparadas cf. o item 1.3 do Apêndice 1.
- c) Agitar por 2 horas (110-120 oscilações por minuto)
- d) Lavar as resinas com jatos de água destilada.
- e) Colocar as resinas em frasco “snap-cap” de 90mL, contendo 40mL de  $\text{HCl}$   $0,5\text{mol L}^{-1}$ .
- f) Deixar em repouso durante 1 hora para liberar  $\text{CO}_2$  e depois agitar por 30 min em agitador horizontal (110-120 oscilações por minuto).
- g) Seguir os mesmos procedimentos de determinação de fósforo item 1.6. do Apêndice 1.

### Apêndice 3. Extração e determinação de fósforo e de potássio pelo método Mehlich-3 (adaptado de Mehlich, 1984)

#### 3.1. Soluções:

a) Solução estoque de  $\text{NH}_4\text{F}$   $3,75\text{mol L}^{-1}$  + EDTA  $0,25\text{mol L}^{-1}$ :

adicionar 138,9g de  $\text{NH}_4\text{F}$  (p.a.) em 600mL de água destilada em balão volumétrico de 1000mL e misturar. Adicionar 73,05g de EDTA (p.a.), misturar até dissolver o sal. Completar o volume a 1L e estocar em frasco de plástico escuro.

b) Solução extratora ( $\text{CH}_3\text{COOH}$   $0,2\text{mol L}^{-1}$  +  $\text{NH}_4\text{NO}_3$   $0,25\text{mol L}^{-1}$  +  $\text{NH}_4\text{F}$   $0,015\text{mol L}^{-1}$  +  $\text{HNO}_3$   $0,013\text{mol L}^{-1}$  + EDTA  $0,001\text{mol L}^{-1}$ ):

colocar aproximadamente 2L de água destilada em um balão de plástico com capacidade de 2,5L. Adicionar 50g de  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  (p.a.) e 10mL da solução estoque e misturar. Adicionar 28,75mL de ácido acético glacial ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ , p.a.) e 2,05mL de  $\text{HNO}_3$  (p.a.). Completar o volume e homogeneizar.

c) Solução de molibdato de  $\text{NH}_4$  0,38%:

dissolver 3,8g de molibdato de amônio ( $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) em 150mL de água destilada. Adicionar 71mL de HCl concentrado e complementar o volume a 1L. Usar no máximo por 30 dias.

d) Solução ANS: Apêndice 1.

e) Solução padrão de fósforo ( $500\text{mg L}^{-1}$ ) e potássio ( $1000\text{mg L}^{-1}$ ):

pesar 2,196g de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (p.a.) + 0,704g de KCl (p.a.) previamente secos em estufa a  $105^\circ\text{C}$ . Dissolver em solução extratora em um balão volumétrico de 1000mL.

f) Solução mista diluída de fósforo ( $100\text{mg L}^{-1}$ ) e potássio ( $200\text{mg L}^{-1}$ ):

diluir 100mL da solução padrão de fósforo e potássio em balão volumétrico de 500mL e completar com solução extratora.

g) Solução padrão da curva padrão de fósforo contendo 0,0; 1,0; 2,0; 3,5; 5,0; 7,5 e  $10\text{mg de P L}^{-1}$  e de potássio contendo 0,0; 2,0; 4,0; 7,0; 10; 15,0 e  $20,0\text{mg de K L}^{-1}$ :

pipetar 0, 10, 20, 35, 50, 75 e 100mL da solução mista diluída de fósforo e de potássio e colocar em balões volumétricos de 1000mL e completar com solução extratora.

#### 3.2. Material

a) Balança analítica.

b) Pipetas automáticas de 3 e de 30mL.

c) Conjuntos de suportes e de frascos de plástico de 50mL, com tampa.

d) Suportes para copos plásticos (tipo “cafezinho”).

### **3.3. Procedimentos**

- a) Medir 3g de solo e colocar em frascos de plástico de 50mL.
- b) Adicionar 30mL de solução extratora.
- c) Agitar por 5 minutos em agitador horizontal (110-120 oscilações por minuto).
- c) Deixar em repouso por 16 horas.
- d) Retirar 3mL do sobrenadante para determinação de fósforo.
- e) Retirar 6mL do sobrenadante para determinação de potássio.

### **3.4. Determinação de P**

- a) Adicionar 3mL de molibdato de amônio à alíquota do extrato sobrenadante.
- b) Adicionar 3 gotas da solução redutora ANS.
- c) Determinar a absorbância em 880 nanômetros, após 30 min.

### **3.5. Determinação de K**

- a) Determinar o K em fotômetro de chama (por emissão), ou em espectrofotômetro de absorção atômica (AA) por emissão ou absorbância (requer lâmpada de K).

#### Apêndice 4. Avaliação da utilização de redutor ANS em substituição ao ácido ascórbico utilizado na metodologia proposta por Mehlich (1984)

O método Mehlich-3 de extração e determinação de fósforo do solo, (Mehlich, 1984) utiliza a solução de ácido ascórbico para o desenvolvimento da cor da solução de leitura. Esta solução apresenta alguns inconvenientes na metodologia além do maior custo, se comparada à solução redutora ANS (ácido 1-amino-2-naftol-4-sulfônico, sulfito de sódio e metassulfito de sódio), muito utilizada nos laboratórios de análise de solo dos estados do RS e de SC.

Este estudo teve por objetivo comparar a eficiência das soluções de ácido ascórbico e redutora ANS, no desenvolvimento e estabilidade da cor da solução de leitura em diferentes concentrações de fósforo na solução e tempos de leitura.

Para isso, foram feitos dois testes: no primeiro, utilizou-se uma curva com 0; 1; 2; 5; 7,5 e 10mg de P L<sup>-1</sup> com leitura aos 15, 30, 90, 120 e 170 minutos após a adição das soluções de ácido ascórbico e da redutora ANS; no segundo uma solução com concentrações maiores de fósforo: 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 2; 5; 7,5; 10; 15; 25; 30; 40; e 50mg de P L<sup>-1</sup> e leitura aos 30 minutos após a adição das soluções de ácido ascórbico e da redutora ANS.

Verificou-se que o emprego da solução de ácido ascórbico ocasionou perda de eficiência na intensidade da cor, pela diminuição da absorvância, à medida que passou o tempo, especialmente após 30 minutos (Figura 1a). Com a solução de redução ANS o traçado da curva foi praticamente linear e o aumento no valor de absorvância à medida que aumentou o tempo não foi significativo (Figura 1b).

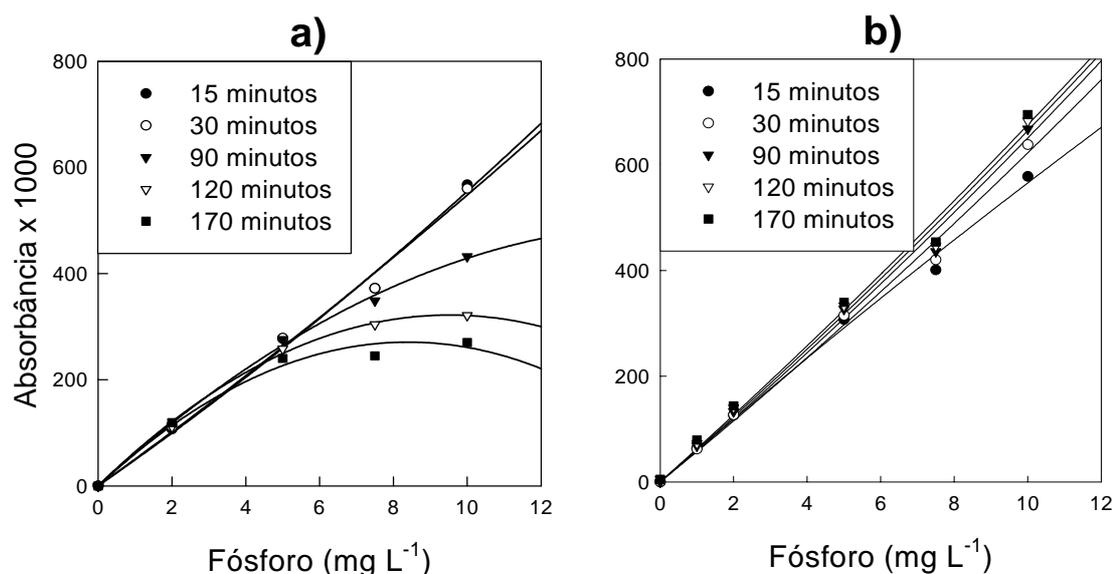


Figura 1. Absorvância de fósforo em solução, com diferentes concentrações de fósforo e tempos de leitura. a) intensidade de cor da solução desenvolvida com ácido ascórbico, e b) com redutora ANS.

Verificou-se que a solução de ácido ascórbico propiciou maiores aumentos de absorvância da solução com o aumento na concentração de fósforo, se comparada à de redução ANS, especialmente para os teores maiores do que  $15\text{mg de P L}^{-1}$  (Figura 2a). Este comportamento pode ser melhor visualizado na ampliação de escala da figura 2b com os valores de P entre  $0\text{-}10\text{mg L}^{-1}$ .

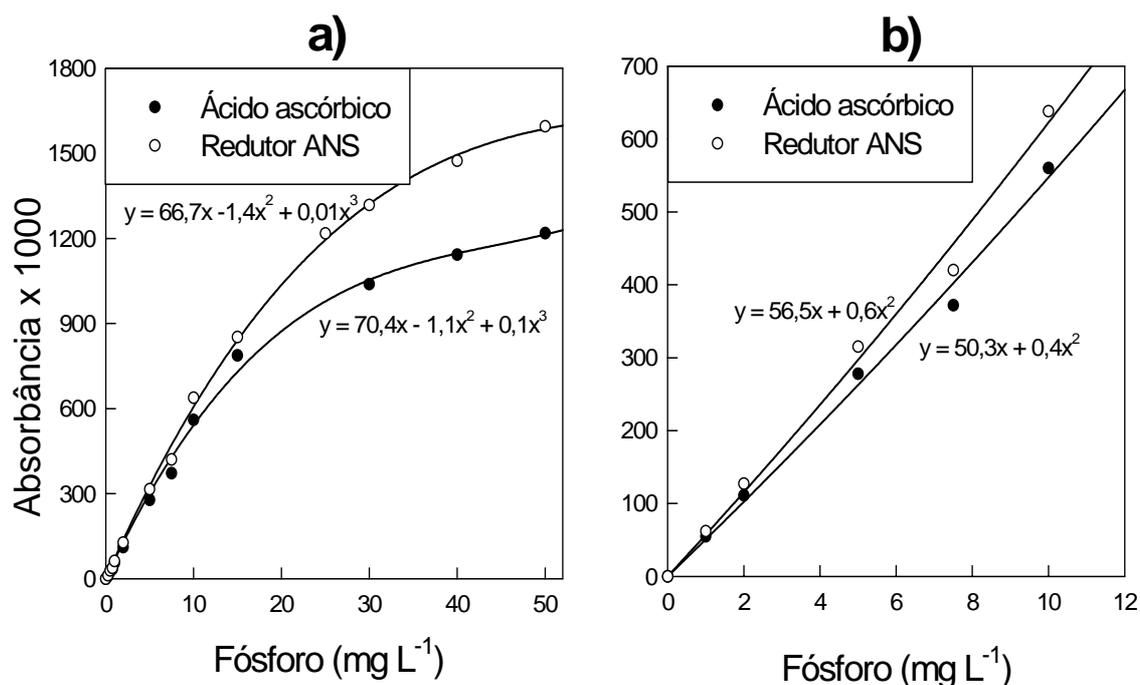


Figura 2. Absorbância de fósforo determinada após 30 minutos da adição de ácido ascórbico ou ANS na solução com diferentes concentrações de fósforo. a) P de  $0\text{-}50\text{mg L}^{-1}$ , e b) P de  $0\text{-}10\text{mg L}^{-1}$ .

Num teste feito com solos foram retiradas duas alíquotas de 3mL cada e colocadas em frasco de plástico. Adicionou-se para o desenvolvimento da cor, ácido ascórbico numa e solução redutora ANS noutra.

Verificou-se que a solução de ácido ascórbico produz um valor de fósforo um pouco menor do que o obtido com a utilização da solução redutora ANS.

Tabela 1. Valores de fósforo obtido com a adição de ácido ascórbico e de redutor ANS na solução extratora para o desenvolvimento da cor de vários solos do RS com diferentes características químicas e de fertilidade e a relação ácido ascórbico:redutora ANS.

Solo <sup>(1)</sup>	Local	Tratamentos	Fósforo		
			ac. ascórbic	redutor ANS	Relação asc.:ANS
		---- n° ----	----- mg L <sup>-1</sup> -----		
Tpo	Bagé	48	10,1	8,0	1,3
LVd	Tapera	32	25,9	24,4	1,1
LVd	Não-Me-Toque	32	9,2	9,2	1,0
LVaf	Erechim	32	43,0	43,9	1,0
LVd	Palmeira. das Missões	32	12,8	11,1	1,2

<sup>1</sup> Tipo: Luvissole hipocrômico, LVd: Latossolo Vermelho distrófico, LVaf: Latossolo vermelho aluminoférrico

### Apêndice 5. Ferro disponível em diferentes solos do RS

Solo <sup>(1)</sup> – local	Argila <sup>(2)</sup>	Matéria orgânica <sup>(2)</sup>	Ferro disponível <sup>(2)</sup>
	----- g kg <sup>-1</sup> -----	-----	----- mg kg <sup>-1</sup> -----
PVd - B. Retiro	100	45	1100
LVd - Cruz Alta	260	93	2430
LVd - P. Fundo	400	167	4430
LBa – Vacaria	620	324	2200
LVaf – Erechim	770	246	700

<sup>1</sup> PVd: Argissolo Vermelho distrófico, LVd: Latossolo Vermelho distrófico, LBa: Latossolo Bruno aluminico, LVaf: Latossolo Vermelho aluminoferrico; <sup>2</sup> Metodologia descrita por Tedesco et al., (1995).