

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

**INDICADORES PARA A TOMADA DE DECISÃO PARA A CALAGEM
NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Margarete Nicolodi

(Dissertação)

Porto Alegre, 2003

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

**INDICADORES PARA A TOMADA DE DECISÃO PARA A CALAGEM
NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

MARGARETE NICOLODI
Engenheira-Agrônoma (UNICRUZ)

Dissertação apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
Grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Fevereiro de 2003

CIP - CATALOGAÇÃO INTERNACIONAL NA PUBLICAÇÃO

N651i Nicolodi, Margarete
Indicadores para a tomada de decisão para a calagem no sistema de plantio direto / Margarete Nicolodi.- Porto Alegre : M.Nicolodi, 2003.

xv, 102f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

1.Acidez do Solo : Corretivo : Calagem : Plantio Direto.
I. Título.

CDD: 631.42
CDU: 631.4

Catalogação na publicação:
Biblioteca Setorial da Faculdade de Agronomia da UFRGS

MARGARETE NICOLODI
Engenheiro Agrônomo - UNICRUZ

DISSERTAÇÃO

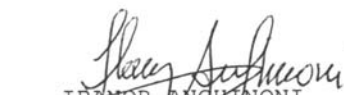
Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

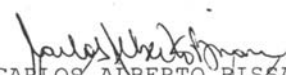
MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

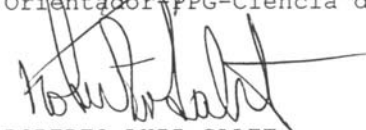
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 19.02.2003
Pela Banca Examinadora


Homologado em: 24.03.2003
Por



LEÔNOR ANGHINONI
Orientador PPG-Ciência do Solo



CARLOS ALBERTO BISSANI
Coordenador do PPG Ciência
do Solo


ROBERTO LUIZ SALET
co-orientador - UNICRUZ


CLÉSIO GIANELLO
PPG-Ciência do Solo


MARINO JOSÉ TEDESCO
PPG Ciência do Solo


DELMAR POTTKER
EMBRAPA-Trigo


GILMAR ARDUINO B MARODIN
Diretor da Faculdade
de Agronomia

À minha família;
À MÃE (NEUSA), *maravilhosa, calma, generosa,*
pelo apoio em todos os momentos;
Ao PAI (NERI), *pela preocupação com nosso futuro;*
Ao DECO e ao BATISTA, *pelo companheirismo,*
muito mais do que irmãos, amigos do coração,

dedico essa conquista.

AGRADECIMENTOS

A DEUS, infinitamente generoso, que nos conduz pelo melhor caminho mesmo sem a gente perceber. De vez em quando reclamamos que as coisas não acontecem como planejamos, parece tudo perdido diante das dificuldades, e Ele nos dá forças para lutar, põe em nosso caminho pessoas admiráveis, exemplos de vida para o nosso crescimento, renova nossas esperanças, e aos poucos mostra o que de melhor nos reservou, às vezes tão grandioso e sonhos que pareciam impossíveis se tornam realidade. Percebemos que todo aquele sofrimento já não dói tanto, ficou lá trás, que valeu a pena e as recompensas são maravilhosas. Obra de DEUS, que nos dá a vida, nos presenteia com nossa família, muitos amigos, mostra a felicidade nas pequenas coisas para cumprirmos nossa missão com alegria.

Aos meus orientadores de campo, aos de casa (pai, irmãos, tios...), por ensinar observar as maravilhas da natureza, o crescimento das plantas, a colheita, a importância de acompanhá-la de perto. Aos profissionais da área, Luiz Hermes, Tonon, Guerra, Nédio, Ilse, Rodrigo e Scarsi, por mostrar como é linda a missão do Agrônomo(a) e a importância de contribuir para o progresso da agricultura, buscando soluções para problemas do dia a dia, com alegria.

Aos amigos conquistados na UNICRUZ, representados pelos professores Mário, Alexandre, Ruedell, Tragnago e pelos colegas Fernando, Sergiomar, Gustavo, pelo companheirismo e incentivo.

Ao Prof. Roberto Salet (Co-Orientador) pela confiança, incentivo, amizade e apoio, principalmente na fase de adaptação.

Ao Prof. Ibanor Anghinoni, pela confiança, especialmente no desenvolvimento de um trabalho desta natureza, pelas contribuições na construção deste material, pela consideração, respeito, dedicação, generosidade, apoio, amizade e orientação.

Ao CNPq, pela bolsa de Mestrado e ao PRONEX-SOLOS pelo auxílio financeiro ao trabalho.

Aos Professores da UFRGS, em especial ao Pedro, Clésio, Gustavo, João, Jacques, Cimélio, Bissani, Marino, Riboldi, Cassol, Nestor e Enilson, pelos ensinamentos, pelo prazer com que transmitem o conhecimento e pela

maneira como apontam os caminhos dentro e fora da sala de aula, principalmente pelo incentivo e amizade demonstrados no decorrer do curso.

Aos Agrônomos e Técnicos que gentilmente auxiliaram na seleção das lavouras, Cláudio Guerra, Nédio Giordani, Mário Stefanello, Leandro Mundstock, Ricardo Warben, Felisberto, Jairo Nascimento e Carlos Carpenedo.

Aos produtores que colocaram suas propriedades à disposição para realização do trabalho, em especial, aos das áreas selecionadas: Neri Nicolodi, Vanderlei e Marcos Batista Nicolodi, Airton Bartz, Moacir Fuchina Facco, Ibis Bonaldo, Reni Nicolodi e Família e Jorge Nicolodi e Família.

Aos que colaboraram na realização deste trabalho, na fase de campo e de laboratório, em especial, ao Agostinho, Adão, Zé, Fabrício, Cláudio, e aos da equipe de apoio, Denise, Cíntia, Maria do Carmo, Jader, Antonia e Lisandra, pela disponibilidade, carinho, apoio e amizade.

Aos colegas do PPG Ciência do Solo, de turma, de laboratório e sala da Fertilidade, pelos bons e maus momentos que vivemos. Aos de bom coração, sem tempo pra quase nada, pela confiança, incentivo e amizade, especialmente à Greice, Fabiane, Cassol, Cláudio, Clarice, Juliana, Falberni, Josué e André.

À Carla, à Adriana e à Solange, também pelo companheirismo, conselhos, proteção, otimismo, alegria e apoio, do fundo do coração.

À Marlove, à Solange e à Cândida, pela compreensão e apoio.

À Rosane Félix, à Rosane e ao Aquilino pela generosidade, consolo, incentivo, socorro e proteção juntamente com a equipe do LAR.

À todos os meus familiares pela torcida, carinho e incentivo.

Aos meus pais pela educação, principalmente por aquela que vem de casa, preocupação com nosso futuro, consolo nas horas difíceis, dedicação e amor com os três filhos, temos orgulho de vocês... Agora acredito que as fases difíceis passam (o sofrimento, a solidão, a distância...), que tudo isso vale a pena e os resultados são maravilhosos.

À MÃE (NEUSA), ao DECO (VANDERLEI), ao BATISTA (MARCOS BATISTA) e ao PAI (NERI), demonstrando cada um do seu jeito, seu carinho, proteção, respeito, admiração, bondade, alegria, serenidade, companheirismo, preocupação, apoio e incentivo (conselhos, orações, financeiro) e amor.

Muito obrigada.

INDICADORES PARA A TOMADA DE DECISÃO PARA A CALAGEM NO SISTEMA PLANTIO DIRETO^{1/}

Autora: Margarete Nicolodi

Orientador: Prof. Ibanor Anghinoni

Co-orientador: Prof. Roberto Luiz Salet

RESUMO

As recomendações de calagem utilizadas no sistema plantio direto (SPD) foram desenvolvidas no sistema convencional (SC), tendo como base o pH do solo. No SPD ocorrem alterações nas características do solo, como dinâmica diferenciada do alumínio e aumento dos teores de fósforo e cálcio na camada superficial, que provocam uma menor resposta à calagem. A Comissão de Química e Fertilidade do Solo NRS/SBCS alterou, em 2000, o valor do pH do solo de 6,0 para 5,5 e acrescentou a saturação por bases de 60 % para a tomada de decisão para a aplicação de calcário no SPD. Há, ainda, a necessidade de sua validação em áreas de lavoura. O objetivo deste trabalho foi avaliar alguns indicadores para a tomada de decisão para a aplicação de calcário no SPD em áreas de lavoura. Foram utilizados 7 cultivos em 6 lavouras no SPD consolidado em Latossolo Vermelho distrófico, sem adição de tratamentos, onde foram coletadas amostras de solo e de tecido vegetal e avaliado o rendimento de grãos. Os coeficientes de determinação, entre o rendimento de grãos e os indicadores de acidez foram superiores com alumínio trocável, a saturação por alumínio e Al/Ca+Mg comparado ao pH em água e a saturação por bases, sendo estes os indicadores de tomada de decisão adotados pela Comissão... a partir de 2000. Os valores de referência de 0,3 cmol_c dm⁻³ de alumínio trocável ou 5 % de saturação por alumínio podem ser utilizados como critérios adicionais ao pH em água de 5,5 e/ou saturação por bases de 65 %, para a tomada de decisão para a calagem no sistema plantio direto consolidado. A combinação de um grupo de indicadores de acidez e de fertilidade do solo não contribuiu para a melhoria do processo de tomada de decisão.

^{1/}Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (102 p.), fevereiro, 2003. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq e PRONEX.

LIMING INDICATORS IN THE NO-TILLAGE SYSTEM^{1/}

Author: Margarete Nicolodi

Adviser: Prof. Ibanor Anghinoni

Co-adviser: Prof. Roberto Luiz Salet

ABSTRACT

Liming recommendations in no-tillage system were developed for conventional tillage, based on soil pH. In no-tillage systems, modifications on soil characteristics occur, with different dynamics of aluminum and increase on phosphorus and calcium in soil surface, that results in less response to lime. The Soil Chemical and Fertility Commission (NRS/SBCS) made a modification, in 2000, decreasing the soil pH from 6.0 to 5.5, and included the bases saturation of 60 % as criteria for lime application in the no-tillage system. There is, still, the necessity of its validation for crop production areas. The objective of this research is to evaluate different indicators for liming in well established no-tillage cropping areas. Seven fields crop no-tillage areas in oxisols with no treatments application were used. Soil and plant tissue samples were collected and the grain yield was evaluated. Exchangeable aluminum, aluminum saturation and Al/Ca+Mg relation may be used as liming indicators, with small advantages over soil pH and bases saturation, the indicators used by Commission... after 2000. The use of $0.3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ of exchangeable aluminum and 5 % of aluminum saturation can be suggested as additional criteria for liming decision, to soil pH of 5.5 and/or bases saturation of 65 %. The use of a indicators set did not help in getting better the lime decision process in no-tillage system.

^{1/}M.Sc. Dissertation in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (102 p.) - February, 2003. Research supported by PRONEX/CNPq.

SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	03
2.1 Acidez do solo.....	03
2.2 Indicadores da acidez do solo.....	04
2.3 Dinâmica da acidez do solo no sistema plantio direto.....	06
2.4 Relação entre calcário e fósforo.....	10
2.5 Recomendação de calagem no sistema plantio direto.....	11
2.6 Efeito de outros fatores no rendimento das culturas.....	12
2.7 Problematização e hipóteses.....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1 Caracterização da região do Planalto Médio.....	16
3.2 Caracterização das áreas de lavoura.....	17
3.2.1 Histórico e caracterização das áreas de lavoura.....	19
3.2.1.1 Área 1 – Soja.....	19
3.2.1.2 Área 2 – Soja.....	19
3.2.1.3 Área 3 – Soja.....	20
3.2.1.4 Área 4 – Soja.....	20
3.2.1.5 Área 5 – Soja.....	20
3.2.1.6 Área 6 e 7 – Soja e Cevada.....	21
3.3. Condução das áreas.....	21
3.4. Amostragem.....	22
3.4.1 Tecido vegetal.....	22
3.4.2 Grãos.....	22
3.4.3 Solo.....	23
3.5 Análises e determinações.....	23
3.5.1 Tecido vegetal.....	23
3.5.2 Grãos.....	23
3.5.3 Solo.....	24
3.6 Análise estatística.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1 Relação entre acidez do solo e seus indicadores	27
4.2 Relação entre acidez e indicadores de fertilidade do solo.....	48
4.3 Relação entre rendimento das culturas e indicadores de acidez e de fertilidade do solo e concentração de nutrientes no tecido vegetal.....	56
5. CONCLUSÕES	83
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
7. APÊNDICES	91

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Valores dos coeficientes de determinação (R^2) das regressões simples entre o rendimento relativo de grãos e indicadores de solo e de planta, em áreas de lavoura, sob sistema plantio direto, no Planalto Médio do RS.....	78
2. Valores dos coeficientes de determinação (R^2) das regressões múltiplas entre o rendimento relativo de grãos e indicadores de acidez e fertilidade do solo, em áreas de lavoura, sob sistema plantio direto, no Planalto Médio do RS.....	82

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Mapa das regiões fisiográficas do Estado do Rio Grande do Sul (Brasil, 1973).....	17
2. Localização da região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul e dos municípios (Cruz Alta, Não-Me-Toque e Ibirubá), onde estão situadas as áreas de lavoura utilizadas (Brasil, 1973; IBGE, 1996).....	18
3. Relação entre o pH em água e o alumínio trocável nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	28
4. Relação entre o pH em água e H+Al nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	30
5. Relação entre o pH em água e a saturação por alumínio nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	31
6. Relação entre o pH em água e a saturação por bases nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	33
7. Relação entre o pH em água e Al/Ca+Mg nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	34
8. Relação entre o pH em água e o pH em CaCl ₂ nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	36
9. Relação entre o alumínio trocável e H+Al nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	37
10. Relação entre o alumínio trocável e a saturação por alumínio nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	38
11. Relação entre o alumínio trocável e a saturação por bases nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	40
12. Relação entre o alumínio trocável e Al/Ca+Mg nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	41

13. Relação entre o alumínio trocável e o pH em CaCl ₂ nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	42
14. Relação entre H+Al e a saturação por alumínio nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	43
15. Relação entre H+Al e a saturação por bases nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	44
16. Relação entre H+Al e o pH em CaCl ₂ nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	45
17. Relação entre H+Al e Al/Ca+Mg nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	46
18. Relação entre o pH em água e o teor de matéria orgânica nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	49
19. Relação entre o pH em água e o teor de fósforo disponível nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	50
20. Relação entre o alumínio trocável e o teor de matéria orgânica nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	51
21. Relação entre o alumínio trocável e o teor de fósforo disponível (Mehlich I) nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	53
22. Relação entre H+Al e o teor de matéria orgânica nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	54
23. Relação entre H+Al e o teor de fósforo disponível (Mehlich I) nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	55
24. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o pH em água nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, na Área 1, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	57

25. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o alumínio trocável nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, na Área 1, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	58
26. Relação entre o rendimento relativo de grãos e a saturação por alumínio nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, na Área 1, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	59
27. Relação entre o rendimento relativo de grãos e a saturação por bases nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, na Área 1, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS...	60
28. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o pH em água nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	63
29. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o pH em CaCl_2 nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	64
30. Relação entre o rendimento relativo de grãos e a saturação por bases nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	66
31. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o alumínio trocável nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	67
32. Relação entre o rendimento relativo de grãos e a saturação por alumínio nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	69
33. Relação entre o rendimento relativo de grãos e $\text{Al}/\text{Ca}+\text{Mg}$ nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	70
34. Relação entre o rendimento relativo de grãos e $\text{H}+\text{Al}$ nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	71
35. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o teor de matéria orgânica nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	73

36. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o teor de fósforo disponível (Mehlich I) nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS	74
37. Relação entre o rendimento relativo de grãos e a concentração de fósforo (a) e potássio (b) no tecido vegetal da soja, em lavouras, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS	76
38. Relação entre o rendimento relativo de grãos e a concentração de cálcio (a) e magnésio (b) no tecido vegetal da soja, em lavouras, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS	77

RELAÇÃO DE APÊNDICES

	Página
1. Médias das análises dos pontos de coleta do rendimento de grãos e das amostras de solo na camada de 0 a 10 cm do solo, em cada área de lavoura sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS, utilizadas neste trabalho.....	91
2. Valores dos coeficientes das equações (a, b, x_0) das regressões simples entre os tipos de acidez do solo e seus indicadores em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	92
3. Valores dos coeficientes de determinação (R^2) e nível de significância das regressões simples entre os tipos de acidez do solo e seus indicadores em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	93
4. Relação entre o teor de matéria orgânica e a CTC efetiva, nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	94
5. Relação entre o pH em água e a CTC efetiva, nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	95
6. Valores dos coeficientes de determinação (R^2) e nível de significância das regressões simples entre os tipos de acidez do solo e indicadores de fertilidade do solo em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.	96
7. Valores dos coeficientes das equações (a, b, x_0) das regressões simples entre os tipos de acidez do solo e os indicadores de fertilidade do solo em lavouras, sob sistema plantio direto, no Planalto Médio do RS.	97
8. Valores dos coeficientes de determinação (R^2), nível de significância das regressões simples entre o rendimento relativo de grãos e alguns indicadores de acidez do solo por área de lavoura, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS, utilizadas neste trabalho.....	98
9. Relação entre o rendimento relativo de grãos e a CTC efetiva, nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	99
10. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o teor de potássio disponível (Mehlich I) nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.....	100

11. Valores dos coeficientes das equações (a , b , x_0) das regressões simples entre o rendimento relativo de grãos e indicadores de solo e de planta, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS..... 101
12. Relação entre o rendimento relativo de grãos e alguns indicadores de acidez e de fertilidade do solo nos pontos com teor de alumínio trocável menor que $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, na camada de 0-10 cm do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS..... 102

1. INTRODUÇÃO

O sistema de produção agrícola brasileiro modificou-se muito nos últimos anos. Muitos produtores, que utilizavam o sistema convencional de preparo de solo, passaram a adotar o sistema plantio direto. A área, neste sistema, teve crescimento acentuado, ocupando atualmente no Brasil, aproximadamente 35 % da área cultivada, e no Rio Grande do Sul, aproximadamente 60 % da área cultivada (Wiethölter, 2002a). Como resultado da intensa difusão da tecnologia do sistema plantio direto, ocorreu um aumento nos níveis de fertilidade dos solos do Estado, com diminuição drástica nas perdas de solo, corretivos e fertilizantes por erosão (Ruedell, 1995; Rheinheimer et al., 2001; 2002).

As recomendações de calagem, até recentemente utilizadas no sistema plantio direto nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, foram desenvolvidas no sistema convencional, as quais utilizam como indicador de tomada de decisão, o pH do solo, recomendando a aplicação de calcário em pH menor do que 6,0 (Comissão..., 1995). Porém, o sistema plantio direto tem dinâmica diferenciada do sistema convencional, pois ocorre acúmulo de nutrientes, aumento do teor de matéria orgânica e comportamento diferenciado do alumínio na camada superficial. Em função disso, a Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Núcleo Regional Sul/SBCS (Comissão..., 2000) decidiu adotar o pH 5,5 e/ou saturação por bases 60 %, como indicadores de tomada de decisão para a aplicação de calcário no sistema plantio direto consolidado. A dose de calcário continua sendo definida de acordo com o índice SMP da análise de solo da camada de 0-10 cm e aplicada em superfície.

Embora esses indicadores para recomendação de calcário (pH em água e saturação por bases) tenham sido adotados para o sistema plantio direto, há necessidade de informações das áreas de lavoura para dar suporte às recomendações de calagem para esse sistema. Frequentemente têm sido observados bons rendimentos em muitas áreas com o pH e a saturação por

bases com valores menores do que os preconizados pela Comissão... (2000), tanto em lavouras como em experimentos. Isso gera dúvidas e necessidade de validação desses indicadores, buscando maiores informações sobre a resposta das culturas à aplicação de calcário, em solos com diferentes níveis de acidez e de fertilidade, em lavouras no sistema plantio direto consolidado.

O uso de indicadores adequados para a recomendação de calcário, de acordo com o sistema de produção, reflete diretamente em maior segurança da assistência técnica e dos produtores no planejamento das propriedades, permitindo melhor uso dos recursos naturais e financeiros, conduzindo ao aumento da produção de alimentos e da lucratividade na agricultura.

O objetivo geral deste trabalho é avaliar os indicadores de tomada de decisão para a calagem no sistema plantio direto adotados pela Comissão... (2000), em áreas de lavoura. Os objetivos específicos são de avaliar, em áreas de lavoura: a) o desenvolvimento das culturas em solos com diferentes níveis de acidez e de fertilidade; b) a acidez do solo e suas relações com indicadores de acidez; c) a adequação do uso e do valor do pH em água, para a tomada de decisão para a calagem; d) outros indicadores para a tomada de decisão; e e) delimitar os respectivos níveis críticos para a calagem.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Motivos econômicos, como redução nos custos de produção e de mão-de-obra, e grandes perdas de solo e nutrientes, provocadas pela erosão no sistema convencional, conduziram à adoção do sistema plantio direto. No Rio Grande do Sul, este sistema foi, inicialmente, instalado em áreas de lavouras que vinham sendo cultivadas no sistema convencional e, mais recentemente, também em áreas de campo nativo. A área cultivada no sistema plantio direto apresenta rápida expansão, principalmente na última década. Esse sistema constitui atualmente o melhor conjunto de técnicas de cultivo para culturas de lavoura, em termos de economicidade e de preservação do solo e da água, permitindo que solos degradados tenham sua capacidade produtiva regenerada (Wiethölter, 2002a).

Os solos brasileiros são, na sua maioria, naturalmente ácidos e pobres em nutrientes. A acidez do solo limita a produtividade das culturas, o que requer a aplicação de calcário. As recomendações de calagem em uso no Rio Grande do Sul e Santa Catarina foram desenvolvidas no sistema convencional de preparo e cultivo de solo. O indicador de tomada de decisão para essa recomendação tem sido, na maioria dos casos, exclusivamente o pH do solo. De um modo geral, as recomendações têm atendido satisfatoriamente às demandas das culturas, refletindo em bons rendimentos de grãos tanto no sistema convencional como no sistema plantio direto.

2.1 Acidez do solo

Os íons responsáveis pela acidez dos solos são o hidrogênio e o alumínio, e os dois parâmetros que representam a acidez do solo são a acidez ativa e a acidez potencial. A acidez ativa é constituída dos íons H^+ dissociados na solução do solo, quimicamente ativos, denominada de fator intensidade. Trata-se de uma pequena concentração de íons H^+ , que é determinada pelo

meio de sua atividade, e representada pelo pH do solo. A acidez ativa será tanto maior (pH menor) quanto maior for a quantidade de íons hidrogênio e alumínio ligados à fase sólida ou quanto menor for a quantidade de bases presentes (Quaggio, 1986). A acidez potencial é constituída pelo conjunto dos ácidos do solo que podem liberar íons hidrogênio e alumínio para a solução, denominada de fator quantidade (Volkweiss, 1989; Bohnen et al., 2000; Wiethölter, 2002a). Os ácidos que compõem a acidez potencial dos solos são predominantemente fracos e estão presentes na fase sólida, sendo os principais: grupos -COOH e -OH na matéria orgânica; Al^{3+} trocável adsorvido nas bordas das argilas e da matéria orgânica; e grupos OH_2 e -OH ligados ao alumínio e ferro das superfícies de óxi-hidróxidos e nas bordas das argilas (Volkweiss, 1989; Bohnen et al., 2000). A acidez potencial é representada pela acidez trocável e acidez não trocável (Wiethölter, 2002a). A acidez trocável é composta pelo Al^{3+} trocável e o H^+ trocável, ambos deslocáveis por simples reações de troca eletrostática, normalmente com um sal neutro ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$). Geralmente o teor de H^+ representa menos de 5% da acidez trocável; por isso, ela é expressa pelos laboratórios de análises de solo, como alumínio trocável (Quaggio, 1986; Volkweiss, 1989; Bohnen et al., 2000).

A acidez não trocável é constituída de $\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$, que não podem ser deslocados para a solução do solo com sais neutros (Bohnen et al., 2000); envolve adsorção específica de hidrogênio, portanto ligações covalentes, cuja forma química é representada por hidrogênio não dissociado (H^0), e que constitui a maioria dos íons hidrogênio do solo. A acidez potencial é, então, definida pela determinação de $\text{H}^0 + \text{Al}^{3+}$, e quantificada através da sua neutralização com soluções tamponadas. Por isso, também é conhecida como acidez titulável ou neutralizável. A acidez potencial varia entre os diferentes tipos de solos em função do pH e teores de alumínio trocável, matéria orgânica, argila e óxidos. A quantidade de base necessária para elevar em uma unidade o pH, é definida como poder tampão do solo (Volkweiss, 1989).

2.2 Indicadores da acidez do solo

A acidez potencial e as bases trocáveis compõem a capacidade de troca catiônica do solo (CTC). A CTC é definida como sendo a capacidade máxima de retenção de cátions que o solo apresenta quando neutro, ou seja, a

pH 7,0 (CTC a pH 7,0). A CTC a pH do solo é chamada de CTC efetiva e expressa a máxima retenção de cátions que o solo apresenta em seu estado atual de pH (Quaggio, 1986).

A saturação por bases representa a proporção de bases na CTC do solo. Trata-se de um indicador indireto da acidez do solo (Quaggio, 1986). O valor da acidez potencial (utilizado para estimar a CTC do solo, e, esta necessária no cálculo da saturação por bases), pode ser estimado por equações de ajuste com o índice SMP. Este índice é utilizado no Rio Grande do Sul e Santa Catarina na definição das doses de calcário para elevar o pH do solo aos níveis desejados. A equação proposta por Escosteguy & Bissani (1999), utilizada no cálculo da saturação por bases nas recomendações de calagem pela Comissão... (2000), foi calibrada a partir de estimativas da acidez potencial por extração com acetato de cálcio a pH 7,0. Esta equação é mais representativa que a anterior, desenvolvida por Kaminski (1974). No entanto, em solos com maior acidez potencial (altos teores de argila e matéria orgânica), ambas subestimam a acidez potencial (Kaminski et al., 2002; Wiethölter, 2002b). Por isso, foram desenvolvidos no Rio Grande do Sul, estudos específicos para obter uma equação para melhor estimativa da acidez potencial. A partir da reunião da Rede Oficial de Laboratórios de Análise de Solo (ROLAS) em 2001 foi adotada a equação de ajuste com o índice SMP para estimativa da acidez potencial calibrada com incubação direta do solo com carbonato de cálcio, obtida por Kaminski et al. (2001). Esta equação está em uso pela ROLAS desde janeiro de 2002. O uso dessa equação nos cálculos da saturação por bases reflete em alteração nos seus valores, devido à alteração na melhor representatividade da acidez potencial do solo, principalmente nos solos ácidos com alto poder tampão (Kaminski et al., 2002).

A saturação por alumínio representa a proporção da acidez trocável, retida na CTC efetiva, possível de passar para a solução do solo e causar toxidez às plantas, na condição atual de pH do solo (Quaggio, 1986). Por isso, é um indicador abrangente e mais representativo do que o uso da acidez trocável isoladamente.

Com a aplicação de calcário ao solo, tanto o alumínio como o hidrogênio são neutralizados. Os sítios de troca catiônica por eles ocupados passam a ser preenchidos por bases trocáveis e, em consequência, ocorre

elevação do pH do solo, assim como da saturação por bases. Como o pH é um reflexo do conteúdo de bases do solo, é de se esperar que exista uma estreita relação entre o pH e a saturação por bases (Raij, 1991). O uso do pH determinado em solução de CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ torna a correlação ainda mais estreita do que com pH em água (Quaggio, 1986; Raij, 1991). Isso acontece porque o pH em sal é uma determinação mais estável do que pH em água, principalmente, pela eliminação das variações dos teores de sais solúveis no solo, resultante da atividade microbiana entre outras causas (Volkweiss, 1989; Raij, 1991).

Possivelmente, a saturação por bases seja melhor indicador para recomendação de calcário do que o pH em água, por representar a proporção da CTC do solo ocupada por bases. Quanto maior a quantidade de bases menor o efeito tóxico da acidez trocável às plantas. O pH em água representa apenas a acidez ativa e, com a possível complexação do alumínio na solução do solo e na fase sólida, dependendo do tipo de complexo formado, esse indicador pode não ser sensível o suficiente para representar também a ação tóxica do alumínio, no sistema plantio direto (Salet, 1998; Anghinoni & Salet, 2000; Kaminski & Rheinheimer, 2000). Provavelmente, a saturação por alumínio e a relação $\text{Al}/\text{Ca}+\text{Mg}$ sejam mais sensíveis em refletir o efeito tóxico do alumínio nesse sistema, principalmente, por considerar a proporção do alumínio em relação às bases trocáveis. O acúmulo de cálcio, por exemplo, na camada superficial do solo, estabelecendo relação Al/Ca mais baixa, também pode diminuir a toxidez do alumínio. Já, a acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$) pode não ser um bom indicador de tomada de decisão, pois o desenvolvimento das plantas, conseqüentemente o rendimento de grãos é influenciado principalmente por sua porção trocável (acidez trocável), que pode ser utilizada diretamente, diminuindo margens de erro.

2.3 Dinâmica da acidez do solo no sistema plantio direto

A adoção do sistema plantio direto promove alterações nos atributos do solo. A adição permanente de biomassa vegetal e a manutenção dos resíduos das culturas na superfície, sem revolvimento do solo e queima de palha, determinam o acúmulo de nutrientes e de matéria orgânica na camada superficial do solo (Bayer, 1992; Ruedell, 1995; Anghinoni & Salet, 1998).

Além disso, ocorrem formação de uma “frente de acidificação”, dinâmica diferenciada do alumínio e aumento dos teores de fósforo e cálcio na camada superficial, provocando, como consequência, uma menor resposta das culturas à aplicação de calcário (Salet, 1994; Ruedell, 1995, Anghinoni & Salet, 1998; Pöttker & Ben, 1998).

A “frente de acidificação” ocorre nos primeiros centímetros do solo. É caracterizada pela diminuição do pH e incremento dos teores de alumínio trocável e alumínio solúvel (Salet, 1994). Esse processo se deve à aplicações de fertilizantes nitrogenados em forma amídica e amoniacal e à própria mineralização dos resíduos mantidos em superfície. Ciotta et al. (2000) verificaram que a frente de acidificação formada é de baixa intensidade em solos com alto poder tampão, alto teor de matéria orgânica e com doses de até 100 kg de uréia ha⁻¹ por cultura. O maior rendimento das culturas no sistema plantio direto, em comparação ao sistema convencional, revela que o possível efeito da acidificação do solo tenha sido compensado pela maior saturação por bases, disponibilidade de fósforo e concentração de carbono orgânico, determinando um ambiente químico mais favorável ao estabelecimento e desenvolvimento das culturas (Ciotta et al., 2002).

O sistema plantio direto apresenta características peculiares, como o incremento nos teores de matéria orgânica na superfície e maior produção de ligantes orgânicos, maior complexação do alumínio, diminuindo sua atividade e, conseqüentemente, reduzindo seu efeito fitotóxico e o problema da acidez do solo verificado na camada superficial (Salet, 1994; 1998).

Assim, a dinâmica do alumínio é alterada principalmente pelo acúmulo de matéria orgânica na camada superficial, aumentando o teor de carbono orgânico solúvel, e a complexação do alumínio (Salet, 1994; 1998). Essa complexação do alumínio na solução do solo pode ocorrer por ligantes orgânicos simples, de baixa massa molecular e por ácidos fúlvicos, de alta massa molecular. A complexação do alumínio na solução do solo por ácidos orgânicos simples tende a formar complexos de esfera externa (Salet, 1998). Estes apresentam maior importância somente num curto período após a adição de resíduos orgânicos frescos ao solo, principalmente como “adubação verde”, pois são rapidamente degradados pelos microrganismos (Miyazawa et al., 1993). A complexação do alumínio na solução do solo com os ácidos fúlvicos

tende a formar complexos mais fortes com o alumínio e mais resistentes ao ataque microbiano. A percentagem de alumínio complexado com ácidos fúlvicos no sistema plantio direto pode ser superior à encontrada no sistema convencional (Salet et al., 1999). A complexação do alumínio na solução do solo com ligantes orgânicos é, normalmente, observada em situações onde o pH em água é baixo e o alumínio trocável é alto (Salet, 1998).

O alumínio também pode formar complexos na interface com a fase mineral, sendo adsorvido na superfície das partículas de solo e da matéria orgânica. Esta complexação na fase sólida é feita principalmente pelos ácidos húmicos e humina, e forma, predominantemente, complexos de esfera interna. A ocorrência dessa adsorção específica dificulta a extração do alumínio trocável com a solução KCl 1 mol L⁻¹, refletindo em valores menores (de alumínio trocável) no sistema plantio direto. O tipo de complexo formado é de difícil equilíbrio com a solução do solo, pois apresenta uma dessorção muito lenta, que o impede de fazer parte da fração solúvel, onde expressa toxidez para as plantas e microrganismos. Esse processo faz com que o alumínio trocável seja baixo, apesar do pH ser baixo, no sistema plantio direto. Essa complexação na fase sólida, principalmente pelos ácidos húmicos e humina, faz com que a quantidade de alumínio adsorvido fortemente na superfície das partículas seja superior no sistema plantio direto em relação ao sistema convencional (Salet, 1998). Comparando diferentes extratores para liberar o alumínio adsorvido especificamente a matéria orgânica, em amostras de solo de áreas com 11 anos de sistema plantio direto, os mesmos não se mostraram mais adequados que a extração com KCl 1 mol L⁻¹. No entanto, foi verificada uma boa relação da extração com KCl com o aumento do carbono orgânico ($R^2=0,86$) (Salet, 1998).

A complexação do alumínio por ácidos orgânicos simples e ácidos fúlvicos na solução do solo e pelos ácidos húmicos e humina na superfície das partículas, diminuindo sua toxidez, justifica o melhor desenvolvimento das plantas em condições de maior acidez no sistema plantio direto, em relação ao sistema convencional (Anghinoni e Salet, 2000). Isso sugere que o pH em água, isoladamente, pode não ser um bom indicador da toxidez de alumínio e, conseqüentemente, de tomada de decisão da aplicação de calcário no sistema plantio direto. Considerando a menor atividade do alumínio e a drástica

diminuição da erosão do solo no sistema plantio direto, que também explica a menor resposta à aplicação de calcário, assim como seu efeito residual mais prolongado, a Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e Santa Catarina alterou os valores de pH em água diminuindo de 6,0 para 5,5, nas recomendações de calagem (Comissão..., 2000).

O maior teor de cálcio na camada superficial do solo no sistema plantio direto, em relação ao sistema convencional (Salet, 1998) pode, também, diminuir a toxidez de alumínio. Os ligantes orgânicos complexam o cálcio trocável do solo na camada superficial, formando complexos CaL^0 ou CaL^- . A alteração da carga de Ca^{2+} facilita a sua mobilidade no solo. Na camada subsuperficial, o cálcio dos complexos Ca-orgânicos é deslocado pelo alumínio trocável do solo, uma vez que os íons Al^{3+} formam complexos mais estáveis do que os íons Ca^{2+} , diminuindo a acidez trocável e aumentando o cálcio trocável (Caires et al., 1998; Franchini et al., 1999; Miyazawa et al., 2000). Reações semelhantes também ocorrem para magnésio e ferro (Caires et al., 1998). Esses ligantes orgânicos estão presentes em maior quantidade no sistema plantio direto, também pela decomposição dos resíduos vegetais adicionados continuamente ao solo e mantidos na superfície.

No RS, as condições de clima e solo favorecem a ação corretiva, no perfil do solo, do calcário aplicado em superfície, apesar deste apresentar baixa solubilidade. É observado efeito, tanto da descida, no perfil, das partículas finas de calcário sem reagir (Amaral, 2002), ou sua movimentação nos canais formados por raízes mortas como o efeito dos produtos de sua dissolução ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$), e, ainda, complexos do alumínio e do cálcio com ligantes orgânicos a partir da superfície do solo (Miyazawa et al., 2000; Amaral, 2002). Isso caracteriza a chamada “frente de alcalinização”, que pode ocorrer a partir da superfície do solo, onde o calcário ou os produtos da sua dissolução são transportados juntamente com a água infiltrada e percolada, evidenciando a importância dos bioporos do solo nesse sistema (Amaral, 2002). Efeitos da neutralização da acidez e na concentração de cátions básicos são observados na subsuperfície do solo, após períodos relativamente pequenos (Anghinoni & Salet, 2000).

2.4 Relação entre o calcário e o fósforo

Avaliando o rendimento de grãos de soja e trigo, em resposta à adição de calcário e fósforo (Vidor, 1972), verificou a existência de uma interação entre esses fatores no sistema convencional. A resposta das culturas à aplicação de fósforo foi maior, quando comparada à aplicação de calcário, e ocorreu interação positiva nas menores doses (Siqueira, 1972; Vidor, 1972; Mielniczuk, 1982; Anghinoni & Salet, 2000). O efeito interativo da calagem, melhorando a eficiência da adubação fosfatada, pela diminuição da adsorção do fósforo pelo solo, além da neutralização de parte do alumínio, resulta em maior produtividade das culturas. Também pode ocorrer a formação de fosfato de alumínio, devido à alta afinidade química entre estes (Salinas & Sanchez, 1976), permanecendo o alumínio numa forma não tóxica. A maior resposta à aplicação de fósforo no sistema convencional demonstra que esse elemento pode ser tão ou mais importante que a própria correção da acidez do solo (Anghinoni & Salet, 2000). No sistema plantio direto, o fósforo é o nutriente que forma o gradiente mais acentuado a partir da superfície do solo (Ruedell, 1995; Anghinoni & Salet, 1998) e seus teores tiveram um aumento significativo nos últimos anos nos solos do Rio Grande do Sul (Ruedell, 1995; Rheinheimer et al., 2001; 2002).

O efeito benéfico da calagem no sistema convencional era atribuído principalmente à diminuição das concentrações de alumínio e manganês trocáveis do solo, pelo aumento da concentração de cátions básicos e pela maior disponibilidade de nutrientes, melhorando as condições gerais de crescimento das plantas e o potencial de utilização do fósforo do solo. No sistema plantio direto, com aumento no teor de matéria orgânica, ocorre maior complexação do alumínio, diminuindo sua toxidez às plantas (Salet, 1998). Assim, não se espera resposta das culturas à aplicação de calcário quando a saturação de alumínio for baixa, menor que 10 %, ou quando o nível de fósforo disponível no solo for elevado. Anghinoni & Salet (2000) testaram essa hipótese, utilizando dados de Pöttker e Ben (1998), em diferentes situações de acidez de solo. De uma maneira geral, a inclusão do teor de fósforo no solo melhorou o processo de tomada de decisão da calagem no sistema plantio direto.

2.5 Recomendação de calagem no sistema plantio direto

As recomendações de calagem utilizadas no sistema plantio direto no RS e SC foram adaptadas a partir das recomendações desenvolvidas no sistema convencional. As adaptações foram baseadas nas respostas de rendimento das culturas em experimentos de doses de calcário obtidas por vários anos, no sistema plantio direto, especialmente pelos conduzidos na EMBRAPA-Trigo (Pöttker, 1998; Pöttker & Ben, 1998, Pöttker, 2000). Foi verificado, nesses trabalhos, que com o pH superior a 5,5 ou saturação por bases acima de 60 %, a aplicação de calcário pouco incrementava o rendimento das culturas. Resultados semelhantes também foram observados em experimentos realizados na FUNDACEP (Ruedell, 1995). Em área com o pH do solo inicial de 5,2 e 0,4 cmol_c dm⁻³ de alumínio trocável, mesmo quatro anos após a calagem, essa não contribuiu para o aumento da produtividade (Fiorin et al., 1998). Assim, a Comissão... (2000) passou a recomendar aplicação de calcário para áreas no sistema plantio direto, implantado em lavouras conduzidas no sistema convencional, elevar o pH do solo somente até 5,5 e/ou saturação por bases a 60 % e até pH 6,0 nas áreas instaladas em campo nativo, amostrando e visando corrigir a acidez do solo na camada de 0-10 cm, com aplicação superficial de calcário. Assim, as recomendações de calagem no sistema plantio direto sofreram alterações nos indicadores, nos valores de referência para a tomada de decisão de calagem, na camada de solo amostrada e no modo de aplicação.

Embora fossem observados, tanto em lavouras quanto em experimentos, bons rendimentos em pH menor que 5,5 e saturação por bases abaixo de 60 %, por deficiência de outros estudos específicos a Comissão... (2000) decidiu num primeiro momento, adotar essas recomendações até que novas informações fossem geradas para sua completa validação. As alterações eram de caráter urgente, porque muitas lavouras já se encontravam em fase de sistema consolidado e a recomendação para a elevação do pH até 6,0 resultava em altas doses de calcário. Além de não aumentar significativamente o rendimento das culturas, as recomendações do boletim (Comissão..., 1995) poderiam causar elevação demasiada do pH nos primeiros centímetros de solo e diminuir a disponibilidade de micronutrientes, pela aplicação superficial de calcário, sem incorporação desse ao solo.

2.6 Efeito de outros fatores no rendimento das culturas

Em função da mudança do sistema de cultivo e das alterações provocadas no solo, faz-se necessário também avaliar o reflexo da interação dos fatores de solo no desenvolvimento das plantas e no rendimento de grãos. Espera-se que, com a manutenção dos fatores em níveis adequados, haja efeito adicional devido à ocorrência de interação, em benefício das plantas. Um exemplo claro, é o fato de recomendar não só fósforo e potássio mas, também, outros nutrientes e calagem, quando seus valores estiverem abaixo do nível de suficiência e reposição, tanto da exportação quanto das perdas.

As curvas de resposta à adubação ou calagem refletem, de fato, a interação dos fatores que afetam o desenvolvimento das plantas. Uma dose baixa de um nutriente interage de forma diferente com outros componentes do solo do que uma dose alta de um insumo, e o resultado dessa interação é refletido no desenvolvimento da cultura e no rendimento de grãos. O tipo de resposta é dependente da capacidade do solo em suprir boas condições para seu desenvolvimento e dos fatores que afetam a habilidade da planta em aproveitar essas condições (Corey, 1973).

Para a elaboração das recomendações de adubação e calagem, destaca-se a importância do papel desempenhado pela amostragem e análise do solo. A análise do solo representa a mais significativa aplicação prática do conhecimento da ciência do solo para uso da terra e pode ser vista como interpretação de processos, não simplesmente como um método de laboratório. Assim, tem sido utilizado nas recomendações, o conceito de nível crítico ou nível de suficiência. O nível crítico promove a idéia de quantificar, através da análise de solo, a provável resposta para adição de fertilizante ou corretivo (Eckert, 1987). O nível crítico é um valor numérico, de referência, que é utilizado como critério de decisão. Porém, esse valor de referência pode ser afetado pela manipulação da amostra, pela natureza dos dados e pela metodologia de análise do solo. O uso de diferentes funções matemáticas também indica valores diferentes de níveis críticos. Por isso, uma determinada equação, amplamente utilizada, pode não ser adequada para o caso específico. Muitas vezes, a expressão gráfica dos dados não corresponde às equações que os descrevem e as curvas passam pela origem, porém, nenhum extrator pode retirar todo nutriente do solo. O nível crítico ou de suficiência

deve ser interpretado como uma tendência de resposta à adição de fertilizantes e corretivos, acima do qual há uma menor probabilidade de resposta (Eckert, 1987).

As relações entre análise de solo e o rendimento das culturas são avaliadas pelo uso de regressões simples. É um processo empírico de estabelecimento de relação entre a variável independente e a dependente. As regressões múltiplas tendem a refletir melhor o resultado dos processos, pelo uso simultâneo de diversas variáveis independentes para uma dependente (Sumner, 1987). Desses processos, fazem parte fatores relacionados às partes química, física e biológica do solo.

O ajuste das relações entre os parâmetros do solo e a resposta das plantas é medido pelo coeficiente de determinação (R^2). Os valores de R^2 variam de 0 a 1,0. A alteração dos seus valores nesta faixa é a extensão da variação incontrolável dos fatores medidos no modelo (Sumner, 1987). Os valores de R^2 podem variar de acordo com a relação entre as variáveis utilizadas no modelo, com a natureza das informações e com a proporção avaliada dos fatores que determinam a variável dependente.

Na avaliação das relações, deve-se considerar a tendência dos pontos, os valores dos coeficientes de ajuste das curvas de resposta (R^2) e o nível de significância. Normalmente, se considera significativo quando a probabilidade de erro for menor que 5 % ($P < 0,05$), ou seja, 95 % de confiança, e muito significativo quando for menor que 1 % ($P < 0,01$), ou seja, 99 % de confiança na relação de dependência entre as variáveis.

Há muito tempo se conhece os benefícios da prática da calagem na agricultura (Wiethölter, 2000a). Na elaboração de um programa de calagem é importante considerar o grau de tolerância à acidez das espécies de plantas que serão cultivadas, frequência das aplicações, camada a ser corrigida, textura e teor de matéria orgânica do solo (Tisdale et al., 1973). Além desses fatores, deve-se considerar a forma de aplicação do calcário, o sistema anterior e atual de manejo de solo, o tempo de adoção do sistema, o histórico da área, inclusive de produtividade, a disponibilidade financeira para investimentos, a relação custo/benefício, a natureza e a representatividade da base experimental em relação à área de produção na qual serão utilizadas as recomendações.

O uso de áreas de lavouras em solos e regiões representativas na produção de grãos amplia a base de dados. Para eliminar influências locais na definição das recomendações, são utilizados valores de rendimento relativo em vez do valor do rendimento absoluto. Dessas influências ou particularidades das áreas, fazem parte o tipo de solo, o clima, as cultivares, a maquinaria agrícola e o manejo do solo e das culturas, entre outros. Nas relações com nutrientes, por exemplo, o rendimento absoluto máximo é considerado como rendimento relativo 100 %, e os demais proporcionais ao máximo. Além disso, para o uso eficiente das recomendações, devem ser combinadas as informações sobre a amostragem e análise de solo, o histórico da área, a experiência do técnico e do produtor, o desenvolvimento científico sobre o sistema, a resposta à aplicação de insumos, o risco e o retorno econômico do investimento e o impacto ao ambiente.

2.7 Problematização e hipóteses

Avaliando a evolução do sistema plantio direto no Rio Grande do Sul, observa-se menor perda de solo e alterações provocadas na biologia, na física e, principalmente, na parte química do solo. O que, ainda, se questiona é quando exatamente a acidez limita o rendimento das culturas e qual a sua relação com outros componentes da fertilidade do solo. A busca das respostas para essas questões deve elucidar se o pH em água, que representa acidez ativa, e a saturação por bases, são adequados para a tomada de decisão no sistema plantio direto e quais são os níveis críticos ou valores de referência para a recomendação de calagem nesse sistema. É do interesse da pesquisa verificar que outros indicadores também podem ser utilizados para tomada de decisão: alumínio trocável (acidez trocável), H+Al (acidez potencial) ou grupo de fatores dos quais não fazem parte somente a acidez do solo. No sistema plantio direto, o processo de reacidificação ocorre mais lentamente, pela menor lixiviação de bases e perda de solo, complexação do alumínio, inclusive da fase sólida, conduzindo a uma menor resposta à calagem e maior efeito residual do calcário.

Na elaboração das recomendações, o objetivo principal é, além do rendimento de grãos, a lucratividade da agricultura; por isso, a importância das informações geradas em nível de lavoura. Através de estudos que avaliam

variabilidade de rendimento de grãos numa mesma área e em várias áreas de lavoura, obtém-se informações importantes. Numa mesma área de lavoura, tem-se uma expectativa de maior uniformidade de solo, clima (precipitação), tempo de adoção de sistema, rotação de culturas, cultivares, maquinaria agrícola, manejo e adubação. O rendimento das culturas é, então, função das condições que o solo oferece ao desenvolvimento das plantas, isto é, da interação das partes química, física e biológica. Avaliando várias áreas de lavoura em locais diferentes, com mudança de histórico e condição de solo tem-se uma maior representatividade da base de dados para elaboração de recomendações.

Com base nas informações apresentadas, a primeira hipótese do trabalho é: “se o alumínio é menos tóxico para as plantas no sistema plantio direto, o principal indicador de tomada de decisão em uso no RS/SC, o pH em água, não é adequado para a recomendação de calagem no sistema plantio direto”. O que se espera do indicador é que, além de refletir a acidez do solo, inclusive a causada pelo alumínio (acidez trocável), haja uma boa relação entre o rendimento de grãos e o pH em água, confirmada pelos coeficientes de determinação e nível de significância das regressões simples. Uma segunda hipótese pode, ainda, ser formulada: “se a aplicação de calcário, com base no pH em água, não promover a resposta pretendida no rendimento das culturas, um conjunto de fatores deve ser considerado para a recomendação de calcário nesse sistema”. Desse conjunto de fatores, podem fazer parte, o pH em água, o pH em CaCl_2 , a saturação por bases, o alumínio trocável, o H^+Al , a saturação por alumínio, a relação $\text{Al}/\text{Ca}+\text{Mg}$, o teor de matéria orgânica, o teor de P disponível e outros indicadores de fertilidade do solo.

Visando testar as hipóteses apresentadas, foi desenvolvido o presente trabalho. Essa pesquisa considerou, na sua fase de planejamento, como de grande importância, o seu desenvolvimento em áreas de lavoura, em regiões representativas na produção de grãos no estado do Rio Grande do Sul, assim como as alterações no solo provocadas pela adoção do sistema plantio direto e nas recomendações de calagem pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo para esse sistema (Comissão..., 2000).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em áreas de lavouras conduzidas no sistema plantio direto, situadas na região do Planalto Médio do Rio Grande do Sul. Foram utilizadas seis áreas de lavoura, com sete cultivos, em solos com ampla variabilidade dos indicadores de acidez e fósforo disponível (Mehlich I).

3.1 Caracterização da região do Planalto Médio

A região do Planalto é a responsável pela maior parte da produção de grãos no RS, principalmente trigo, soja, milho e cevada, com destaque especial para o Planalto Médio (IBGE, 1996).

As áreas selecionadas estão localizadas na região do Planalto Médio, que se inicia e se eleva da parte central do Rio Grande do Sul para o Nordeste (Figura 1). Nesta região, as altitudes oscilam entre 400 e 700 m. O relevo é ondulado a suavemente ondulado, formando um conjunto de coxilhas. O clima da região é subtropical úmido, com chuvas distribuídas uniformemente durante o ano (Brasil, 1973). Segundo dados registrados na Estação Agrometeorológica da FUNDACEP em Cruz Alta, na média dos últimos 10 anos, a precipitação anual foi de 1827 mm, a temperatura mensal média de 18,7 °C, sendo dezembro o mês mais quente, com média de 23,8 °C, chegando a registrar 35,2 °C e julho o mês mais frio, com média de 13 °C, chegando a registrar a mínima de 1,6 °C (FUNDACEP, 2003, dados não publicados). Os solos da região são classificados segundo EMBRAPA (1999), como Latossolos Vermelhos distróficos, derivados do arenito de Botucatu e da mistura de arenito com basalto, dando origem às Unidades de Mapeamento Cruz Alta e Passo Fundo, respectivamente. São solos ácidos, com baixa saturação por bases, apresentando problemas de toxidez de alumínio e com pequena reserva de nutrientes disponíveis (Brasil, 1973). Nos municípios onde estão localizadas as áreas utilizadas, predominam os Latossolos Vermelhos distróficos típicos

(Streck et al., 2002), profundos e bem drenados e com textura argilosa (acima de 40 % de argila) na região de Não-Me-Toque, Ibirubá e com textura média (menos de 35 % de argila) na região de Cruz Alta.

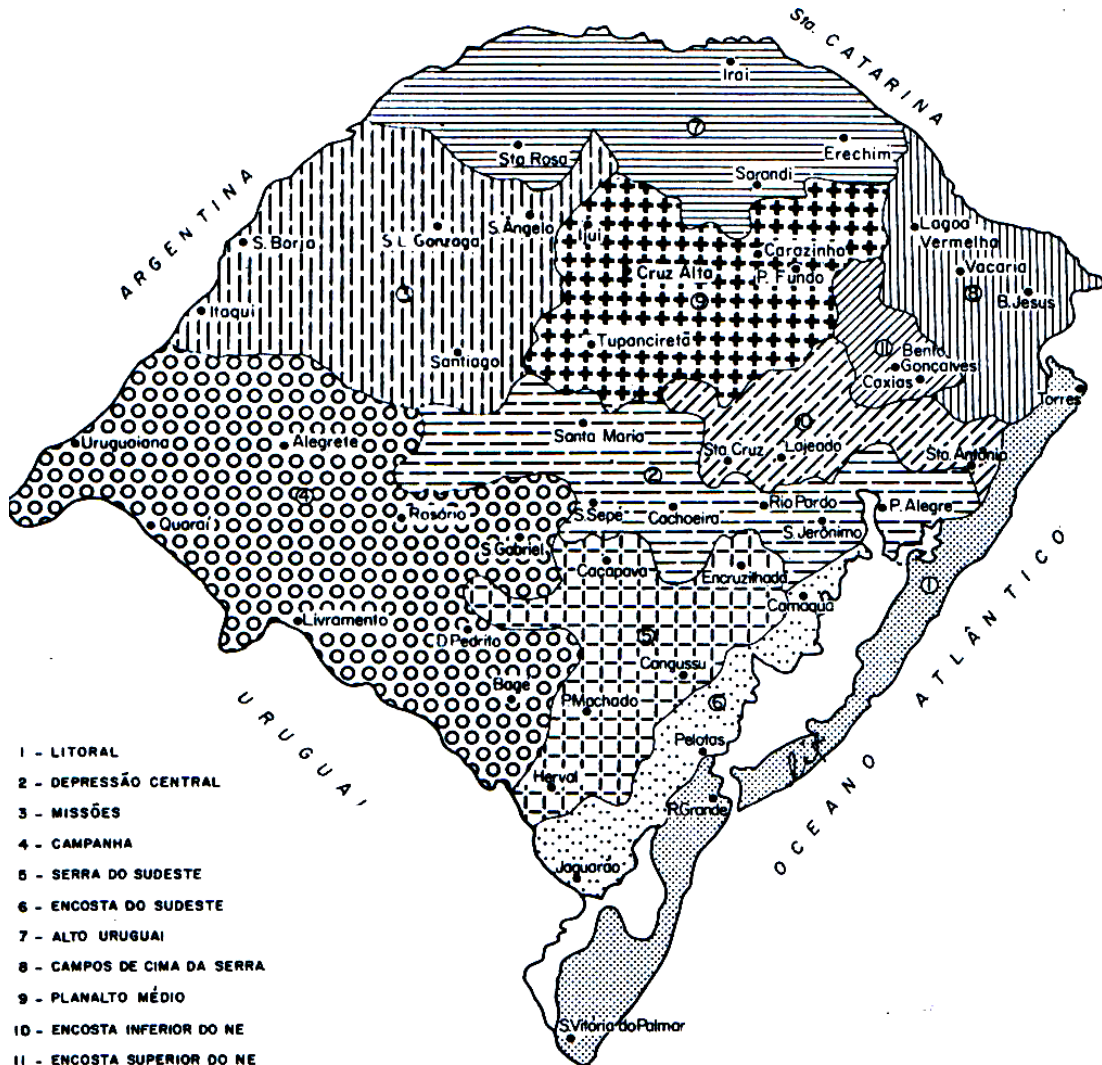


FIGURA 1. Mapa das regiões fisiográficas do Estado do Rio Grande do Sul (Brasil, 1973).

3.2 Caracterização das áreas de lavoura

O trabalho foi desenvolvido em seis áreas de lavoura, com sete cultivos. Estas áreas foram selecionadas dentre, aproximadamente, 30 lavouras na região do Planalto, em função do tempo de adoção do sistema plantio direto, da última aplicação de calcário, da variabilidade da fertilidade do

3.2.1 Histórico e caracterização do solo nas áreas de lavoura

3.2.1.1 Área 1 - Soja

As amostras de solo e planta foram coletadas em área de aproximadamente 5 ha⁻¹, cultivada há 4 anos no sistema plantio direto, instalado em campo nativo com mobilização do solo. A última correção da acidez do solo foi realizada no inverno de 1998, com 4,0 Mg ha⁻¹ de calcário, incorporado ao solo. Desde a safra do verão 1998/99, a área foi cultivada com a seguinte seqüência de culturas: soja / aveia preta (*Avena strigosa*) / soja / trigo (*Triticum aestivum*) / soja / trigo / soja.

O solo apresentava, na instalação da soja, o teor de argila variando de 34 a 46 %; o pH em água de 4,7 a 5,4; o índice SMP de 5,6 a 6,3; a matéria orgânica (digestão úmida) de 2,0 a 3,4 %; o alumínio trocável (KCl 1 mol L⁻¹) 0,1 a 0,9 cmol_c dm⁻³; o cálcio trocável (KCl 1 mol L⁻¹) de 1,6 a 4,1 cmol_c dm⁻³; o magnésio trocável (KCl 1 mol L⁻¹) de 0,7 a 1,8 cmol_c dm⁻³; o fósforo disponível (Mehlich I) de 3,0 a 12 mg dm⁻³; e o potássio disponível (Mehlich I) de 107 a 212 mg dm⁻³, na camada 0 a 10 cm.

3.2.1.2 Área 2 - Soja

As amostras de solo e planta foram coletadas em área de aproximadamente 10 ha⁻¹, cultivada há 9 anos no sistema plantio direto. A última correção da acidez do solo foi realizada no inverno de 1998, com aplicação superficial de 2,7 Mg ha⁻¹ de calcário, sem incorporação ao solo. Desde a safra do verão 1998/99, a área foi cultivada com a seguinte seqüência de culturas: milho (*Zea mays*) / trigo / soja / consórcio aveia preta e azevém (*Lolium multiflorum*) / soja / consórcio aveia preta e azevém / soja.

O solo apresentava, na instalação da soja, o teor de argila variando de 34 a 35 %; o pH em água de 5,0 a 5,4; o índice SMP de 6,1 a 6,5; a matéria orgânica (digestão úmida) de 2,1 a 2,9 %; o alumínio trocável (KCl 1 mol L⁻¹) 0,0 a 0,2 cmol_c dm⁻³; o cálcio trocável (KCl 1 mol L⁻¹) de 2,9 a 3,4 cmol_c dm⁻³; o magnésio trocável (KCl 1 mol L⁻¹) de 1,4 a 1,6 cmol_c dm⁻³; o fósforo disponível (Mehlich I) de 3,6 a 9,4 mg dm⁻³; e o potássio disponível (Mehlich I) de 68 a 184 mg dm⁻³, na camada 0 a 10 cm.

3.2.1.3 Área 3 - Soja

As amostras de solo e planta foram coletadas em área de aproximadamente 8 ha^{-1} , cultivada há 8 anos no sistema plantio direto. A última correção da acidez do solo foi realizada em 1993, com $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário, incorporado ao solo. Desde a safra do verão 1998/99, a área foi cultivada com a seguinte seqüência de culturas: milho / consórcio aveia preta e azevém / soja / consórcio aveia preta e azevém / soja / consórcio aveia preta e azevém / soja.

O solo apresentava, na instalação da soja, o teor de argila variando de 40 a 44 %; o pH em água de 4,5 a 5,1; o índice SMP de 5,7 a 6,2; a matéria orgânica (digestão úmida) de 2,4 a 2,7 %; o alumínio trocável ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) de $0,2$ a $0,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; o cálcio trocável ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) de $3,1$ a $3,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; o magnésio trocável ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) de $1,5$ a $1,6 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; o fósforo disponível (Mehlich I) de $3,4$ a $5,5 \text{ mg dm}^{-3}$; e o potássio disponível (Mehlich I) de 58 a 95 mg dm^{-3} , na camada 0 a 10 cm.

3.2.1.4 Área 4 - Soja

As amostras de solo e planta foram coletadas em área de aproximadamente 5 ha^{-1} , cultivada há 6 anos no sistema plantio direto. A última correção da acidez do solo foi realizada no inverno de 1995, com $3,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário, incorporado ao solo. Desde a safra do verão 1998/99, a área foi cultivada com a seguinte seqüência de culturas: soja / aveia preta / milho / cevada / soja / trigo / soja / trigo / soja.

O solo apresentava, na instalação da cultura, o teor de argila > 56 %; o pH em água variando de 5,1 a 5,6; o índice SMP de 5,7 a 6,0; a matéria orgânica (digestão úmida) de 3,6 a 3,9 %; o alumínio trocável ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) de $0,0$ a $0,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; o cálcio trocável ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) de $6,5$ a $8,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; o magnésio trocável ($\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$) de $2,2$ a $3,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; o fósforo disponível (Mehlich I) de $9,8$ a 18 mg dm^{-3} ; e o potássio disponível (Mehlich I) 196 a 247 mg dm^{-3} , na camada 0 a 10 cm.

3.2.1.5 Área 5 - soja

As amostras de solo e planta foram coletadas em área de aproximadamente 20 ha^{-1} , cultivada há 5 anos no sistema plantio direto. A

última correção da acidez do solo foi realizada em maio de 2000, com aplicação superficial de 2,5 Mg ha⁻¹ de calcário, sem incorporação ao solo. Desde a safra do verão 1998/99, a área foi cultivada com a seguinte seqüência de culturas: soja / trigo / soja / cevada / soja / trigo / soja.

O solo apresentava, na instalação da cultura, o teor de argila > 56 %; o pH em água variando de 5,6 a 6,0; o índice SMP de 5,7 a 6,0; a matéria orgânica (digestão úmida) de 2,5 a 3,4 %; o alumínio trocável (KCl 1 mol L⁻¹) de 0,0 a 0,1 cmol_c dm⁻³; o cálcio trocável (KCl 1 mol L⁻¹) de 5,4 a 7,2 cmol_c dm⁻³; o magnésio trocável (KCl 1 mol L⁻¹) de 2,4 a 3,4 cmol_c dm⁻³; o fósforo disponível (Mehlich I) de 5,2 a 14 mg dm⁻³; e o potássio disponível (Mehlich I) 125 a 203 mg dm⁻³, na camada 0 a 10 cm .

3.2.1.6 Área 6 e 7 - Soja e Cevada

As amostras de solo e planta foram coletadas na mesma área de lavoura na cevada, safra 2001 (Área 7) e na soja, safra 2001/2002 (Área 6) em área de aproximadamente 25 ha⁻¹, cultivada há 9 anos no sistema plantio direto. A última correção da acidez do solo foi realizada em junho de 1999, com aplicação superficial de 2,3 Mg ha⁻¹ de calcário, sem incorporação ao solo. Desde a safra do verão 1998/99, a área foi cultivada com a seguinte seqüência de culturas: soja / trigo / soja / aveia preta / soja / trigo / soja / cevada / soja.

O solo apresentava, na instalação da soja, o teor de argila > 56 %; o pH em água variando de 5,2 a 6,3; o índice SMP de 5,8 a 6,3; a matéria orgânica (digestão úmida) de 3,3 a 3,8 %; o alumínio trocável (KCl 1 mol L⁻¹) de 0,0 a 0,1 cmol_c dm⁻³; o cálcio trocável (KCl 1 mol L⁻¹) de 7,2 a 8,8 cmol_c dm⁻³; o magnésio trocável (KCl 1 mol L⁻¹) de 3,5 a 4,3 cmol_c dm⁻³; o fósforo disponível (Mehlich I) de 6,9 a 9,6 mg dm⁻³; e o potássio disponível (Mehlich I) 149 a 157 mg dm⁻³, na camada 0 a 10 cm.

3.3 Condução das áreas

Os tratos culturais e a adubação foram realizados de acordo com as Indicações Técnicas para Cultura da Soja no RS/SC (2001) e com as Indicações Técnicas para Produção de Cevada Cervejeira (2001). A adubação

foi realizada em linha na semeadura das culturas. Nessas áreas, não foi utilizada adubação foliar e aplicação de fosfato natural ao solo.

A cultura da cevada, safra de inverno 2001, foi levemente prejudicada pela ocorrência de geadas no início da segunda quinzena de setembro. A soja foi prejudicada no município de Cruz Alta pela precipitação abaixo da média normal para a região na fase de estabelecimento da cultura, especialmente no mês de dezembro/2001. O rendimento de grãos não foi limitado por deficiência hídrica nas demais áreas de soja utilizadas.

3.4 Amostragem

Na cultura da cevada, as amostras foram coletadas em 30 pontos e na soja, em 20 pontos por área, distribuídos de forma a contemplar a heterogeneidade das lavouras. Em cada ponto, foram demarcadas áreas de 1,0 x 1,2 m, para a coleta de amostras de tecido vegetal (folhas), de solo e avaliação do rendimento de grãos.

Os pontos foram demarcados no momento da coleta de tecido vegetal, com base nas diferenças visuais no desenvolvimento das plantas. Após a coleta de tecido, foram amarradas fitas (com brilho) no terço superior, em 3 a 4 plantas, e um pacote plástico contendo a identificação do ponto. As fitas, pelo seu brilho, permitiram sua localização dentro da lavoura, para coleta, nos mesmos pontos, de solo e de grãos.

3.4.1 Tecido vegetal

O tecido vegetal foi coletado somente nas áreas de soja, no dia 31 de janeiro de 2002, no estágio de pleno florescimento (EMBRAPA, 1997). Foram coletadas, manualmente, 30 folhas no terço superior das plantas em cada ponto.

3.4.2 Grãos

As plantas, dentro da área de cada ponto, foram cortadas manualmente com foice e processadas em trilhadeira mecânica estacionária.

3.4.3. Solo

A amostragem do solo foi realizada com pá de corte, coletando uma fatia de solo de 3 a 5 cm de espessura, na largura das entrelinhas da última cultura, de modo que a linha de plantio estivesse no centro da faixa de coleta (Comissão..., 2000). As amostras foram coletadas nas camadas de 0 a 10 cm e 10 a 20 cm. Nas áreas de cevada, foram coletadas 3 subamostras e nas áreas de soja foram coletadas 2 subamostras em cada ponto, para formar uma amostra.

3.5 Análises e determinações

3.5.1 Tecido vegetal

As amostras de tecido vegetal foram secas em estufa na temperatura de 60 °C, moídas, e digeridas, a seco (EMBRAPA, 1997). Foi utilizada, como solução digestora, HCl 1 mol L⁻¹ substituindo HNO₃. Os teores de fósforo e potássio foram determinados por colorimetria e fotometria de chama, respectivamente; o cálcio e o magnésio, utilizando solução de Sr 0,3 % substituindo a solução de La 0,1 %, foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica.

3.5.2 Grãos

Após secas em estufa a 60 °C, as amostras de grãos de soja e cevada foram limpas, excluindo manualmente impurezas (talos, vagens e solo), pesadas e determinada a umidade, que foi, posteriormente, corrigida para 13 % e calculado o rendimento de grãos por hectare.

Devido à utilização de várias áreas de lavoura localizadas em diferentes regiões, ocorrem variações de textura do solo, precipitação, manejo, tempo de adoção do sistema e de aplicação de calcário, etc. Para diminuir a influência da variabilidade entre as áreas e efetuar a avaliação conjunta das informações obtidas nas áreas de lavoura, o rendimento relativo de grãos, foi calculado dentro de cada área tomando seu rendimento máximo como 100 % e os demais proporcionalmente ao máximo, possibilitando o uso de uma ampla base de dados.

3.5.3 Solo

As amostras de solo, após secas ao ar, moídas e peneiradas, foram analisadas de acordo com os procedimentos descritos em Tedesco et al. (1995), exceto o pH em CaCl_2 , que foi determinado conforme EMBRAPA (1997). O pH em água, o pH em CaCl_2 ($0,01 \text{ mol L}^{-1}$) e o índice SMP foram determinados por potenciômetro com eletrodo de vidro combinado. Os teores de fósforo e potássio foram extraídos pelo método Mehlich I, sendo o fósforo determinado por colorimetria e o potássio por fotometria de chama. A matéria orgânica, foi digerida pelo método de oxidação por solução sulfocrômica com calor externo, e determinada por espectrofotometria. Os teores de cálcio, magnésio, e alumínio trocáveis foram extraídos com $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$, sendo os dois primeiros determinados por espectrofotometria de absorção atômica e o último por titulação com NaOH .

3.6 Análise estatística

Foram efetuadas análises de correlação e regressão simples e múltiplas, entre os valores dos atributos químicos, com ênfase nos indicadores de acidez e fertilidade do solo, concentração dos nutrientes no tecido vegetal e rendimento relativo de grãos.

As regressões simples foram realizadas no programa Sigma Plot 8.0 (Sigma Plot 8.0, 2002). As regressões múltiplas pelo procedimento Stepwise (SAS, 1991), que selecionou as variáveis com 25 % de significância.

As regressões simples foram realizadas utilizando modelos lineares e polinomiais quadrático, sigmóide e logarítmico. O modelo selecionado foi o que melhor descrevia a distribuição dos pontos. O tipo sigmóide foi utilizado nas relações entre o rendimento de grãos e os indicadores de acidez e fertilidade do solo e de planta, por apresentar comportamento semelhante ao modelo quadrático e ao de Mitscherlich na primeira parte da curva e na segunda parte da curva semelhante ao modelo de Mitscherlich, sem diminuição do rendimento pelo aumento dos teores de nutrientes no solo, como mostra o modelo quadrático. No entanto diferentemente do modelo de Mitscherlich, segundo o qual a curva tende aos rendimentos máximos, o modelo sigmóide considera a média dos pontos também nessa porção da curva. Isto é

importante, pois o rendimento relativo de grãos 100 % de cada área de lavoura foi considerado igual ao máximo obtido em cada área e não o rendimento médio de cada área ou das áreas, e que pelo menos 20 % do rendimento relativo não foi limitado por fatores ligados à fertilidade do solo nas lavouras conduzidas no sistema plantio direto.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em geral, as áreas de menor teor de argila (Áreas 1, 2 e 3) apresentam maiores níveis de acidez, menores teores de matéria orgânica e menor rendimento de grãos do que as áreas de textura mais argilosa (Áreas 4, 5, 6 e 7) (Item 3.2.1 e Apêndice 1). Parte desta diferença pode ser explicada pelo diferente tempo de cultivo dessas áreas. Na região de Cruz Alta, a expansão das áreas de lavoura em substituição à tradicional pecuária sobre campo nativo é relativamente recente, ocorrendo especialmente a partir da década de 90, enquanto nos outros municípios onde foram realizadas as coletas, Ibirubá e Não-Me-Toque, a agricultura é praticada desde, pelo menos, os anos 60, e implantadas, principalmente, em substituição às áreas de mata nativa, conduzidas no sistema convencional. Nestes municípios, a ampla adoção do sistema plantio direto ocorreu no final da década de 80 e início década de 90.

A utilização de áreas de lavoura, sem adição de doses de insumos, resulta em maior dispersão dos pontos do que o observado em áreas experimentais. A coleta de elevado número de pontos por área, em diferentes áreas, por outro lado, representa melhor a condição de lavoura, para a qual são elaboradas as recomendações. Foi utilizado o rendimento relativo de grãos para análise conjunta de todas as áreas. A variabilidade dos fatores que interagem na definição do rendimento de grãos também resulta em uma maior dispersão dos pontos e, conseqüentemente, menores valores dos coeficientes de ajuste das curvas de resposta (R^2).

Inicialmente serão apresentadas as relações entre os tipos de acidez do solo e os seus indicadores e com indicadores de fertilidade do solo. Na seqüência, serão apresentadas as relações entre o rendimento relativo de grãos e alguns indicadores de acidez e de fertilidade do solo e com a concentração de nutrientes no tecido vegetal.

4.1 Relação entre a acidez do solo e seus indicadores

A Figura 3 mostra a elevada relação do pH em água com o alumínio trocável ($R^2=0,81$ e $0,89$), nas camadas de solo de 0-10 e 0-20 cm. As equações encontram-se no Apêndice 2. Há uma evidência clara de que, em pH maior que 5,5, ocorre um valor muito baixo de alumínio trocável e, quando o pH do solo é 5,0, o valor é de aproximadamente $0,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. É provável que o valor do alumínio trocável, em pH superior a 5,5, na camada de 0-10 cm, próximo de $0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e na camada 0-20 cm a $0,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, se deva à presença de hidrogênio trocável, embora esse represente menos de 5% da acidez trocável (Quaggio, 1986; Volkweiss, 1989; Bohnen et al., 2000), e não pela presença de alumínio trocável. Segundo Volkweiss (1989), os teores de alumínio trocável são muito baixos em solos com o pH igual ou superior a 5,5, devido à solubilidade do $\text{Al}(\text{OH})_3$ e outros óxi-hidróxidos de alumínio ser baixa e muito dependente do pH. Assim, à medida que o pH diminui abaixo de 5,5 os teores de alumínio trocável aumentam sensivelmente (Figura 3), como também foi observado por Kaminski (1974). Segundo este autor, os teores de alumínio trocável possuem uma faixa de tamponamento no solo até pH em torno de 5,5; é provável que esse elemento seja o primeiro a ser neutralizado. Por isso, nos solos com pH próximos a esse valor, o valor de alumínio trocável é baixo ou não detectado com extração com sal neutro não tamponado. A utilização do pH de 5,5 como valor de referência para recomendação de calcário é adequado, pois o teor de alumínio trocável nesse valor é muito baixo, não causando limitação ao desenvolvimento das plantas. Na camada de 0-20 cm, a relação apresenta comportamento similar, com valores um pouco mais elevados de alumínio trocável e menores de pH. Verifica-se o efeito da calagem na neutralização do alumínio trocável e aumento do pH do solo, principalmente, na camada de 0-10 cm. A diferença nos valores de R^2 , menores da camada de 0-10 cm ($0,81$) do que (Figura 3) na camada de 0-20 cm ($0,89$) pode ser consequência da maior complexação do alumínio, tanto na fase sólida como na solução do solo, pelo maior teor de matéria orgânica na camada superficial (Salet, 1994; 1998). Isso demonstra que o pH em água apresenta melhor relação com alumínio trocável nas camadas de solo com baixos teores de matéria orgânica, onde há menor efeito de complexação.

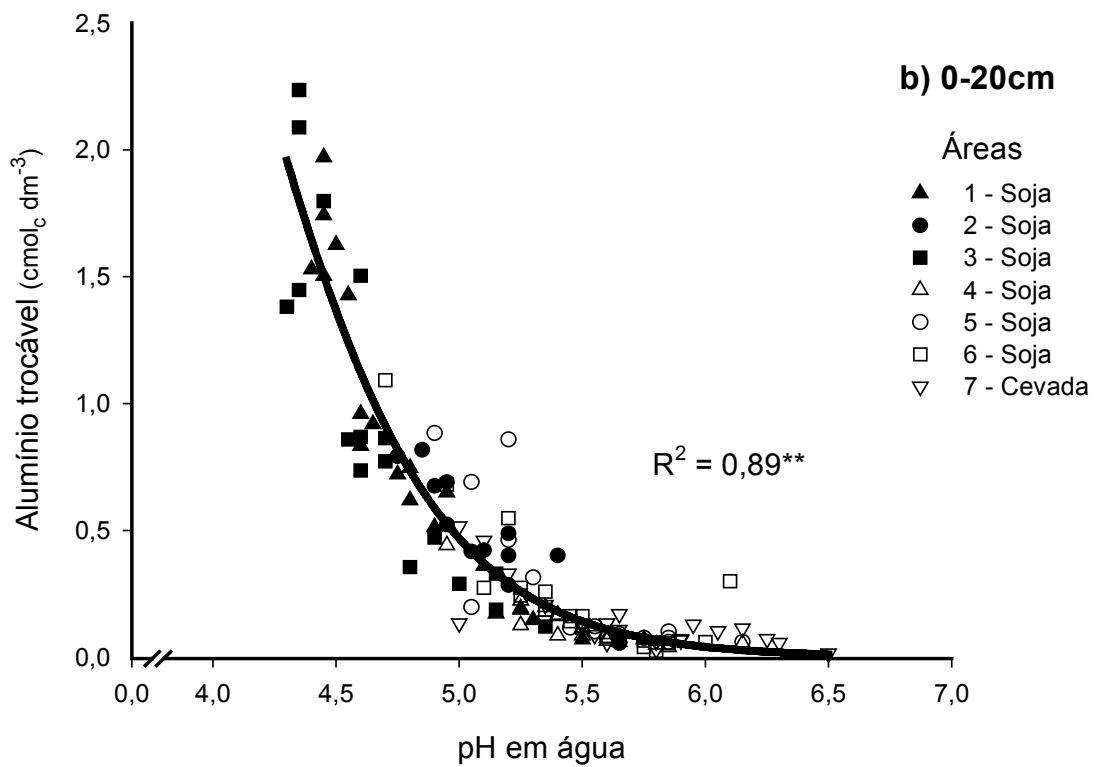
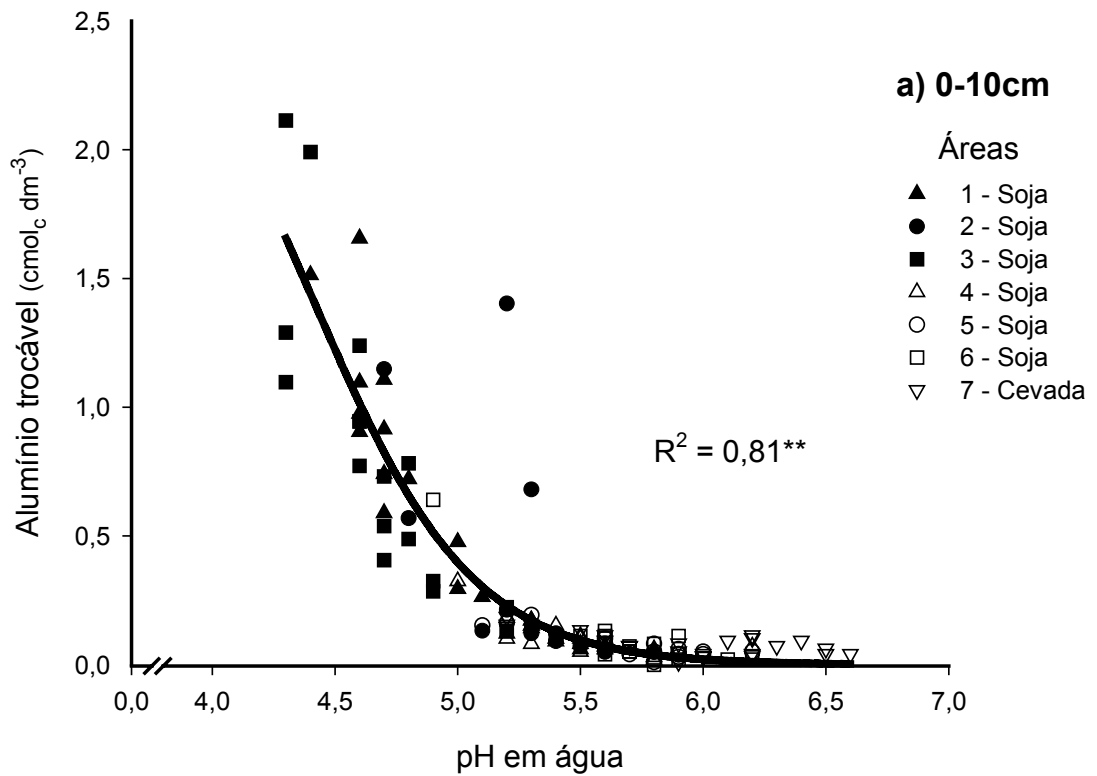


FIGURA 3. Relação entre o pH em água e o alumínio trocável nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

Portanto, o pH em água é mais adequado para representar a possível toxidez por alumínio em solos com baixos teores de matéria orgânica.

Apesar de ser ainda muito significativa ($P < 0,01$), a relação entre o pH em água e a acidez potencial (H+Al) apresenta, em relação ao alumínio trocável, menores coeficientes de determinação (R^2), em ambas as camadas (Figura 4). Há uma diminuição da acidez potencial com o aumento do pH em água. A acidez potencial é afetada, principalmente, pelos teores de argila, de óxidos e de matéria orgânica do solo. A calagem promove maior produção de biomassa vegetal e de resíduos, que mantidos em superfície, aumentam o teor de matéria orgânica. Solos com textura média possuem menor acidez potencial que solos de textura argilosa, que tendem a apresentar também maior teor de matéria orgânica. Na avaliação conjunta das áreas (Figura 4), o pH em água de 5,5 corresponde a $4,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de H+Al (acidez potencial), porém, de acordo com a textura do solo, o valor de H+Al é em torno de $3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para os solos de textura média (Áreas 1, 2 e 3) e em torno de $5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para os solos mais argilosos (Áreas 4, 5, 6 e 7). Por isso, seria mais adequado o tratamento diferenciado da acidez potencial de acordo com o grupo textural do solo.

Ocorre uma elevada relação ($P < 0,01$) entre o pH em água e a saturação por alumínio (Figura 5), sendo o valor de R^2 maior na camada de 0-20 cm (0,90) do que na de 0-10 cm (0,82). Observa-se o efeito do aumento do pH do solo e diminuição da saturação por alumínio. Na camada 0-10 cm, em pH igual a 5,5, a saturação de alumínio é menor do que 1 %, consequência da acidez trocável nesse pH ser muito baixa. A saturação por alumínio é de 5 % em pH do solo 5,0. A relação do pH em água com a saturação por alumínio apresenta mesma tendência e valores de R^2 muito próximos dos observados com o alumínio trocável. Isso difere do observado por Volkweiss (1989), onde as relações mais estreitas (maiores valores de R^2) foram obtidas entre o pH e a saturação por alumínio em comparação à relação entre o pH em água com o alumínio trocável. O comportamento do alumínio trocável não depende somente do seu teor na solução, que é controlado pelo pH e solubilidade dos óxi-hidróxidos de alumínio presentes, mas também, pela quantidade de cargas que o solo apresenta em cada pH (CTC efetiva). A diferença nos valores de R^2 nas relações entre as camadas de solo (Figuras 5a e 5b) pode ser atribuída à

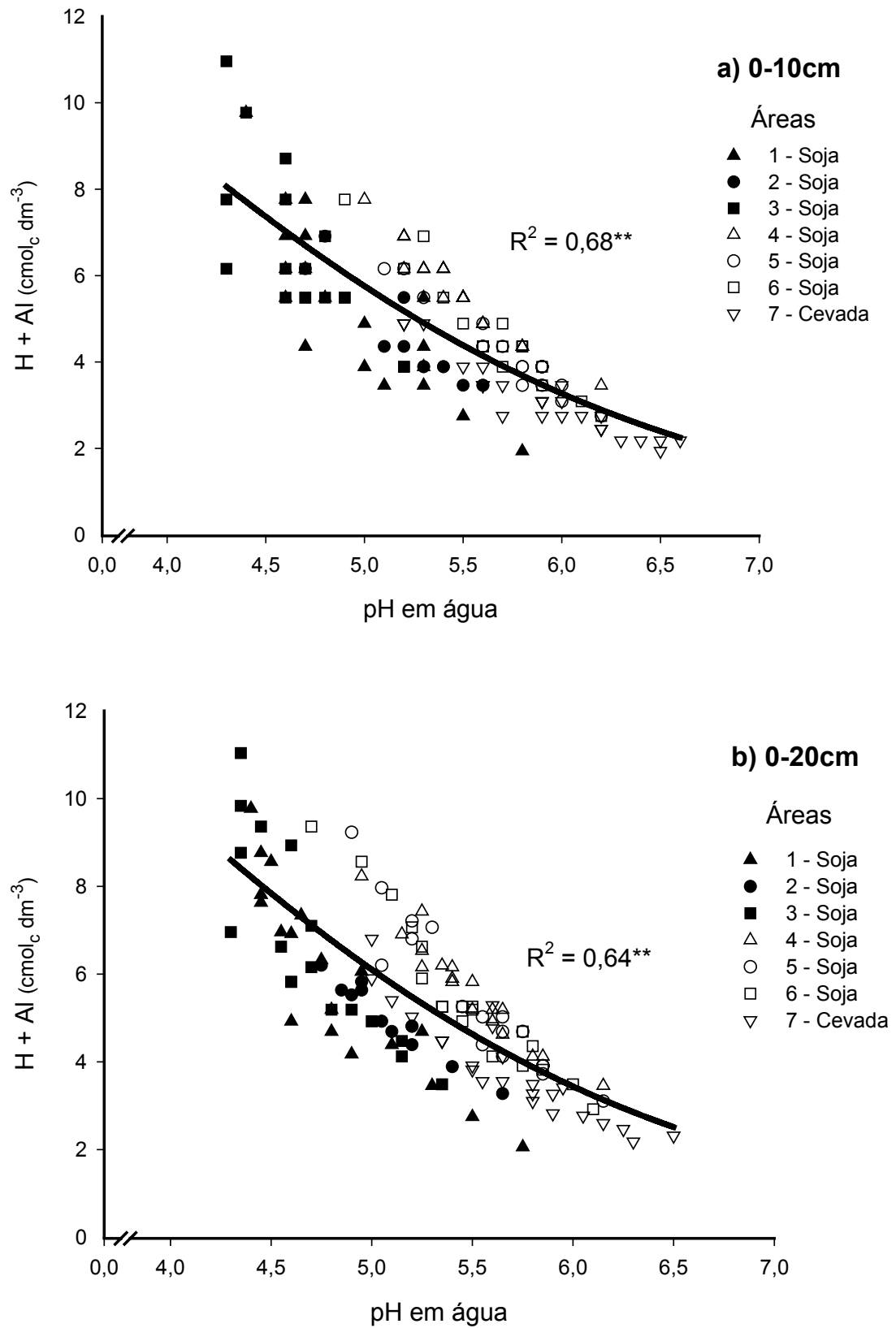


FIGURA 4. Relação entre o pH em água e H+Al nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

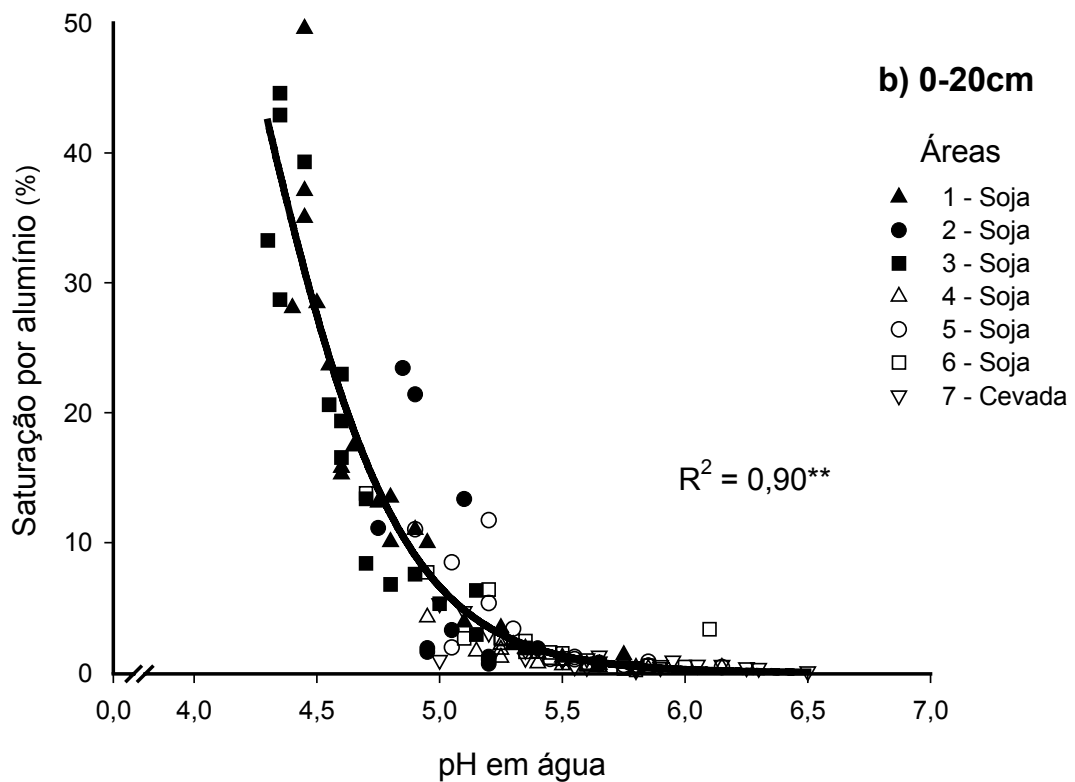
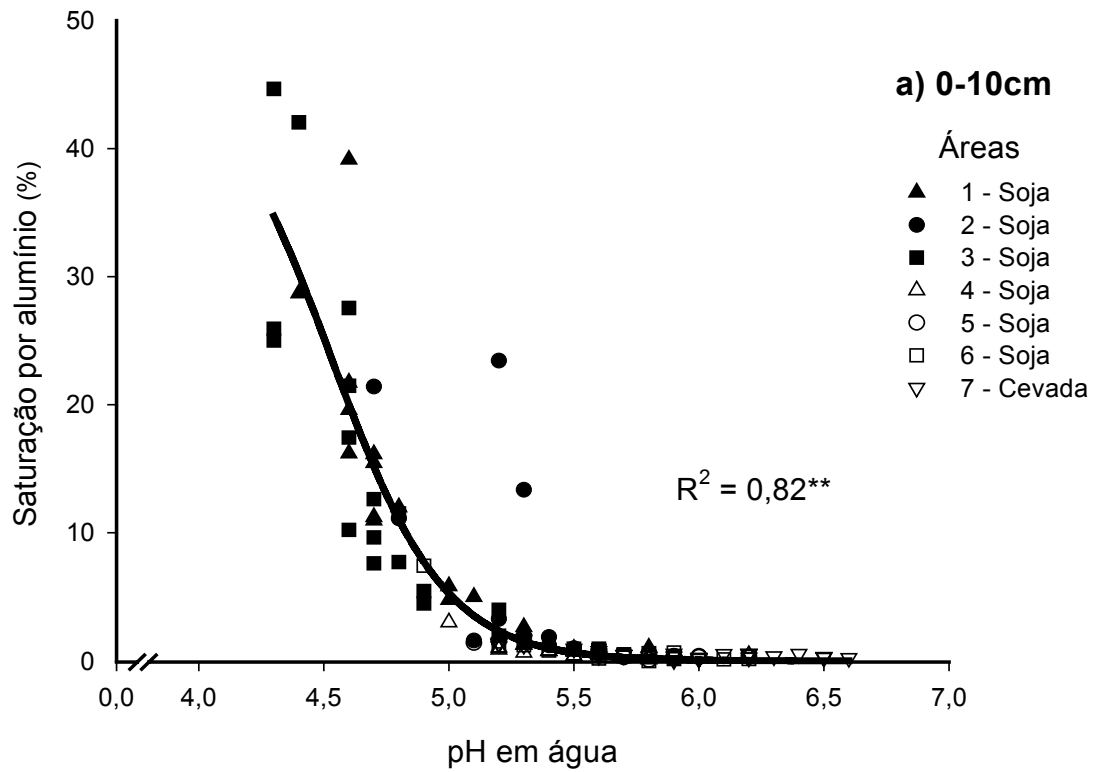


FIGURA 5. Relação entre o pH em água e a saturação por alumínio nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

maior influência do teor de matéria orgânica, na complexação do alumínio na camada de 0-10 cm. A maior saturação por alumínio e maiores valores de R^2 na camada de 0-20 cm, em relação a camada de 0-10 cm, deve-se a diminuição do teor de MO e da sua influência no teor de alumínio trocável, assim ao pelo aumento do teor de alumínio em profundidade e calagem superficial. Na maioria das áreas, o calcário foi incorporado ao solo somente na adoção do sistema (Item 3.2.1).

Observa-se, na Figura 6, uma estreita relação positiva ($R^2=0,92$; $P < 0,01$) entre a saturação por bases e o pH em água, nas duas camadas de solo. O pH é condicionado pela proporção de bases na CTC, interage diretamente com os nutrientes na solução do solo, onde a atividade do hidrogênio é medida. No sistema plantio direto, o valor do pH adotado pela Comissão... (1995) para recomendação de calagem até 2000 era 6,0, que corresponde a 70 % de saturação por bases, com a acidez potencial obtida com extração com acetato de cálcio a pH 7,0 ou calculada pela equação de Escosteguy & Bissani (1999). A partir de 2000, a Comissão de Química e Fertilidade do Solo (Comissão..., 2000) passou a adotar, para tomada de decisão de calagem, o pH em água 5,5 (principal indicador) e/ou saturação de bases de 60 %, calculada pela equação de Escosteguy & Bissani (1999). Na obtenção da acidez potencial pela equação de Kaminski et al. (2001), utilizada pelos laboratórios da ROLAS a partir de 2002 (Figura 6), o pH 5,5 corresponde a 70 % de saturação por bases. O valor de 60 % de saturação por bases corresponde, nesse caso, ao pH em água de 5,1, nas duas camadas de solo. Assim, há uma diferença de 10 % no valor da saturação por bases, pela alteração da equação na estimativa da acidez potencial. No entanto, essa diferença deveria ocorrer para solos com alto poder tampão ou em pH muito ácido, que não é o caso para a maioria das áreas utilizadas neste trabalho.

A Figura 7 apresenta relação entre o pH em água e Al/Ca+Mg na camadas de 0-10 e 0-20 cm do solo. Como esperado, à medida que aumenta o pH diminui a relação Al/Ca+Mg. Embora presente alta significância ($P < 0,01$) nas duas camadas de solo, essa relação é melhor representada na camada de 0-20 cm, pelo maior valor de R^2 (0,86) do que na camada de 0-10 cm (0,75). Esse comportamento também é observado nas relações com

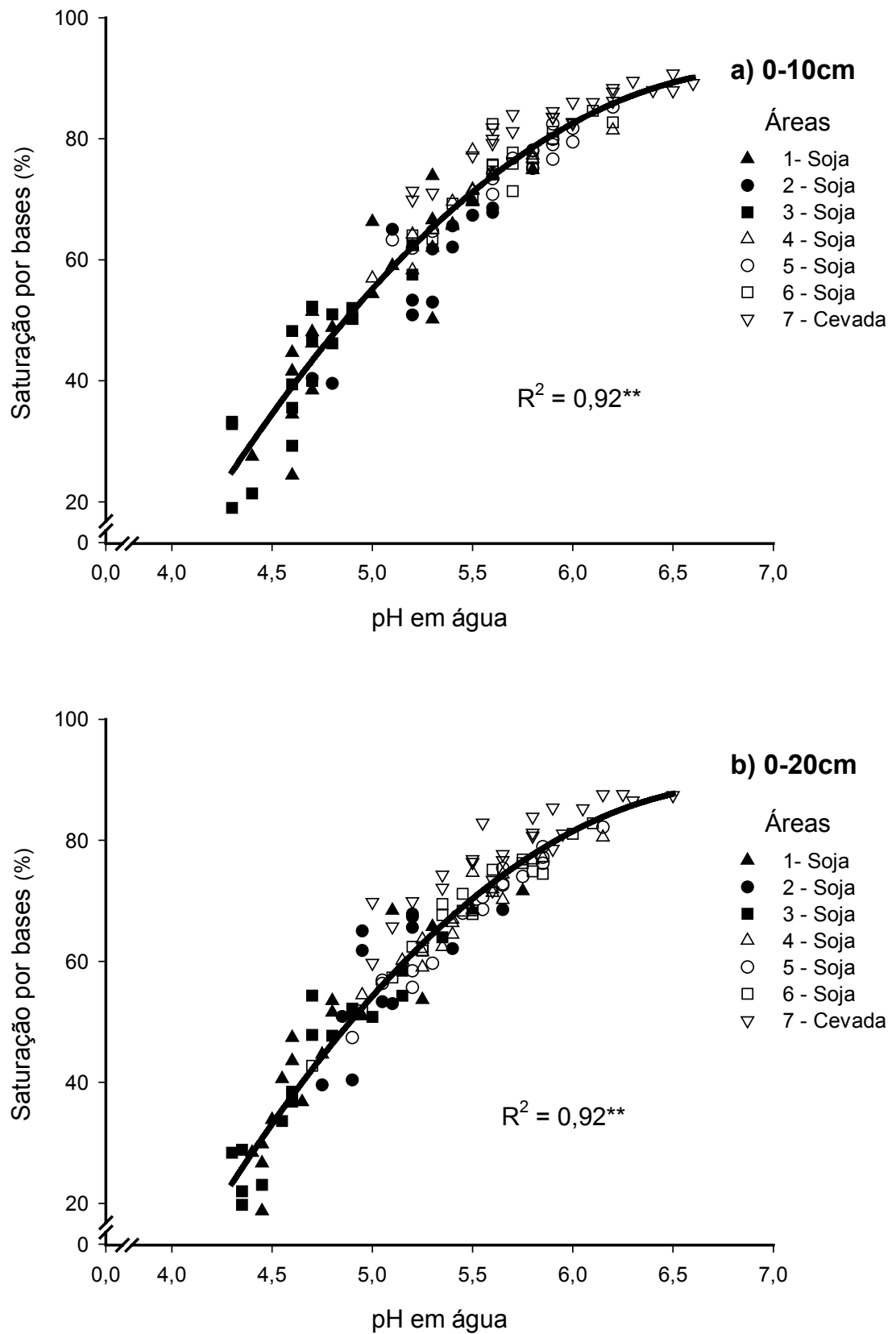


FIGURA 6. Relação entre o pH em água e a saturação por bases nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

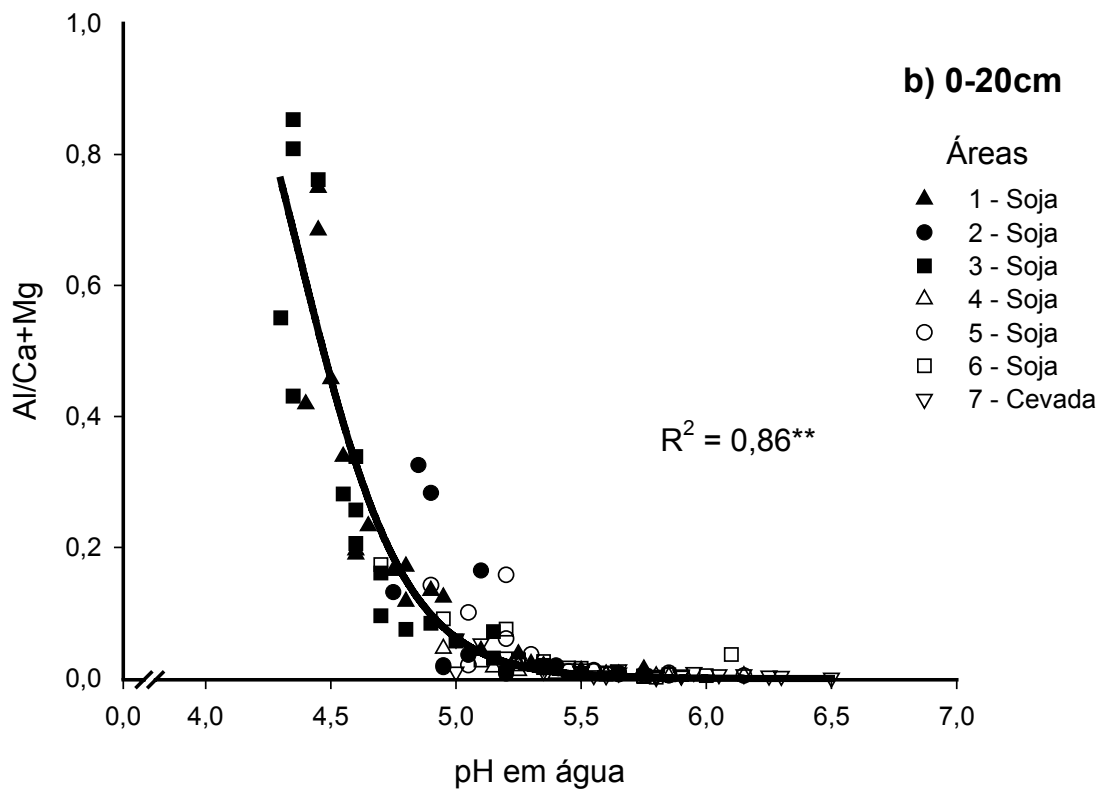
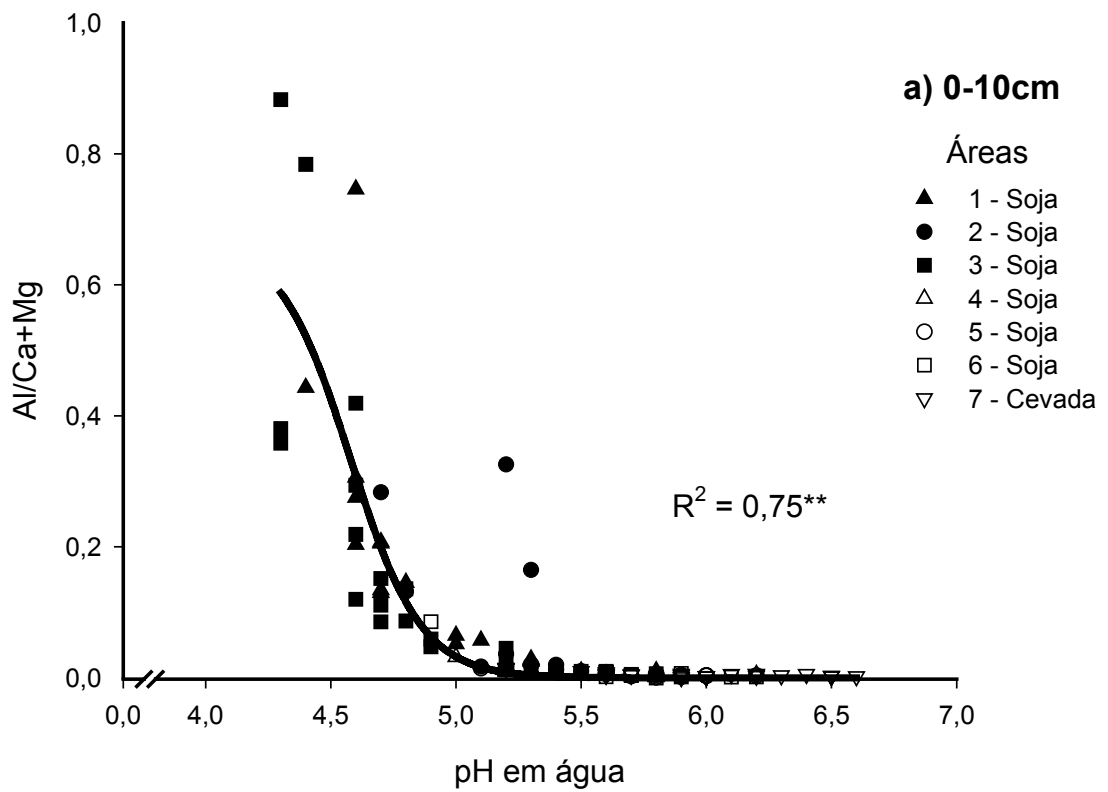


FIGURA 7. Relação entre o pH em água e Al/Ca+Mg nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

alumínio trocável e com saturação por alumínio, e deve ser devido às mesmas causas. A diferença entre os valores dos coeficientes R^2 , nas relações com a saturação por alumínio e $Al/Ca+Mg$, deveria ser menor, pois a principal diferença entre elas é a participação do potássio na saturação por alumínio, e a sua contribuição na saturação é bem menor do que a do cálcio e do magnésio. Em pH 5,5, assim como o alumínio trocável e a saturação por alumínio, o valor da relação $Al/Ca+Mg$ é muito baixo.

A relação entre a medida de pH em dois tipos de solução, em água e em $CaCl_2$, nas duas camadas de solo é muito estreita ($R^2 > 0,96$ - Figura 8). Isso pode ser um indicativo de que a influência de sais, nessas áreas, não é importante. Em geral, nesses solos, observou-se uma variação de 0,2 a 0,3 unidades para menos na solução de $CaCl_2$, enquanto para solos do estado de São Paulo foi observado uma variação de 0,5 a 0,6 unidades de pH (Raij, 1991).

A relação do alumínio trocável com $H+Al$ (Figura 9) apresenta valores intermediários de R^2 ; de 0,51 na camada de 0-10 cm e 0,61 na camada de 0-20 cm, porém ainda muito significativos ($P < 0,01$). Essa relação pode ser, parcialmente, explicada pela acidez trocável ser um dos compartimentos da acidez potencial. Observa-se (Figura 4 e 9) uma tendência de separação dos pontos, em função da textura do solo; maior acidez potencial nas áreas mais argilosas (Áreas 4 a 6). As áreas de textura média (Áreas 1 a 3), apresentam maior amplitude de acidez e valores superiores de alumínio trocável. Na Área 1, o sistema foi instalado em campo nativo há 4 anos com aplicação de calcário e incorporação na implantação do sistema e, na Área 3, o solo não recebeu calagem desde 1993, o que justifica os maiores teores de alumínio trocável.

A relação entre o alumínio trocável e a saturação por alumínio nas duas camadas de solo é muito estreita, com valores de R^2 , 0,97 (camada 0-10 cm) e 0,96 (camada 0-20 cm), e muito significativa ($P < 0,01$) (Figura 10). A saturação por alumínio representa muito bem o teor de alumínio trocável (acidez trocável) no solo nas duas camadas. Assim, os teores de 0,5 e 1,0 $cmol_c dm^{-3}$ de alumínio trocável correspondem a 8 e 18 % de saturação por alumínio, respectivamente.

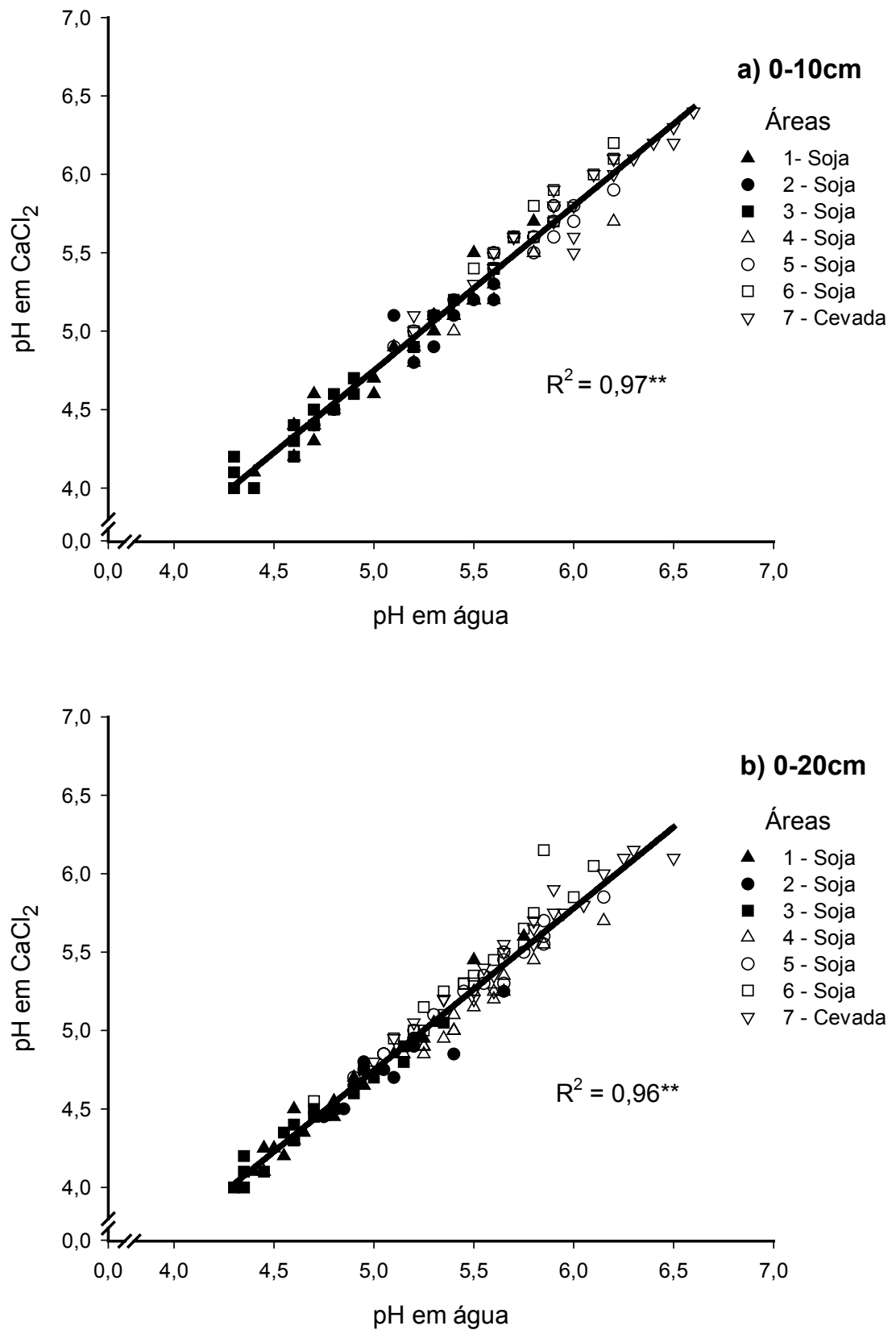


FIGURA 8. Relação entre o pH em água e o pH em CaCl_2 nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

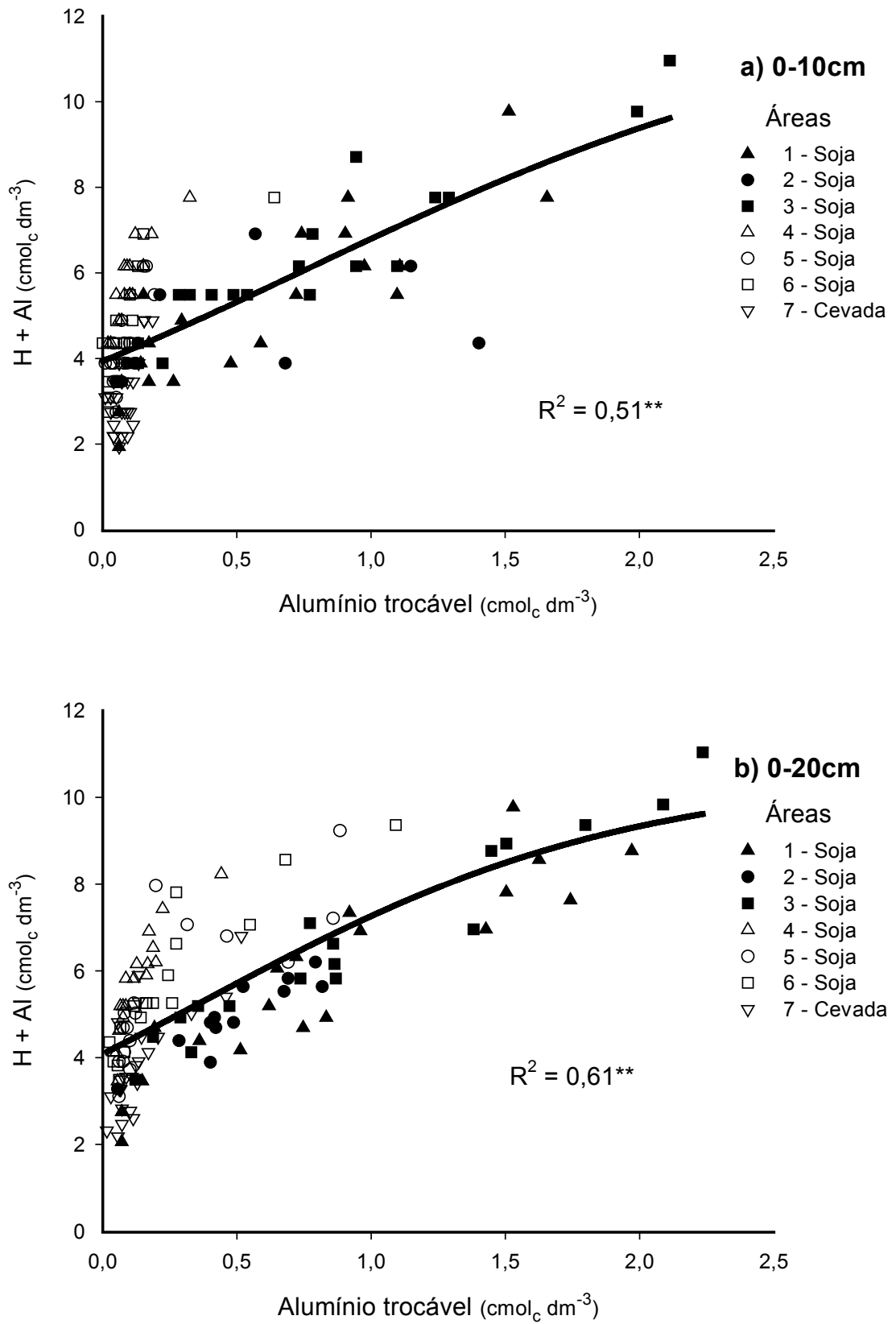


FIGURA 9. Relação entre o alumínio trocável e H+Al nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

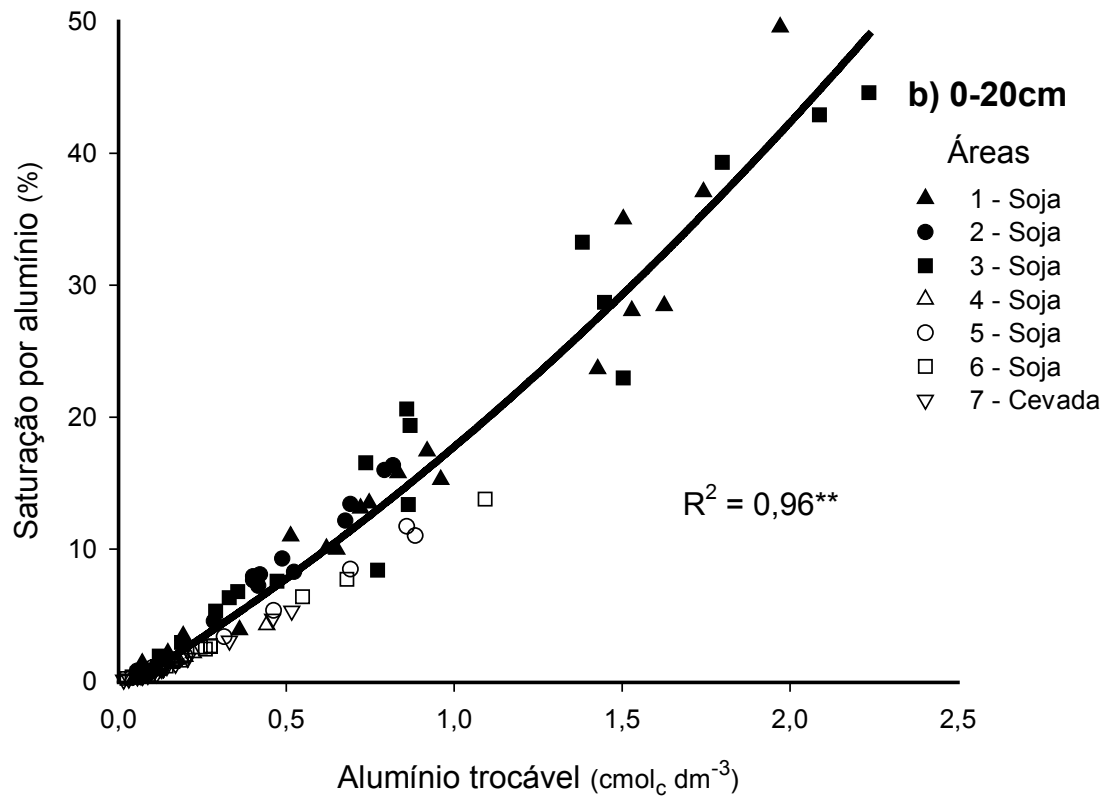
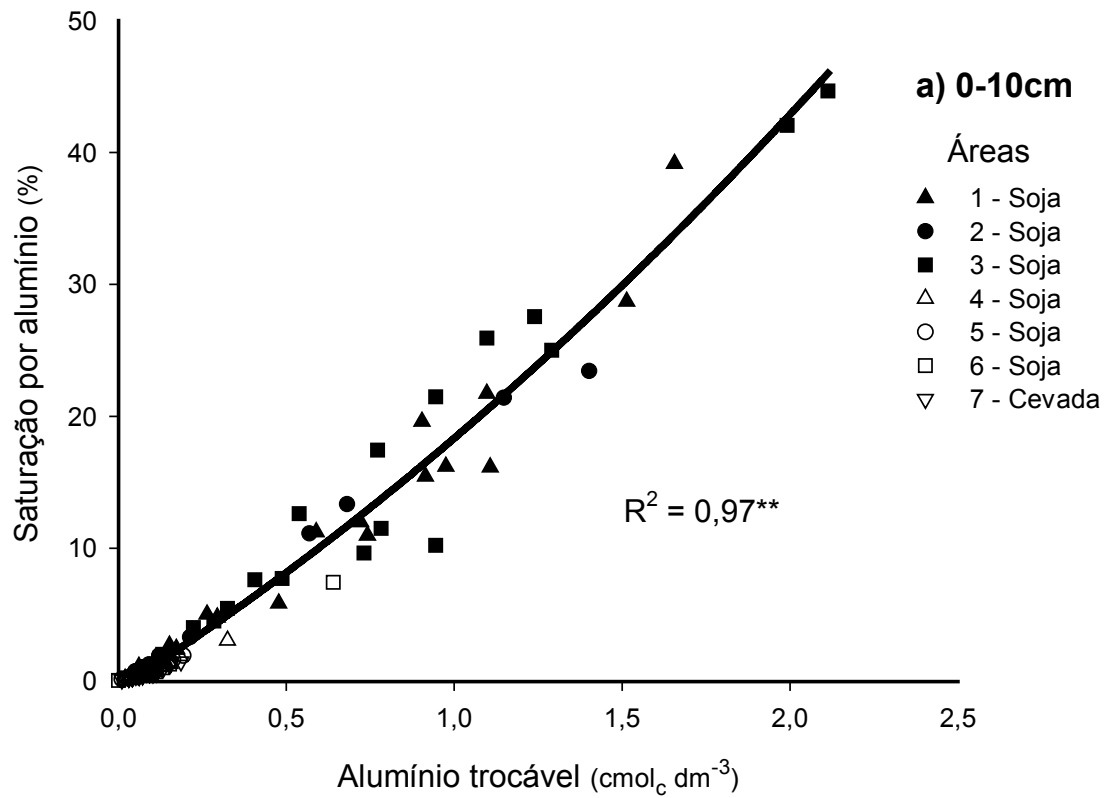


FIGURA 10. Relação entre o alumínio trocável e a saturação por alumínio nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

A Figura 11 mostra relação entre o alumínio trocável e a saturação por bases, nas duas camadas de solo. Ocorre aumento da saturação por bases com a diminuição do alumínio trocável e uma boa relação entre esses indicadores de acidez, com coeficientes de determinação de 0,80 e 0,86 ($P < 0,01$) nas camadas de 0-10 e 0-20 cm, respectivamente. A saturação por bases de 60 % corresponde a aproximadamente $0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de alumínio trocável. Essa boa relação justifica a saturação por bases como indicador de tomada de decisão e de definição de dose de calcário, pois o objetivo principal da calagem é neutralizar o alumínio trocável (Kaminski, 1974), conseqüentemente aumentando a saturação por bases. No entanto, a relação entre o alumínio trocável e a saturação por bases é inferior a relação entre esse e a saturação por alumínio.

A relação entre o alumínio trocável e $\text{Al}/\text{Ca}+\text{Mg}$ é estreita com R^2 elevados (0,96 e 0,95; $P < 0,01$), nas duas camadas de solo (Figura 12). Com o aumento do alumínio trocável aumenta a relação $\text{Al}/\text{Ca}+\text{Mg}$. Esta relação apresenta tendência e valores de R^2 muito próximos aos observados entre o alumínio trocável e a saturação por alumínio.

A relação entre o alumínio trocável e o pH em CaCl_2 nas duas camadas de solo (Figura 13) é boa ($R^2=0,78$; $P < 0,01$). No entanto, em pH em CaCl_2 menor que 4,5, este é pouco sensível às alterações nos teores de alumínio trocável. Esta relação apresenta coeficientes de determinação menores que os verificados entre o pH em água e o alumínio trocável na representação da acidez trocável (Figura 3).

As relações entre a acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$) e a saturação por alumínio, saturação por bases, $\text{Al}/\text{Ca}+\text{Mg}$ e o pH em CaCl_2 , respectivamente, (Figuras 14, 15, 16 e 17), apresentam comportamento diferenciado dos pontos de acordo com a textura do solo, principalmente nas relações com a saturação por bases e com o pH em CaCl_2 . Em geral, essas relações apresentam valores de R^2 menores que as anteriormente apresentadas, porém ainda muito significativas ($P < 0,01$). As relações entre a acidez potencial e a saturação por alumínio apresentam mesmo valor de R^2 nas duas camadas do solo (Figura 14). Nos demais casos, as relações com a acidez potencial possuem maiores valores dos coeficientes na camada de 0-10 cm. O $\text{H}+\text{Al}$ apresenta valor de R^2 superior a relação entre esse e a saturação por bases (Figura 15) comparado à

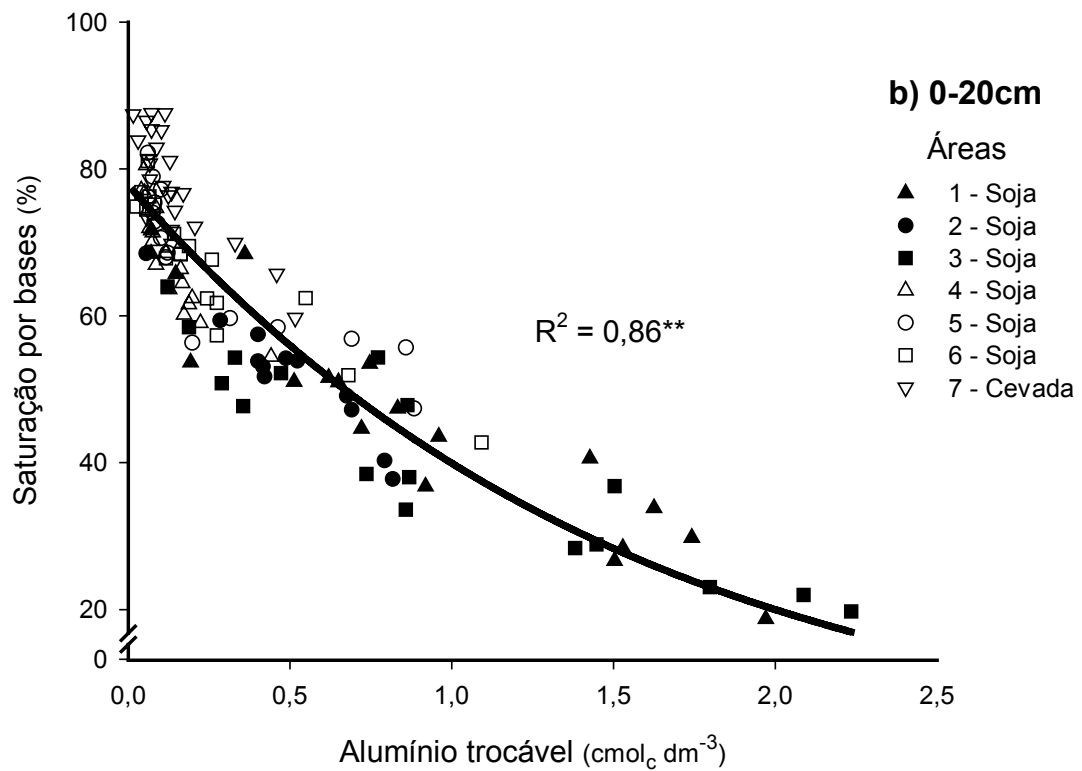
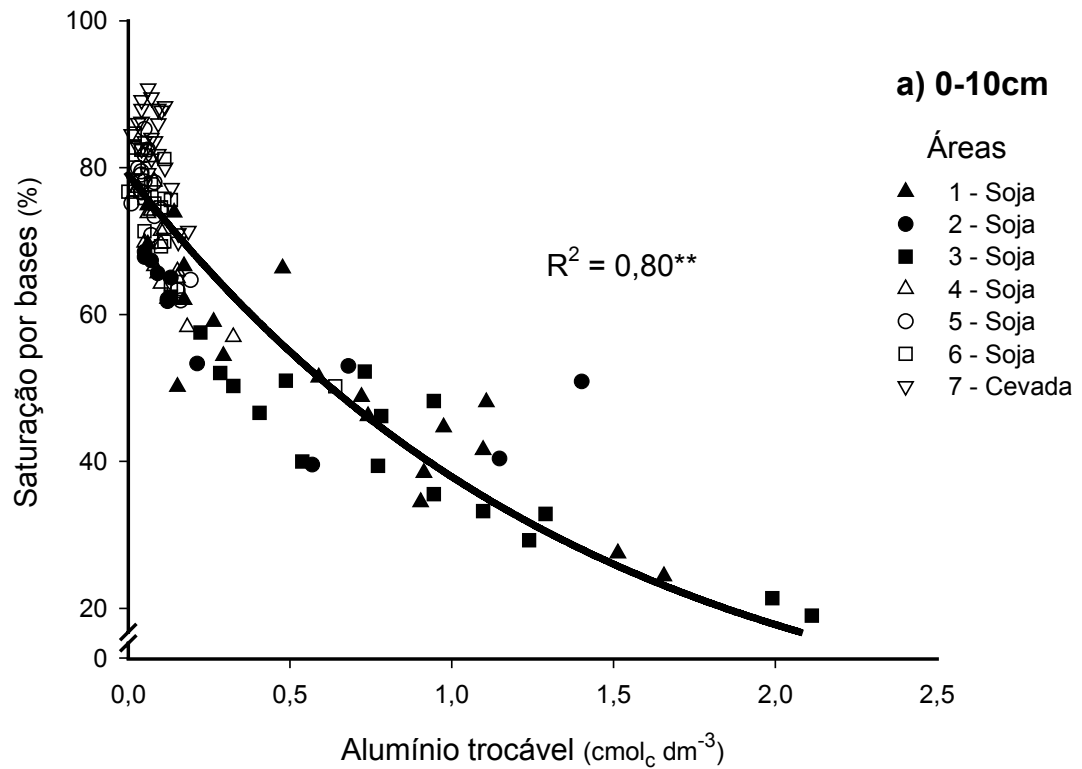


FIGURA 11. Relação entre o alumínio trocável e a saturação por bases nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

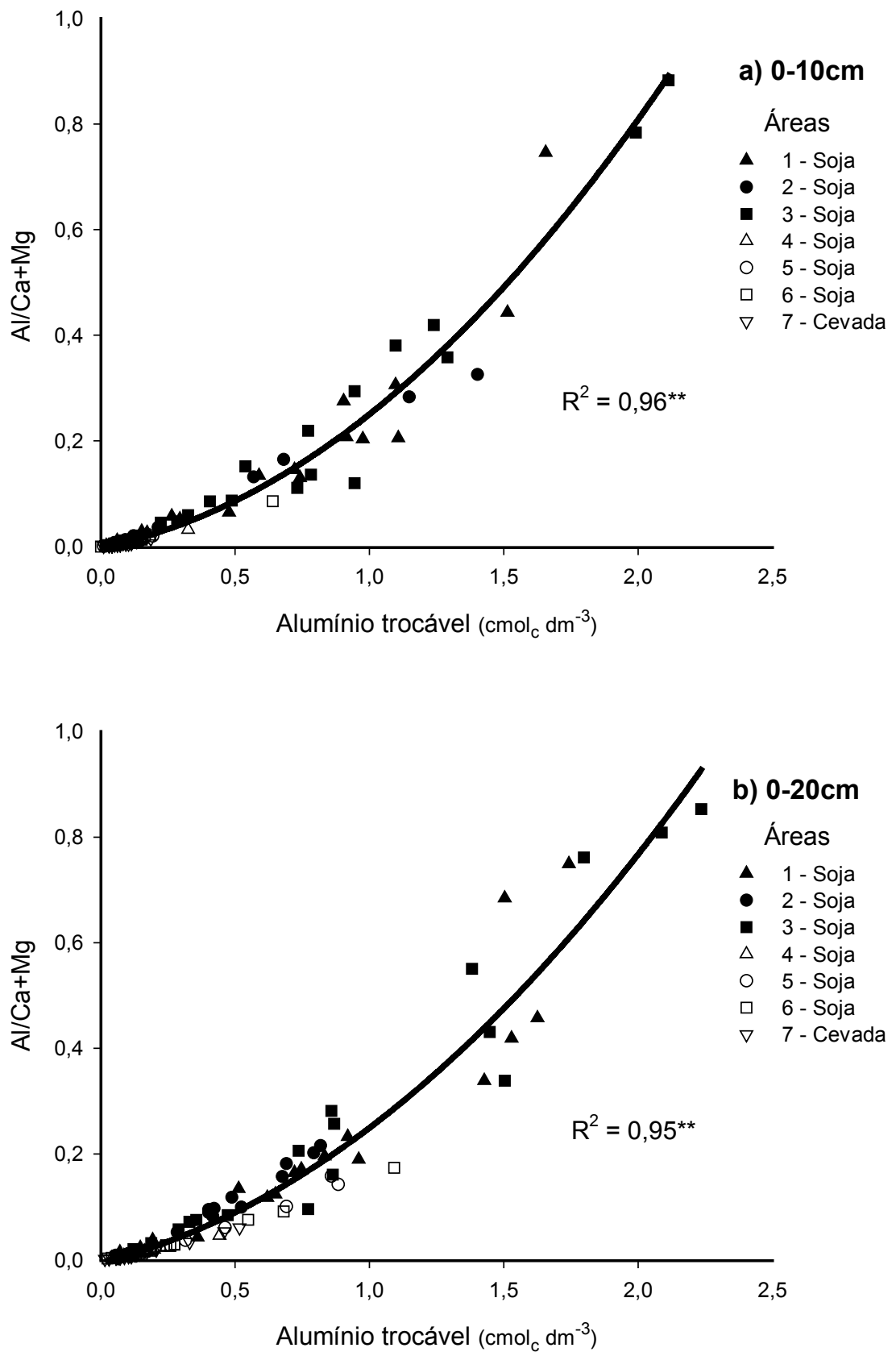


FIGURA 12. Relação entre o alumínio trocável e Al/Ca+Mg nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

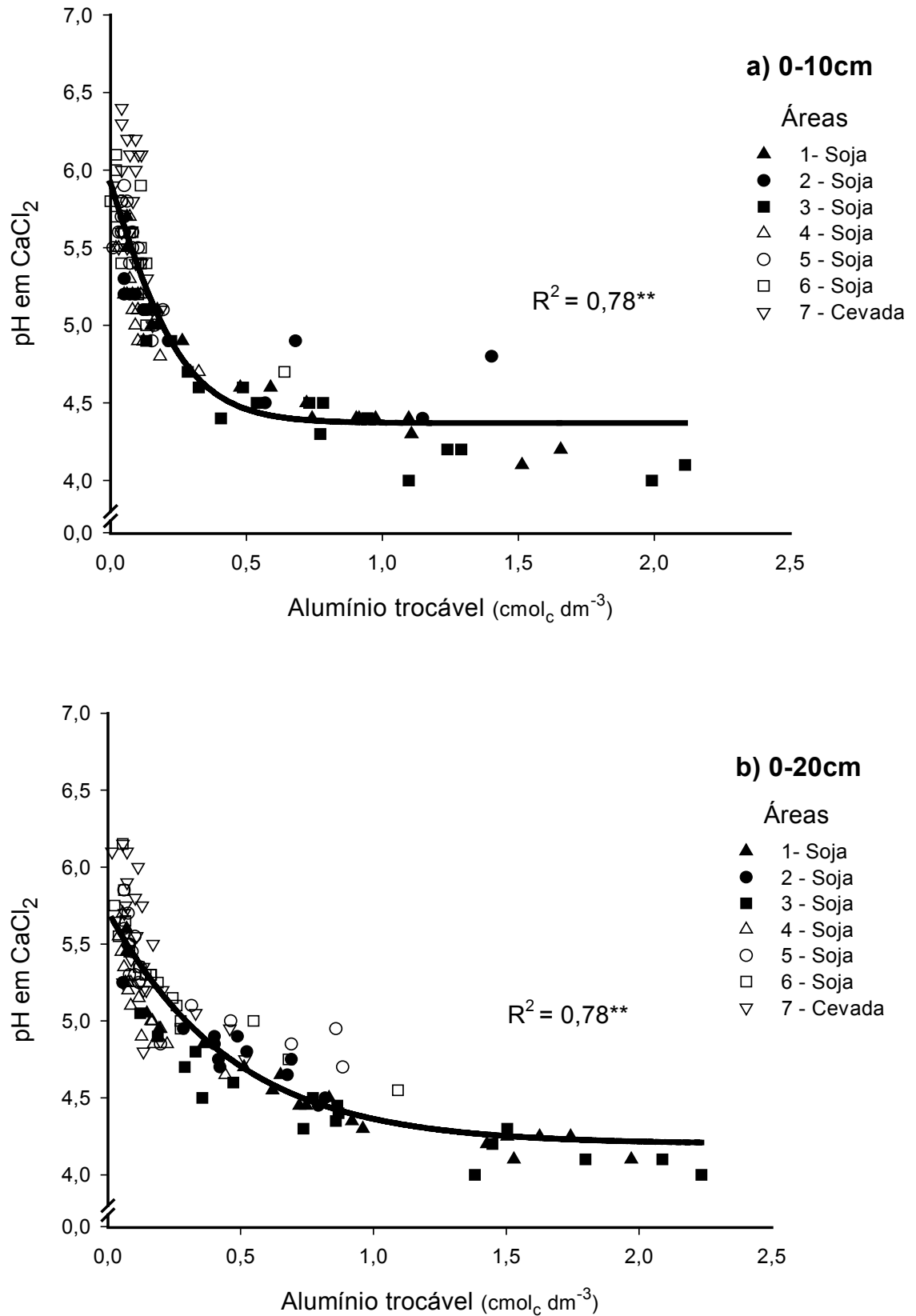


FIGURA 13. Relação entre o alumínio trocável e o pH em CaCl₂ nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

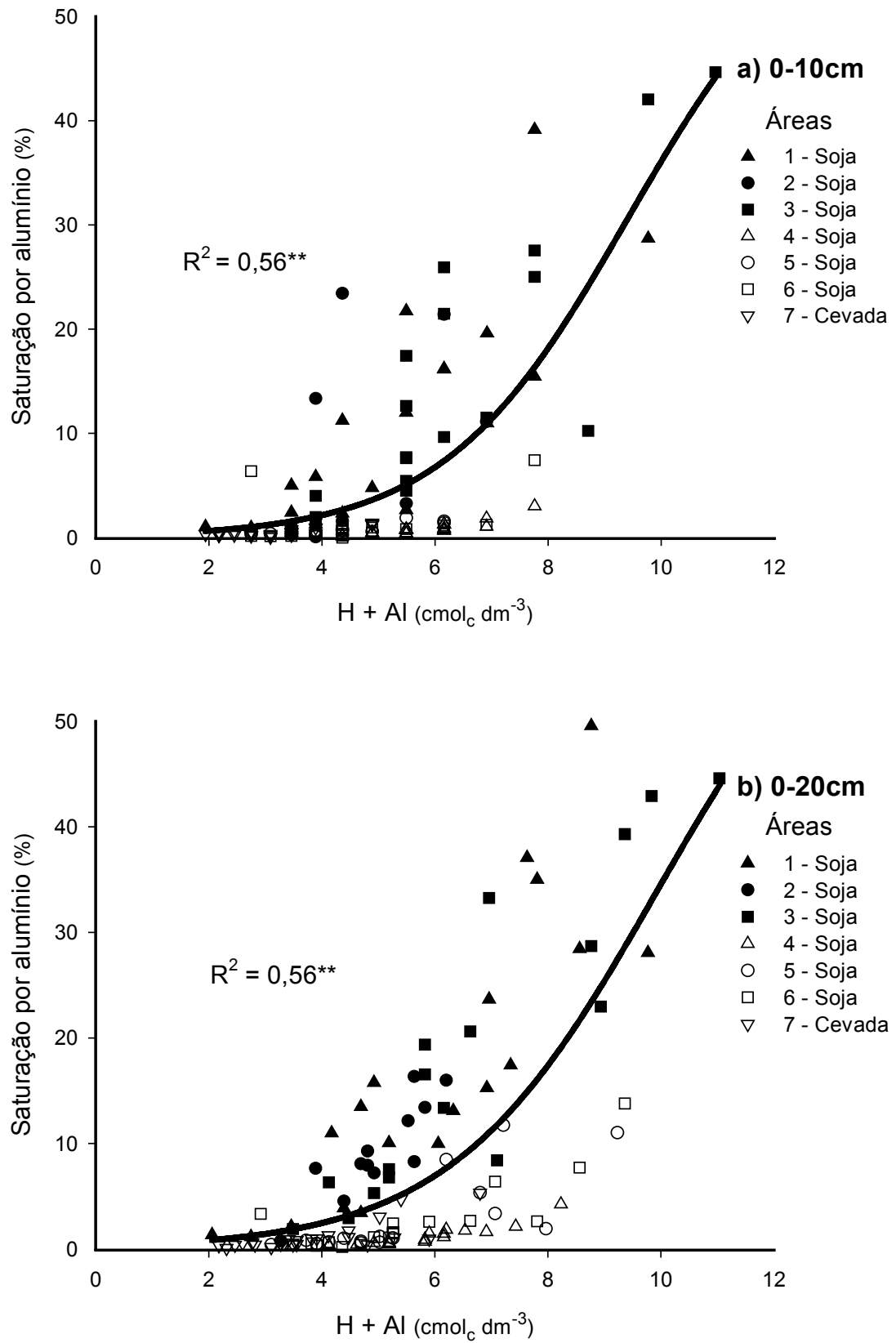


FIGURA 14. Relação entre H+Al e a saturação por alumínio nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

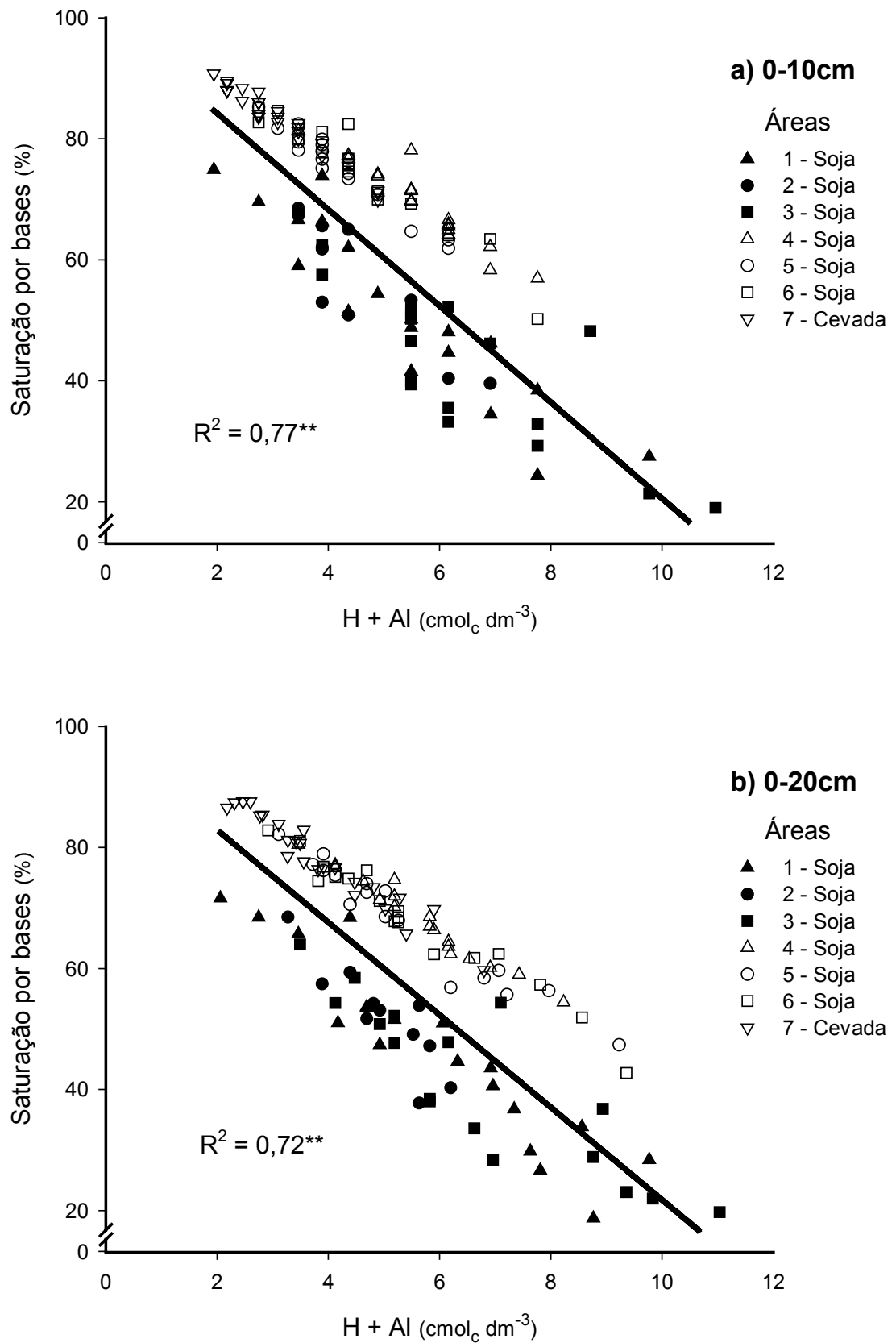


FIGURA 15. Relação entre H+Al e a saturação por bases nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

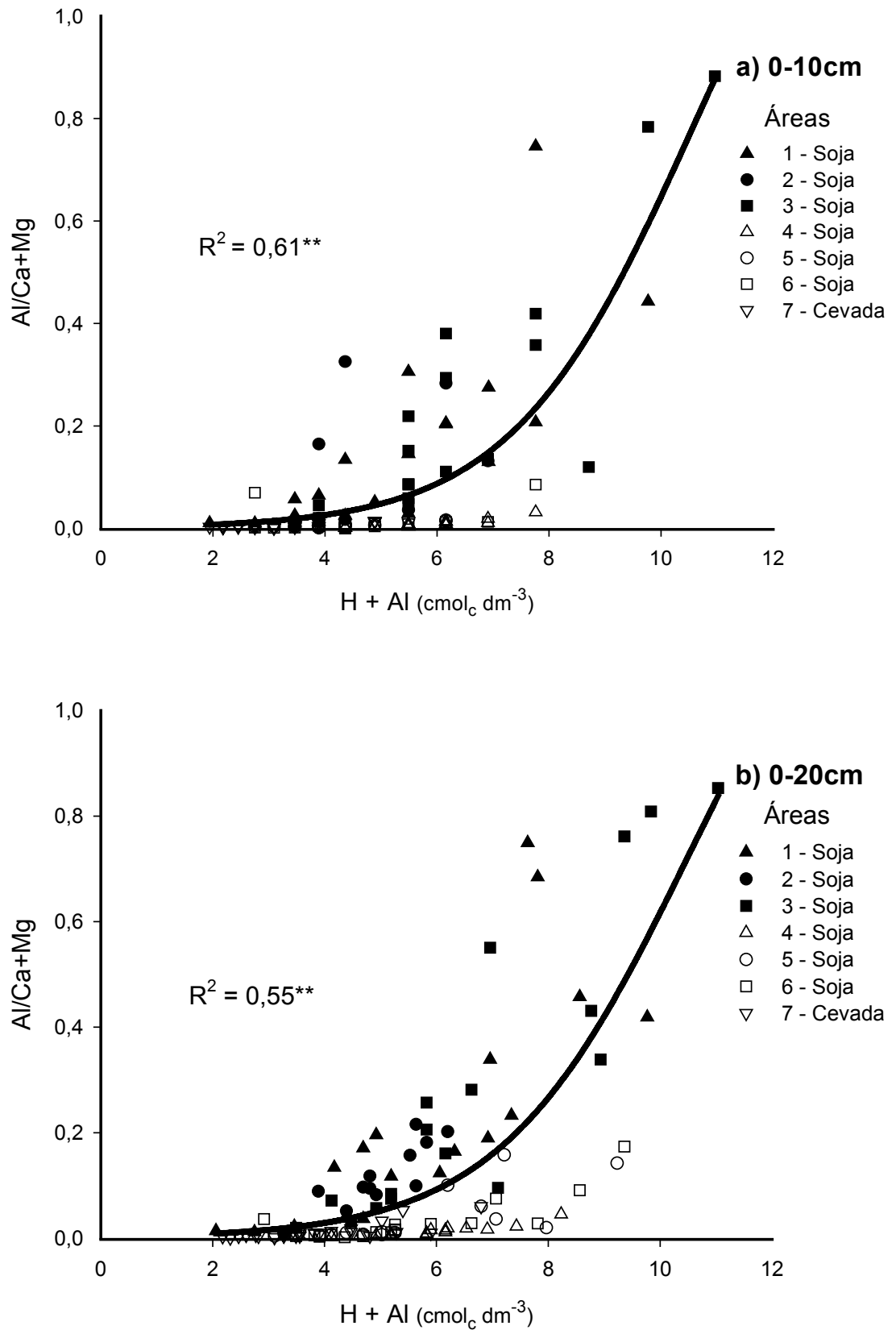


FIGURA 16. Relação entre H+Al e Al/Ca+Mg nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

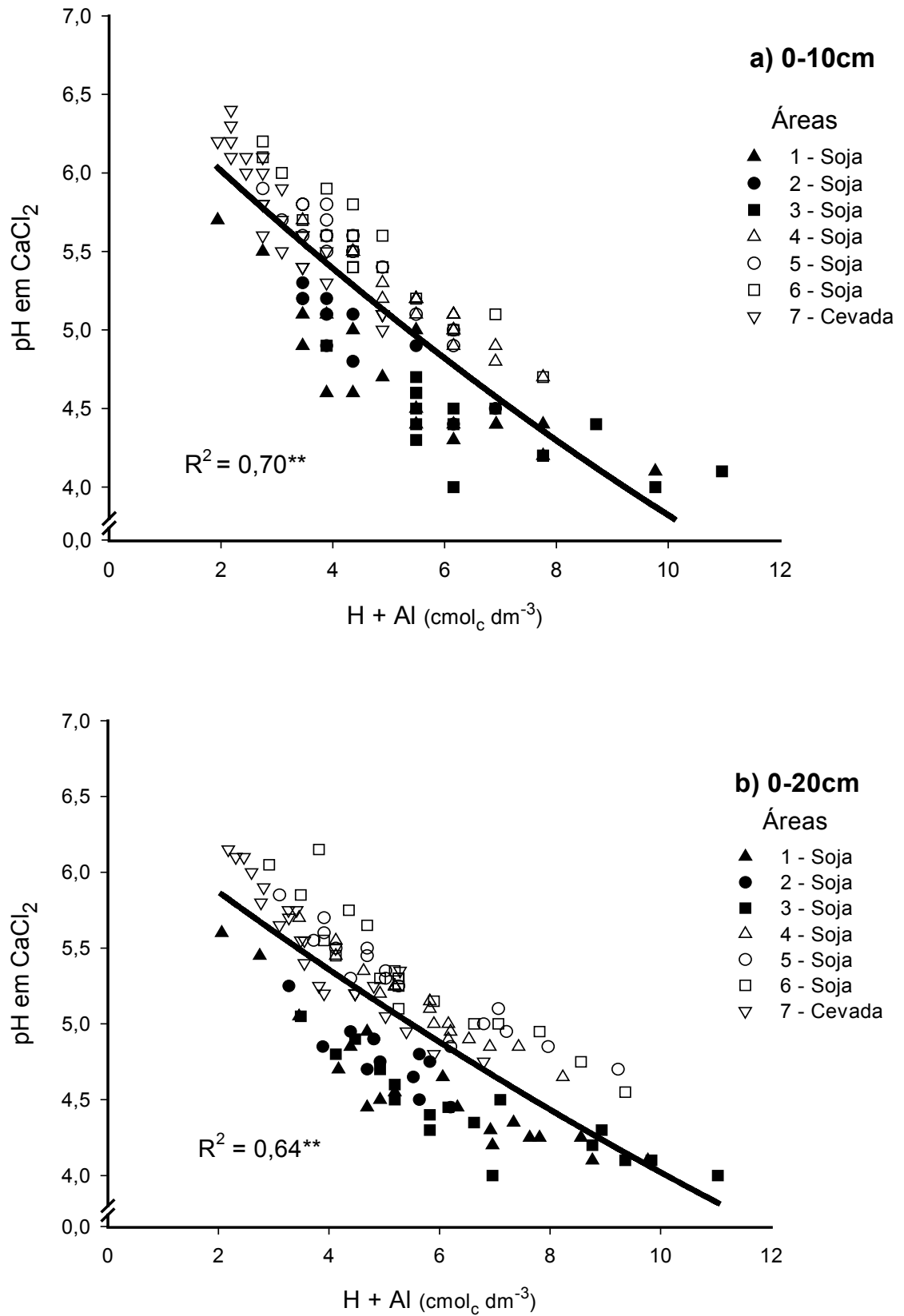


FIGURA 17. Relação entre H+Al e o pH em CaCl₂ nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

saturação por alumínio (Figura 14), explicado pela primeira ser em função da CTC efetiva e não da CTC a pH 7,0.

A relação entre o H+Al e Al/Ca+Mg (Figura 16) apresentou valor de R^2 superior à relação com a saturação por alumínio na camada de 0-10 cm. Essa diferença pode ser causada pelos altos teores de potássio nesta camada (Apêndice 1).

O valor do R^2 na relação entre o H+Al e o pH em CaCl_2 (Figura 17) foi superior a relação deste com o pH em água na camada 0-10 cm (Figura 4).

Todas as relações entre os tipos de acidez do solo e seus indicadores foram muito significativas ($P < 0,01$) (Figuras 3 a 17 - Apêndice 3). As equações encontram-se no Apêndice 2. A melhor relação, considerando os valores dos coeficientes de determinação, entre o pH em água (acidez ativa) e os indicadores de acidez do solo, foi obtida com o pH em CaCl_2 , seguida da saturação por bases; e entre os indicadores e o alumínio trocável (acidez trocável), foram obtidos com a saturação por alumínio e Al/Ca+Mg; e, entre acidez potencial obtidos com a saturação por bases e com o pH em CaCl_2 . Os menores coeficientes de determinação entre acidez ativa e a acidez trocável foram obtidas com a acidez potencial. Se a intenção da Comissão de Química e Fertilidade do Solo, quando adotou como critério de tomada de decisão o pH em água e, mais tarde, a saturação por bases, foi de utilizar indicadores que bem representem a toxidez provocada pelo alumínio trocável, esses indicadores possuem uma relação com a acidez trocável muito próxima, entre eles, porém inferiores às relações entre o alumínio trocável e a saturação por alumínio assim como desse e Al/Ca+Mg. Os coeficientes de determinação das relações dos indicadores de acidez com a acidez potencial foram inferiores aos verificados nas relações entre o pH em água e o alumínio trocável, nas duas camadas. Os R^2 nessas relações foram superiores na camada de 0-10 cm, contrariando as tendências observadas nas relações entre os outros componentes de acidez. Provavelmente, este comportamento seja causado pelo maior teor de matéria orgânica, que contribui para aumento da acidez potencial assim como na diminuição da atividade pela maior complexação do alumínio, possivelmente com predomínio de formação de complexos de esfera externa e pela calagem superficial neutralizando a acidez, principalmente, a acidez potencial do solo.

O comportamento verificado em relação à acidez potencial (Figuras 4 e 9), com a separação dos pontos pertencentes às áreas com diferentes texturas do solo, é novamente verificado nas relações entre essa e indicadores de acidez, apresentadas nas Figuras 14 a 17. Como citado anteriormente, é devido aos diferentes teores de argila e de matéria orgânica do solo entre as Áreas 1 a 3 e Áreas 4 a 7.

4.2 Relação entre acidez e indicadores de fertilidade do solo

A relação entre o pH em água e o teor de matéria orgânica nas camadas de 0-10 e 0-20 cm, é positiva, e muito significativa ($P < 0,01$), porém com R^2 intermediários (0,57 e 0,46) (Figura 18). Os maiores teores de matéria orgânica são encontrados na Área 7, onde as amostras de solo foram coletadas na cevada, com o pH superior a 5,5. Com aumento no teor de argila dos solos, aumenta a CTC, o suprimento de nutrientes, a produção de biomassa vegetal, a adição de resíduos ao solo, e conseqüentemente os teores de matéria orgânica. A matéria orgânica também contribui na elevação da CTC efetiva dos solos (Apêndice 4) no aumento da capacidade do solo em disponibilizar nutrientes para as plantas. O aumento da CTC efetiva nos solos ácidos também é promovido pela calagem, e é tanto maior quanto maior o pH atingido e, também, quanto maiores os teores de matéria orgânica, argila e óxi-hidróxidos dos solos (Volkweiss 1989). No entanto, os valores de R^2 entre o pH em água e a CTC efetiva (Apêndice 5) são superiores aos obtidos entre esse e a matéria orgânica do solo (Figura 18).

Há uma tendência de aumento dos teores de fósforo disponível com o aumento do pH em água (Figura 19), porém, o R^2 é baixo (0,11) entretanto significativo ($P > 0,05$) na camada de 0-10 cm e baixo, (0,14) embora muito significativo ($P < 0,01$) na camada 0-20 cm. O elevado nível de significância observado, mesmo com valores de R^2 baixos deve-se, provavelmente, ao elevado número de pontos avaliados nas áreas.

O alumínio trocável foi menor nos solos com maior teor de matéria orgânica nas duas camadas de solo (Figura 20). Isto, devido à quase inexistência da acidez trocável nas Áreas 4 a 7, de textura argilosa, especialmente na camada 0-10 cm, que possuem também teores de matéria orgânica superiores a 2,5 %. Os menores teores de alumínio trocável se

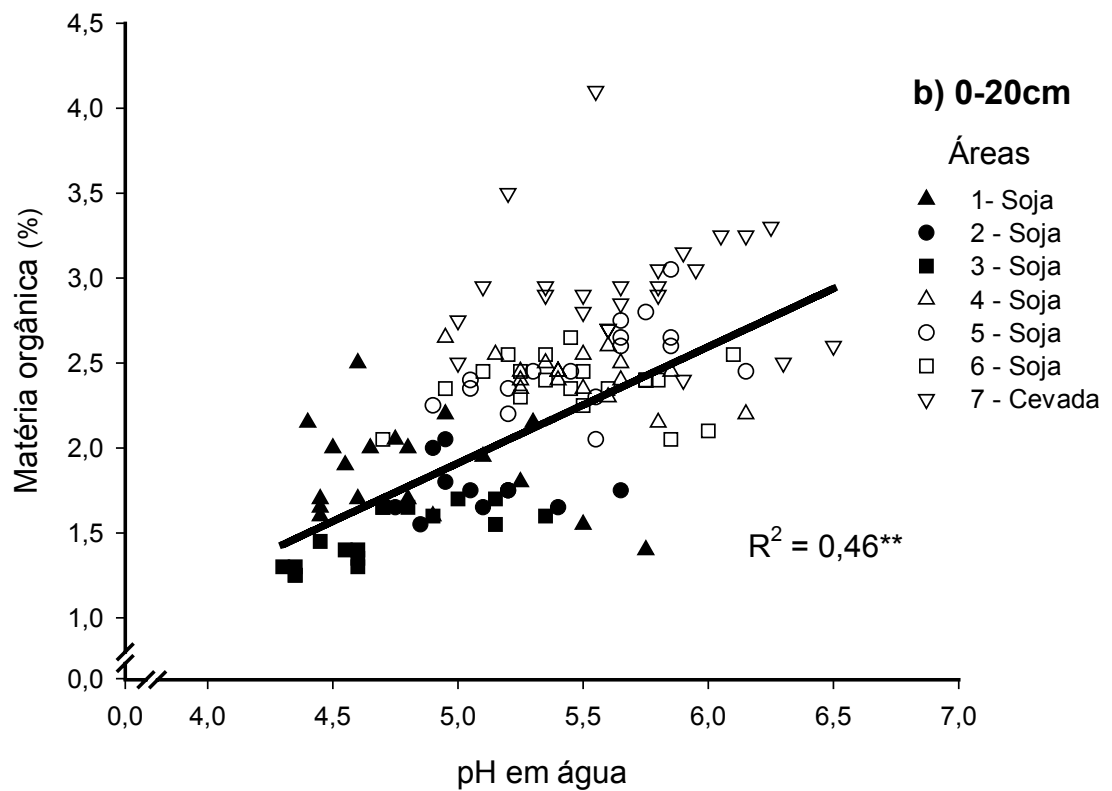
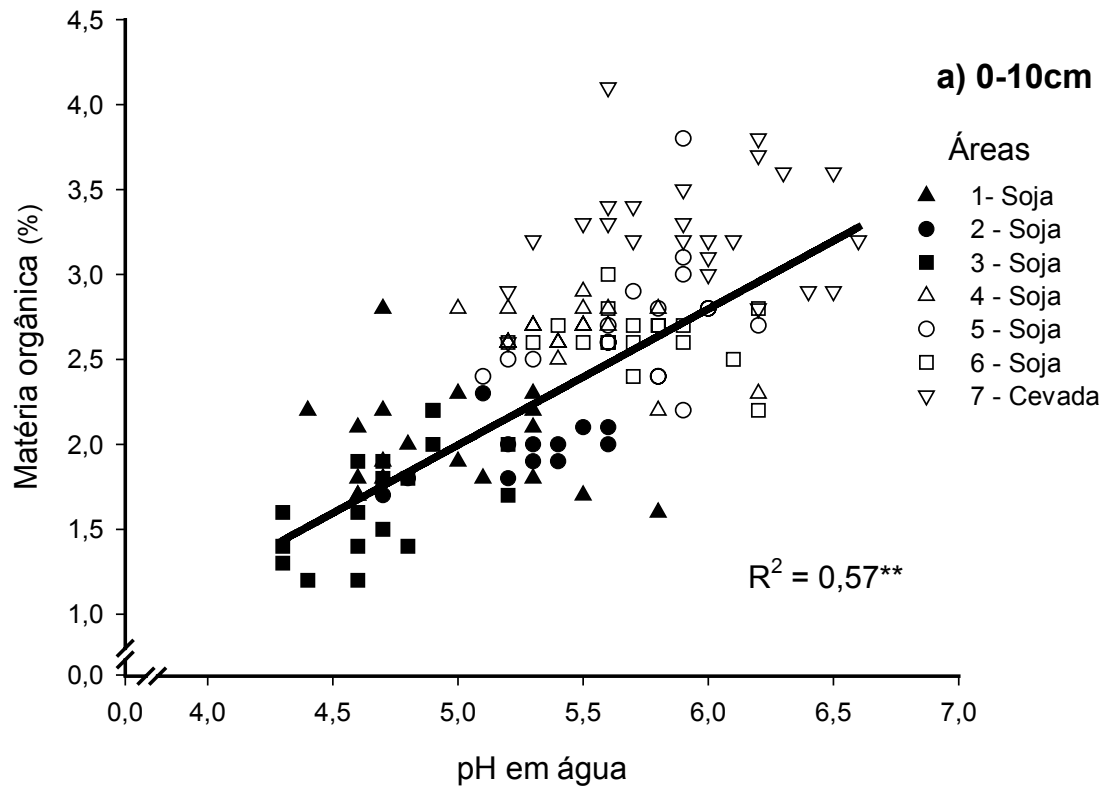


FIGURA 18. Relação entre o pH em água e o teor de matéria orgânica nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

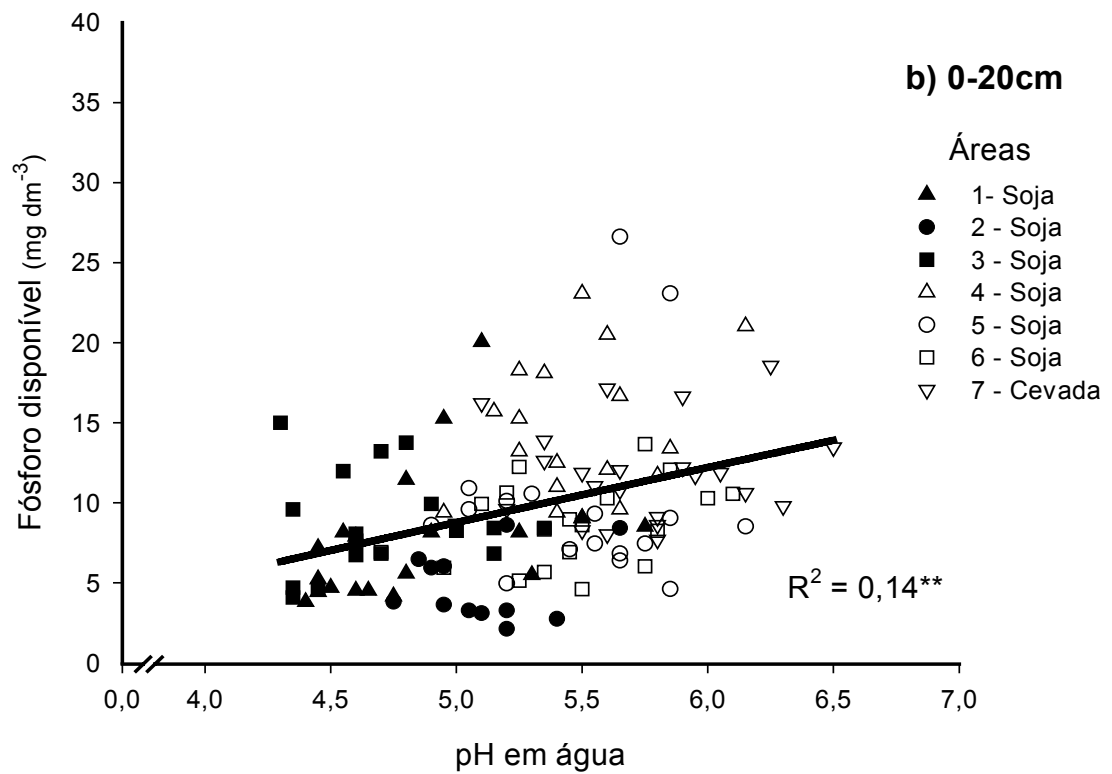
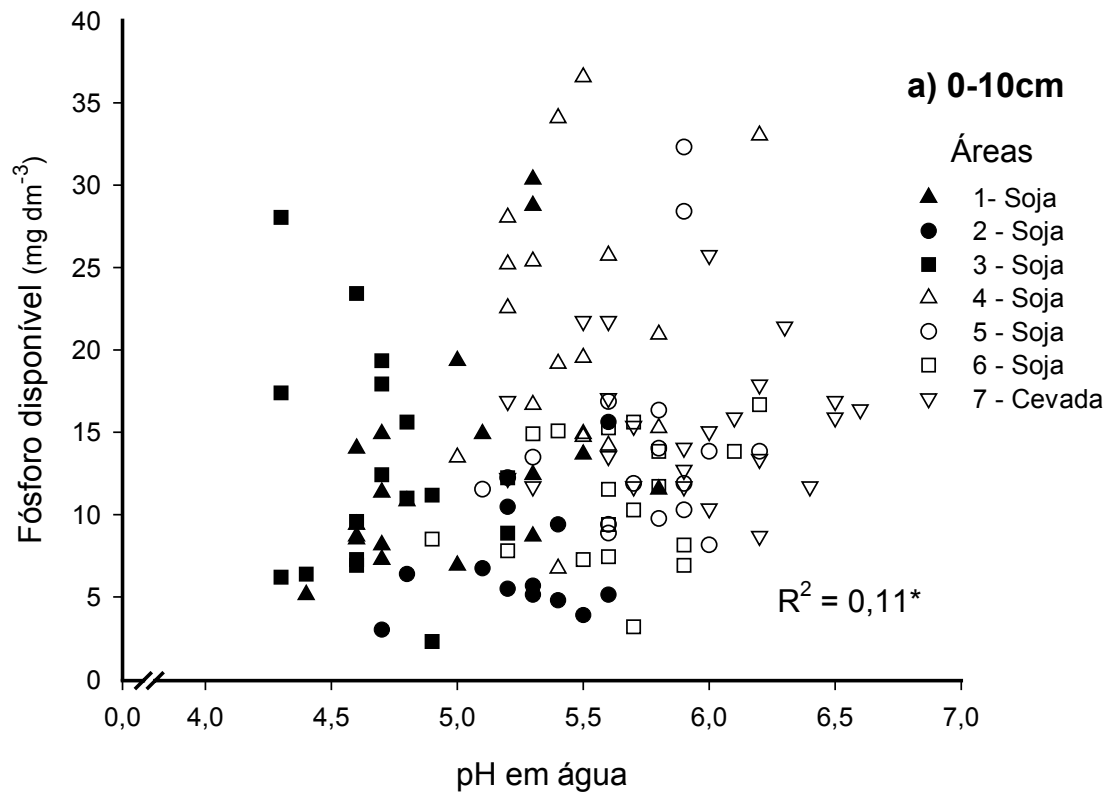


FIGURA 19. Relação entre o pH em água e o teor de fósforo disponível (Mehlich I) nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

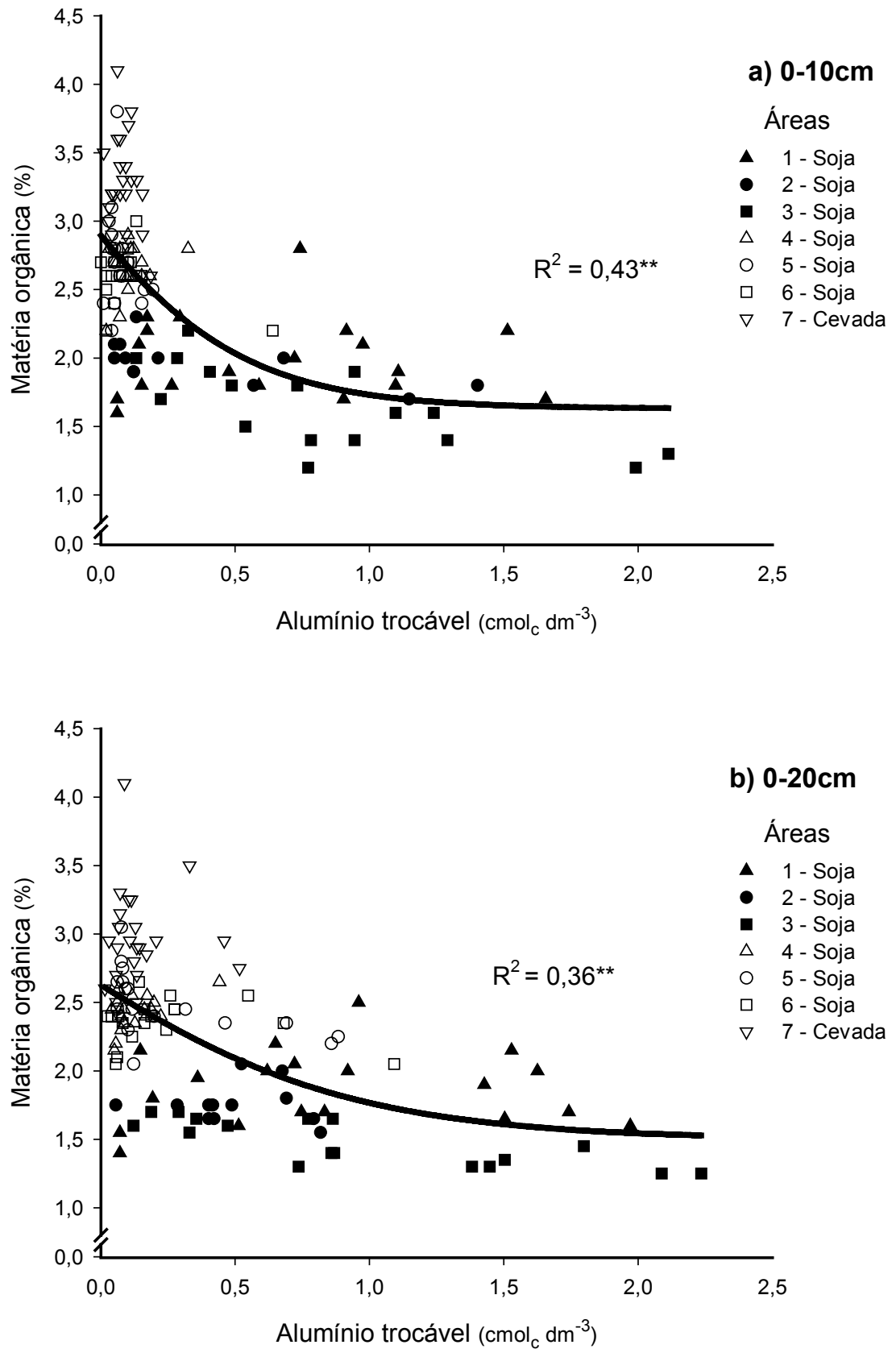


FIGURA 20. Relação entre o alumínio trocável e o teor de matéria orgânica nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

devem a calagem anterior (Item 3.2.1), aliada à complexação do alumínio pela matéria orgânica, permanecendo numa forma não trocável e não extraído pela solução KCl 1 mol L⁻¹, e, na solução, pelos ácidos orgânicos simples e ácidos fúlvicos, formando predominantemente complexos de esfera externa (Salet, 1998).

Embora haja uma grande dispersão dos pontos, como foi observado na relação entre o fósforo disponível e o pH em água, refletida pelos baixos valores de R², também ocorre na relação entre esse e o alumínio trocável, essa é inversa e significativa (P <0,05) na camada de 0-10 cm e muito significativa na camada de 0-20 cm (Figura 21). Esses valores de R², provavelmente, são resultado do tratamento conjunto de solos com diferente textura, teor de matéria orgânica e tempo de cultivo e pelos altos teores deste nutriente na maioria dos pontos. A diminuição de fósforo disponível com o aumento do alumínio trocável ocorre especialmente a partir de 0,5 cmol_c dm⁻³.

A relação, inversa, entre a acidez potencial e o teor de matéria orgânica (Figura 22), embora muito significativa (P <0,01) é baixa (R²= 0,25 e 0,15, para as duas camadas) e casual neste trabalho. Maiores valores de H+Al nos solos com maior teor de matéria orgânica não foram observados por que esses solos (Áreas 4 a 7) receberam a aplicação de calcário que determinaram a elevação do pH e, níveis mais elevados em relação aos solos com menor teor de matéria orgânica (Área 1 a 3 – Apêndice 1). A relação entre a acidez potencial e o teor de matéria orgânica deixou de existir na análise em separado dos dois grupos de solos nas áreas de textura média (Áreas 1 a 3), conforme o teor de matéria orgânica.

A Figura 23 mostra que a relação entre a acidez potencial e o fósforo disponível é muito baixa, no entanto significativo a P <0,05, nas duas camadas de solo. Há uma leve tendência de diminuição do fósforo disponível com o aumento da acidez potencial acima de 8 cmol_c dm⁻³ de H+Al principalmente na camada de 0-20 cm. Não se evidencia efeito de textura nessa relação (Figura 23). A alta acidez potencial predispõe a um maior teor de alumínio trocável, que pode reagir com fósforo e formar fosfato de alumínio (Salinas & Sanchez, 1976). Nas relações entre o fósforo disponível e os tipos de acidez, o melhor coeficiente de determinação foi obtido com o pH em água (Figura 19).

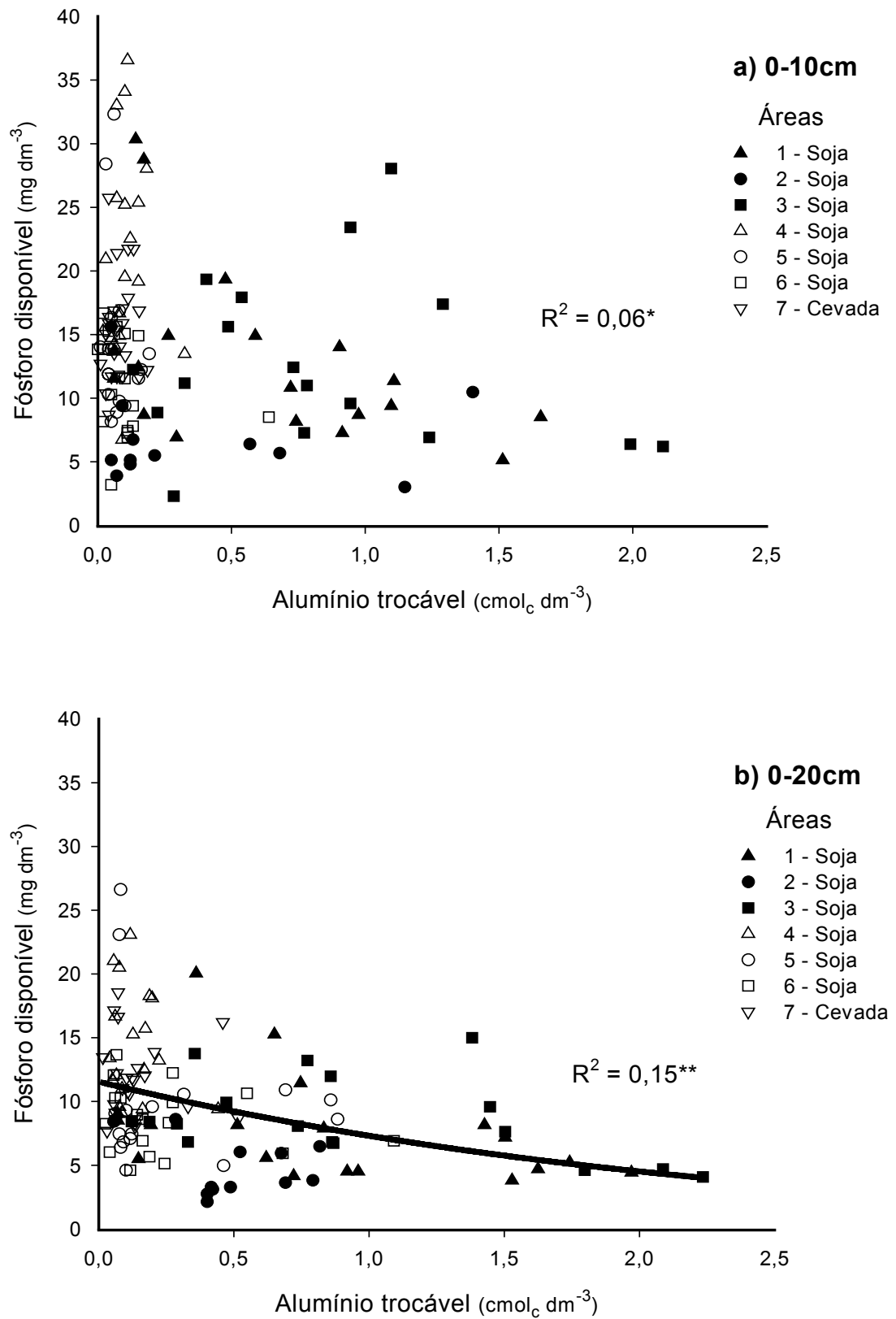


FIGURA 21. Relação entre o alumínio trocável e o teor de fósforo disponível (Mehlich I) nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

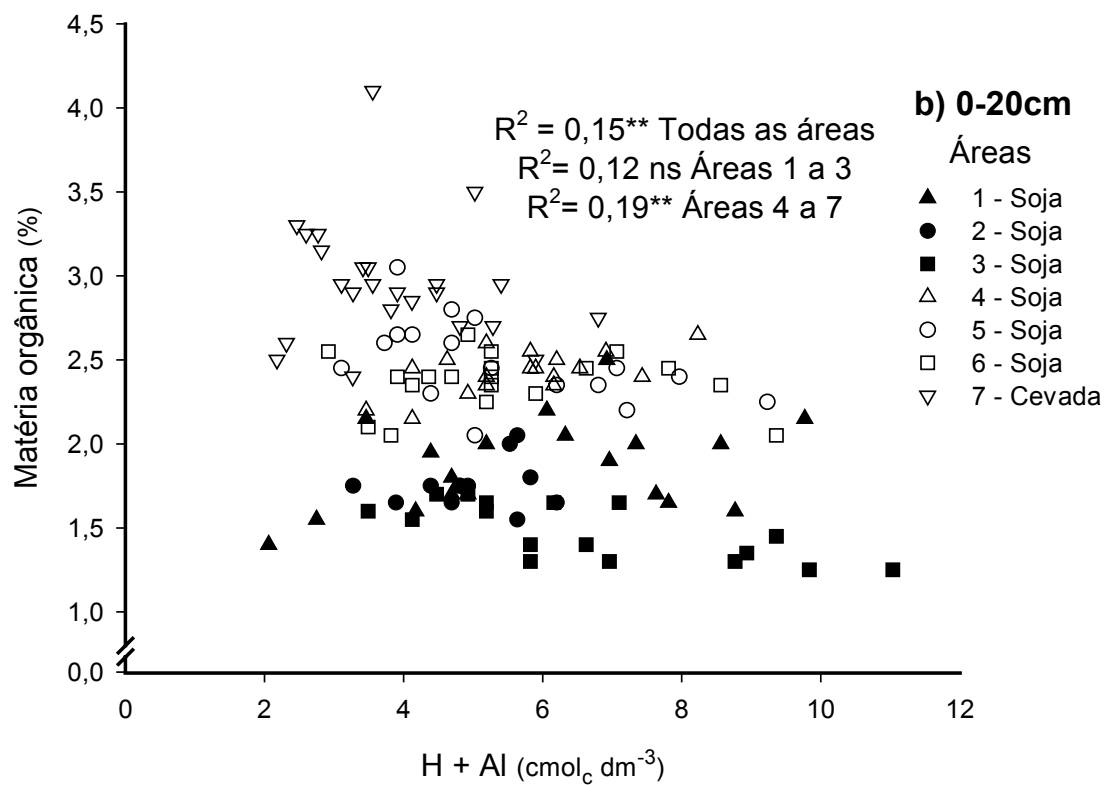
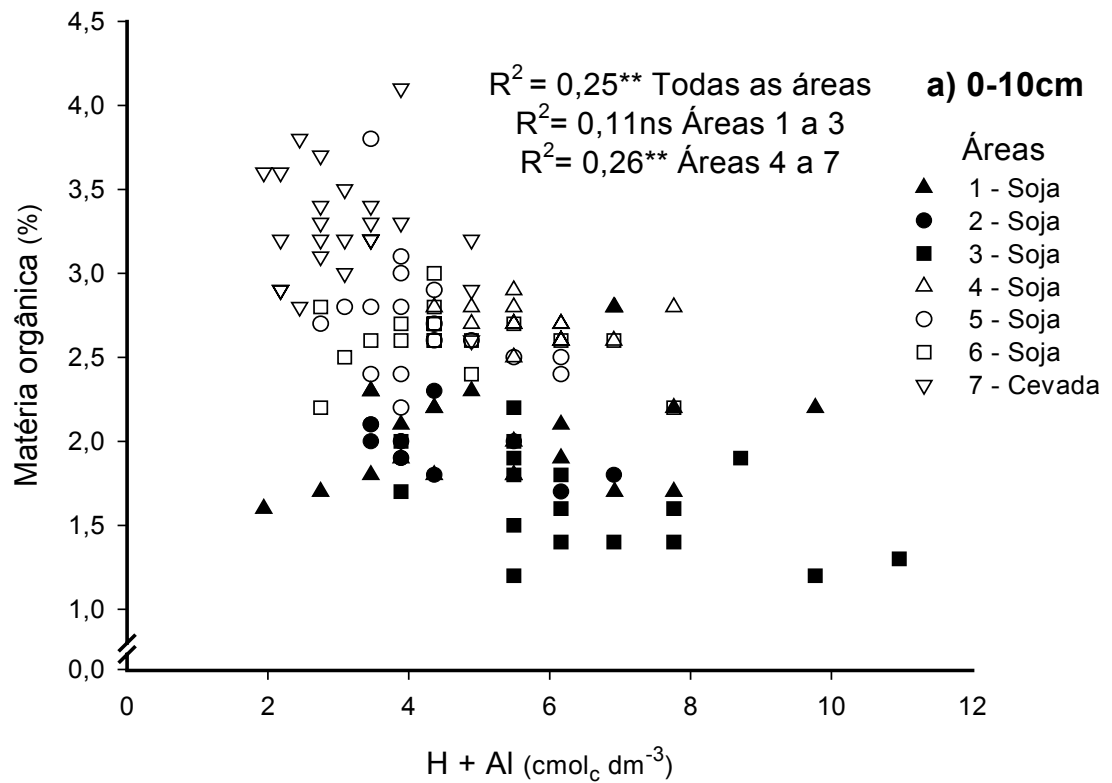


FIGURA 22. Relação entre H+Al e o teor de matéria orgânica nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

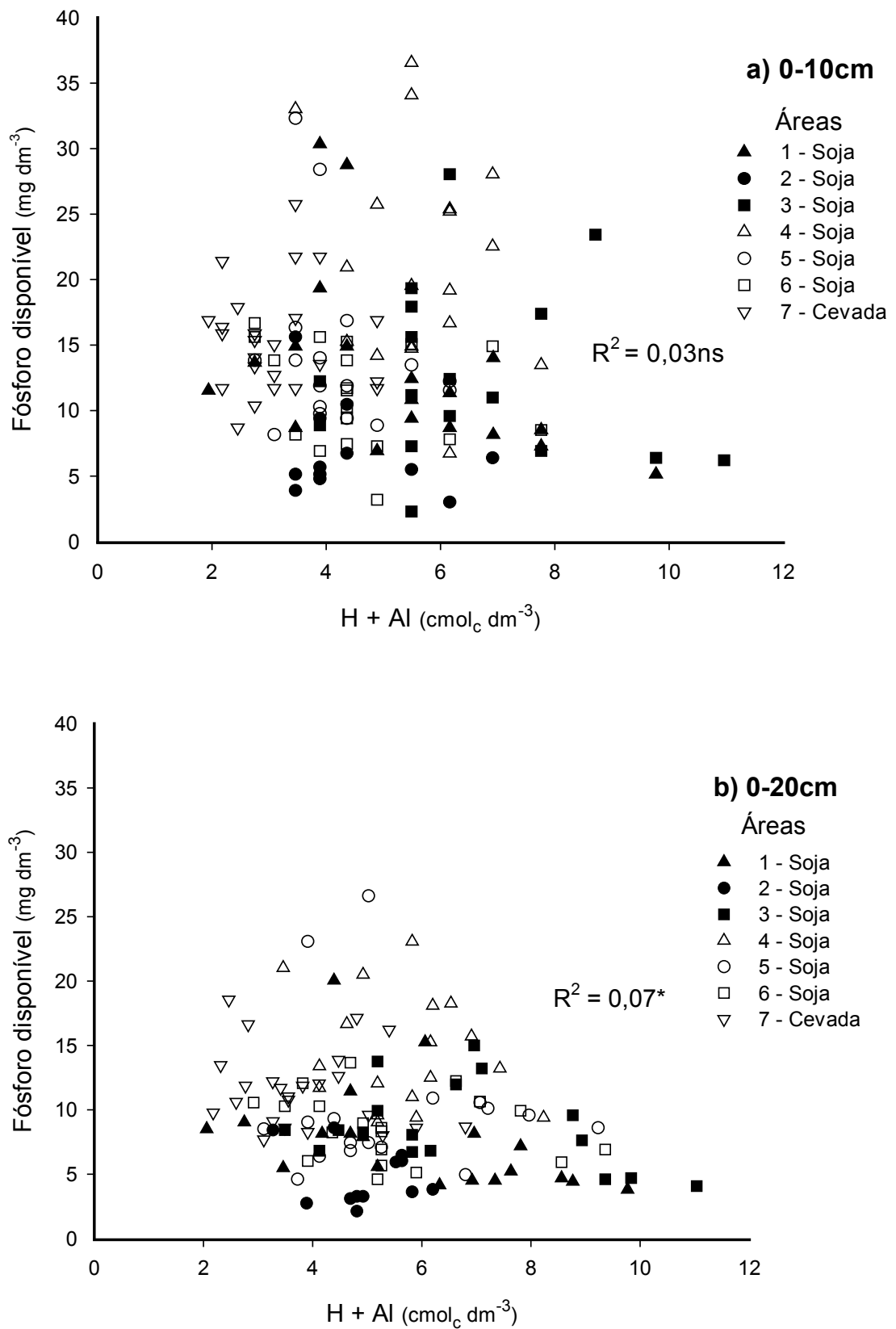


FIGURA 23. Relação entre H+Al e o teor de fósforo disponível (Mehlich I) nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

Os valores de R^2 nas relações entre os diferentes tipos de acidez e o teor de matéria orgânica foram maiores do que com o fósforo disponível (Apêndice 6). A matéria orgânica apresentou melhor relação com o pH em água, seguido do alumínio trocável. As respectivas equações encontram-se no Apêndice 7. Em geral, os melhores coeficientes de determinação entre a acidez e a matéria orgânica foram obtidos na camada de 0-10 cm, e nas relações com o fósforo disponível na camada de 0-20 cm. Esse comportamento pode ser explicado nas relações entre os tipos de acidez e a matéria orgânica, provavelmente pelo aumento dos seus teores na camada superficial nesse sistema (Ruedell, 1995; Reinheimer et al., 2001; Reinheimer et al., 2002), e do fósforo disponível, por não haver sido corrigida a deficiência em profundidade, e os teores na camada 0-10 cm, são, na sua grande maioria, elevados e acima do nível crítico.

4.3 Relação entre o rendimento das culturas e os indicadores de acidez e de fertilidade do solo e a concentração de nutrientes no tecido vegetal

A definição do critério para tomada de decisão para a calagem deve considerar, especialmente, a relação entre o rendimento das culturas e os indicadores de acidez. Ao analisar os resultados obtidos em áreas de lavoura, mesmo coletando elevado número de pontos, verifica-se uma maior dispersão dos mesmos do que em áreas experimentais submetidas à aplicação de doses de insumos.

A utilização de uma única área, mesmo que com muitos pontos, pode ser pouco informativa. Assim, as Figuras 24 a 27 apresentam os resultados da Área 1 do presente trabalho com a relação entre o rendimento de grãos e alguns indicadores de acidez do solo. De um modo geral, os valores de R^2 foram intermediários (0,40 a 0,58) e um pouco superiores na camada de 0-20 cm, porém todos foram significativos ($P < 0,05$) um caso, ou muito significativos, os demais casos ($P < 0,01$) (Apêndice 8 – Figuras 24 a 27). Com base nos coeficientes de determinação obtidos na Área 1, o indicador que melhor se relacionou com o rendimento de grãos foi a saturação por alumínio, seguido do alumínio trocável, da saturação por bases e, por último, do pH em água.

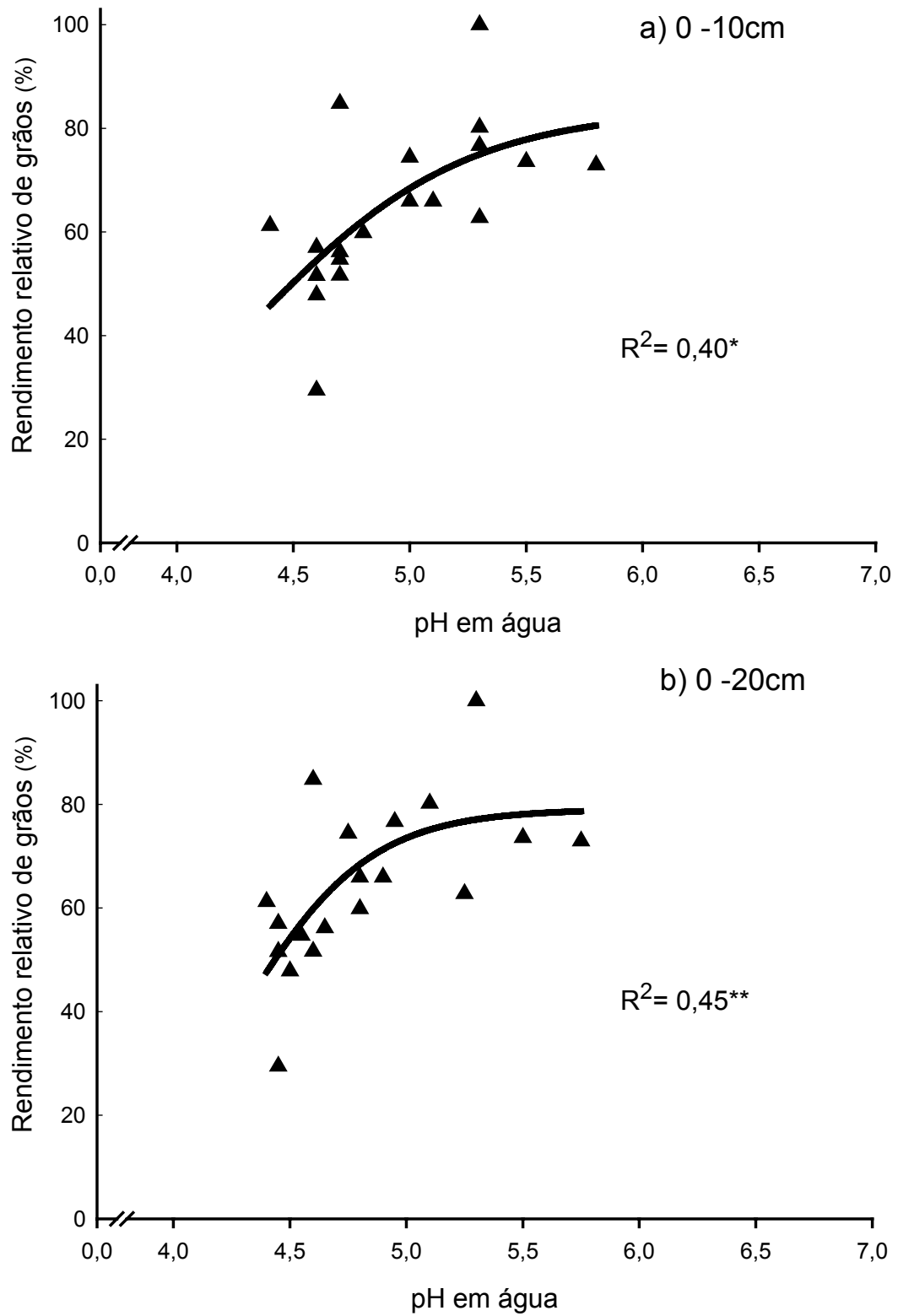


FIGURA 24. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o pH em água nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, na Área 1, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

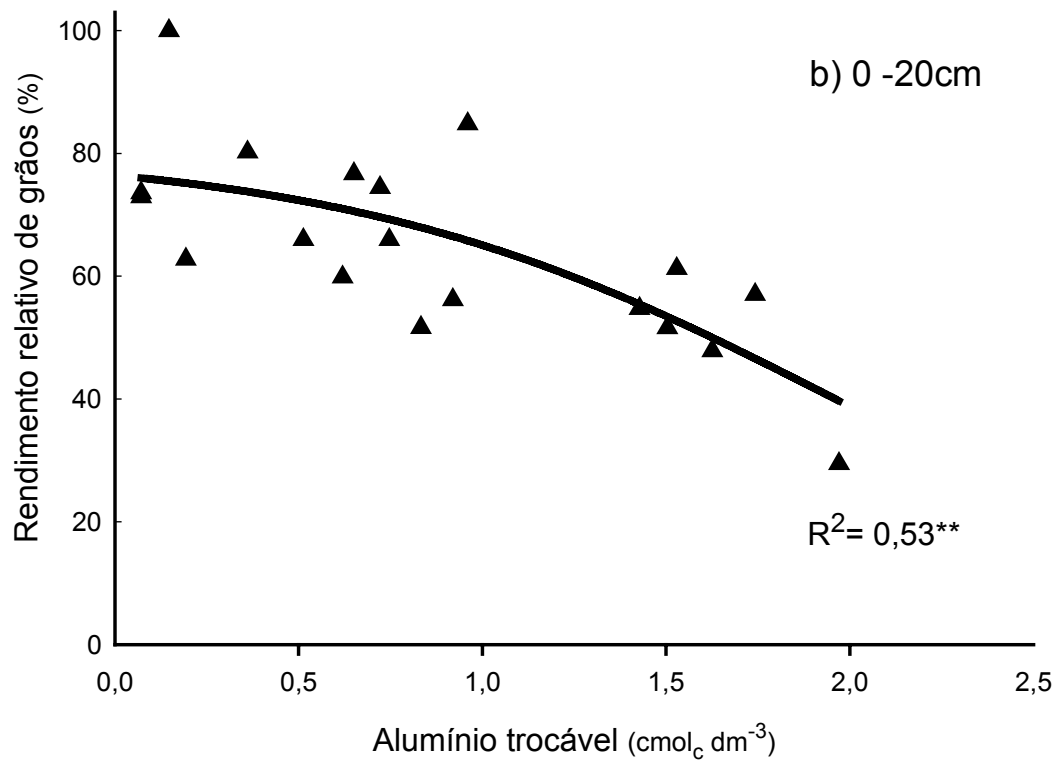
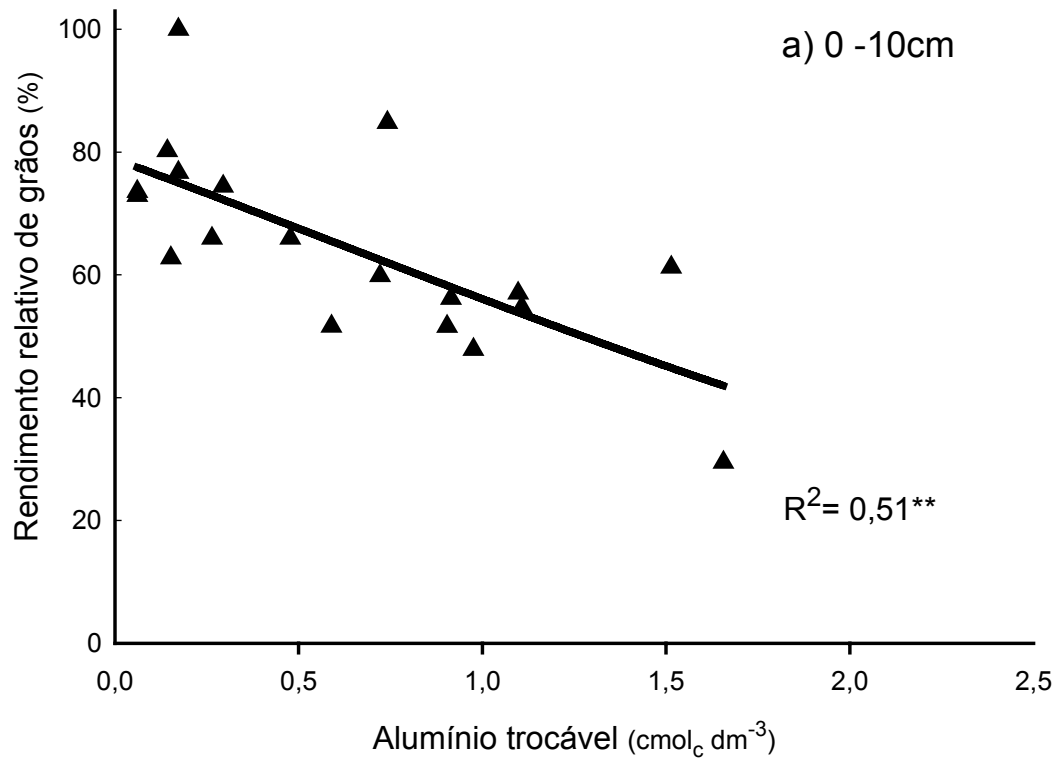


FIGURA 25. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o alumínio trocável nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, na Área 1, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

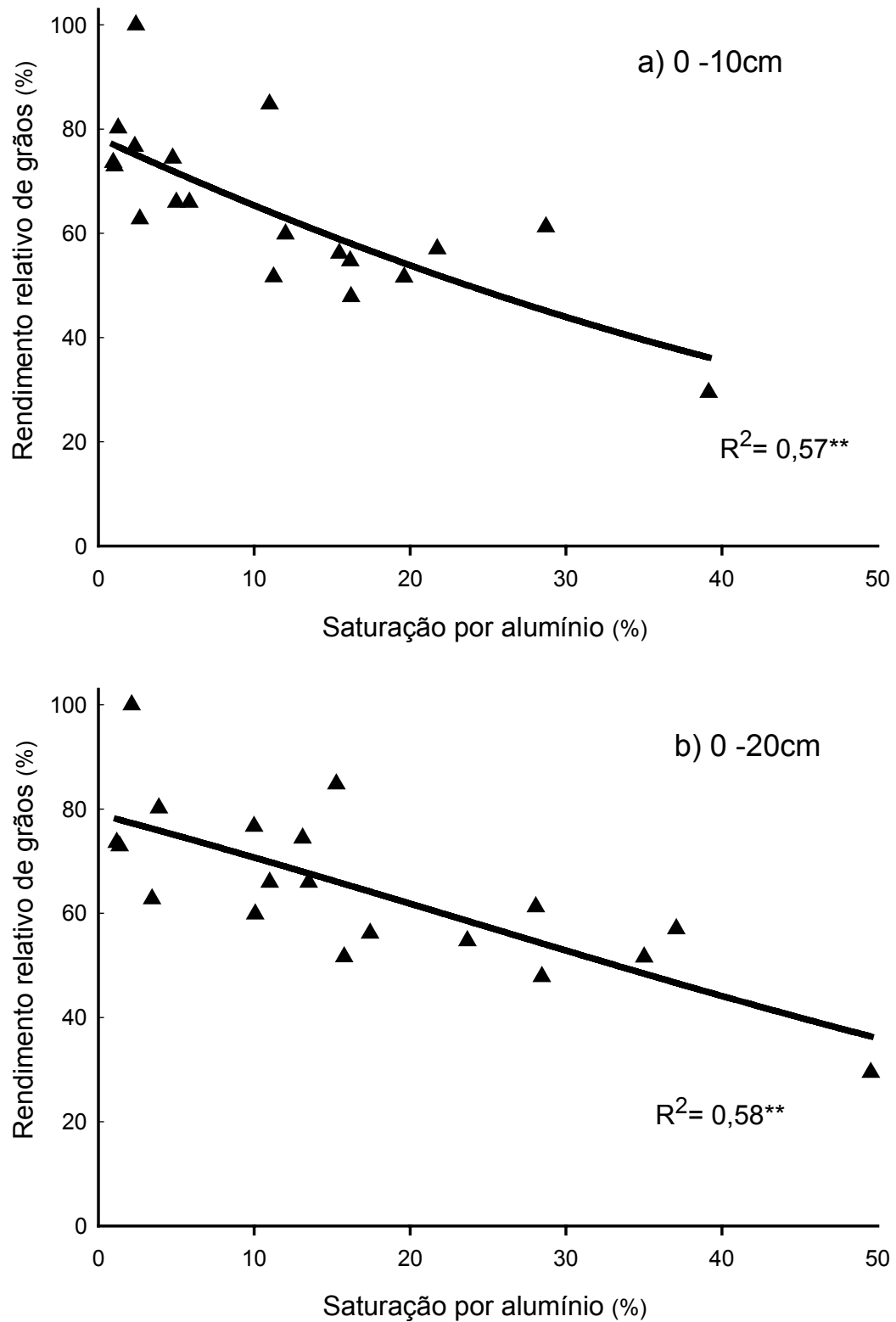


FIGURA 26. Relação entre o rendimento relativo de grãos e a saturação por alumínio nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, na Área 1, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

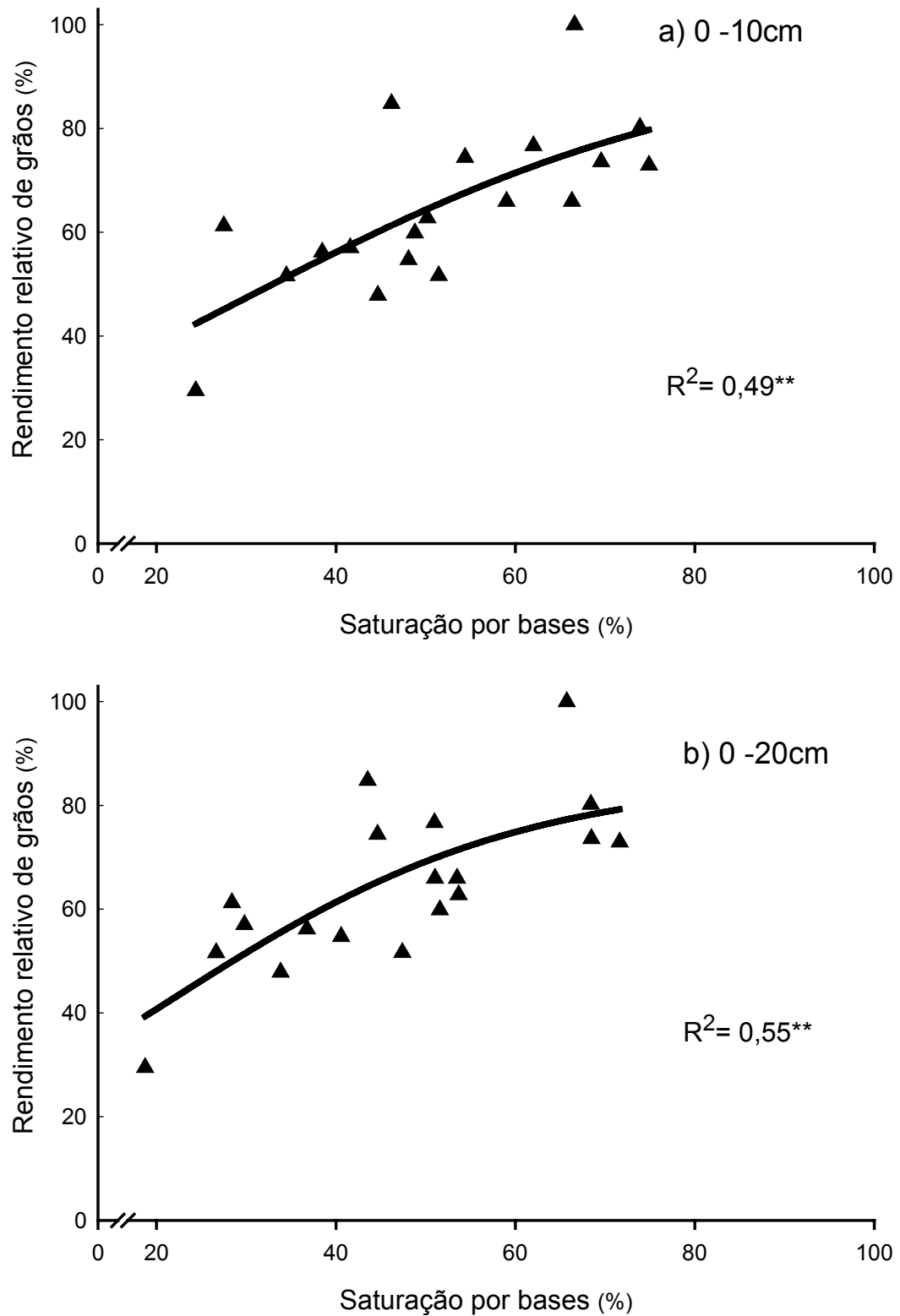


FIGURA 27. Relação entre o rendimento relativo de grãos e a saturação por bases nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, na Área 1, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

Para realização desse trabalho, foram selecionadas áreas com ampla faixa dos indicadores de acidez do solo. Pela condição de lavoura, ocorre também variabilidade da fertilidade do solo e, pela utilização de várias áreas de lavoura localizadas em diferentes regiões, ocorrem mudanças de textura do solo, precipitação pluviométrica, manejo, cultivares, tempo de adoção do sistema e de aplicação de calcário, etc. Nesse caso, todos esses fatores, e não só os de acidez do solo, determinam o rendimento de grãos. Para diminuir a influência da variabilidade entre as áreas e efetuar sua avaliação conjunta, utilizou-se o rendimento relativo de grãos, que foi calculado dentro de cada área tomando seu rendimento máximo como 100 % e os demais proporcionalmente ao máximo (Item 3.5.2). Assim, foi possível trabalhar com uma ampla base de dados e com áreas representativas na produção agrícola no Rio Grande do Sul para a validação das recomendações da Comissão... (1995; 2000). Com o aumento do número de pontos, aumenta também a dispersão, o que afeta o valor dos coeficientes de determinação e o nível de significância. O importante na análise de um grande número de informações, pertencentes a áreas diferentes, é a tendência central dos pontos nas curvas de resposta. Por isso, o uso de um modelo matemático que descreva a tendência dos pontos através de curvas de resposta sem apresentar queda no rendimento de grãos pelo alto nível de nutrientes no solo como o modelo quadrático apresenta e tendendo a média e não aos rendimentos máximos como no modelo de Mitscherlich. Para contornar essas deficiências foi utilizado nas regressões, entre o rendimento relativo de grãos e os indicadores de solo e de planta, o modelo polinomial tipo sigmóide com três parâmetros. A limitação do rendimento de grãos por toxidez causada por altos teores de nutrientes provavelmente não ocorre nas faixas de nutrientes encontrado no solo nessas áreas.

A média geral dos rendimentos de grãos obtidos nas áreas de soja foi de $3,4 \text{ Mg ha}^{-1}$ (variando de $2,2$ a $4,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), o que corresponde, a aproximadamente, a 57 sacos ha^{-1} e a média dos máximos foi de $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ (variando de $3,4$ a $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$), que corresponde a 75 sacos ha^{-1} . A média das áreas de soja de textura média (Áreas 1, 2 e 3) foi de $3,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ e das áreas de textura argilosa (Áreas 4, 5 e 6) foi de $3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Apêndice 1). O

rendimento médio da área de cevada (Área 7) foi de 2,2 Mg ha⁻¹ e o rendimento máximo de 3,0 Mg ha⁻¹.

A relação entre o rendimento relativo de grãos e o pH em água, no conjunto das áreas está representada na Figura 28. À medida que aumenta o pH em água há um aumento do rendimento de grãos até ao redor do pH 5,5, a partir do qual o rendimento tende a se manter inalterado em função do aumento do pH, nas duas camadas de solo. Os valores de R² foram intermediários, 0,43 e 0,49, nas camadas de 0-10 e 0-20 cm, respectivamente, porém muito significativos (P <0,01). Esta relação confirma a adequada decisão da Comissão de Química e Fertilidade em diminuir o valor do pH do solo de 6,0 para 5,5 para calagem no sistema plantio direto (Comissão..., 2000). Observe também (Figura 28) bons rendimentos, e até máximos em pH 5,0, em alguns casos. É importante salientar que uma boa parte do rendimento de grãos (20-30 %) não é limitada diretamente pelo pH do solo, mas sim por outros fatores. O rendimento relativo médio máximo, aproximadamente 80 %, corresponde, em média, a 3,6 Mg ha⁻¹ de soja e 2,4 Mg ha⁻¹ de cevada, consideradas elevadas para a condição de lavoura.

Com o pH 5,0, ocorre, em média, uma diminuição em torno de 10 % no rendimento em comparação ao pH 5,5. Isso, embora represente um valor percentual pequeno, corresponde à 360 kg de soja, tomando como base o rendimento médio de 3,6 Mg ha⁻¹. É importante considerar a equivalência produto (soja/calcário) na tomada de decisão da calagem. Considerando que, atualmente, o custo por tonelada de calcário esteja próximo do valor do saco de 60 kg de soja, e que geralmente o produtor utiliza em torno de 2 toneladas por hectare para elevar o pH do solo de 5,0 para 5,5, ainda haveria um lucro de 4 sacos ha⁻¹, considerando o resultado em um único cultivo e sem levar em conta o custo de aplicação do calcário e de depreciação de equipamentos.

A relação entre o rendimento e o pH em CaCl₂ (Figura 29) apresenta também valores de R² intermediários, e muito significativos (P <0,01). Esta relação é muito parecida daquela entre o pH em água e o rendimento (Figura 28). Os valores de pH em CaCl₂ na camada de 0-10 cm são maiores em relação à camada de 0-20 cm, pelo efeito da calagem superficial. Em pH em CaCl₂ próximo a 5,0 o rendimento médio já está muito próximo ao médio máximo. A partir de 4,5, na camada de 0-10 cm e de 4,8 na camada de 0-20

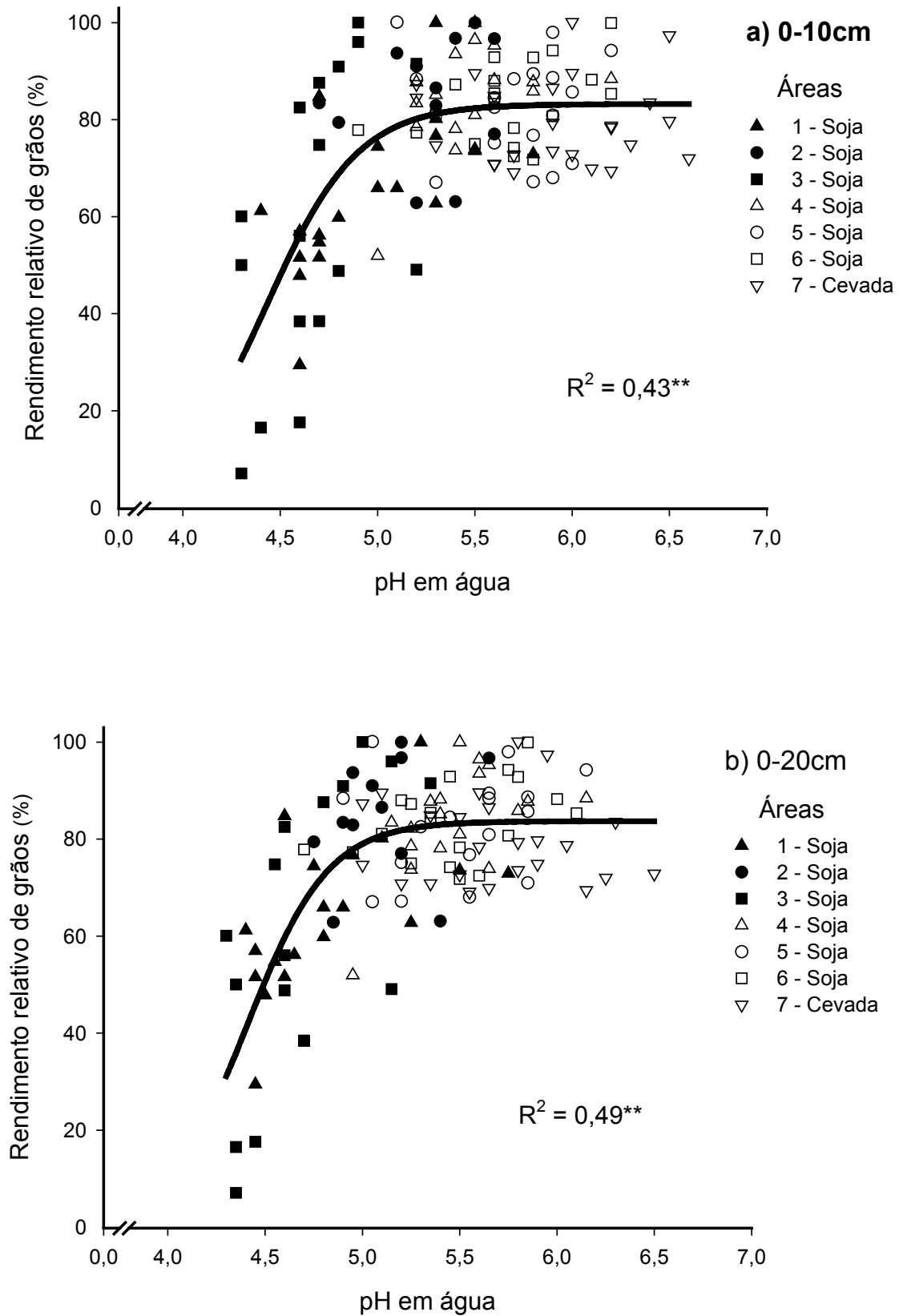


FIGURA 28. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o pH em água nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

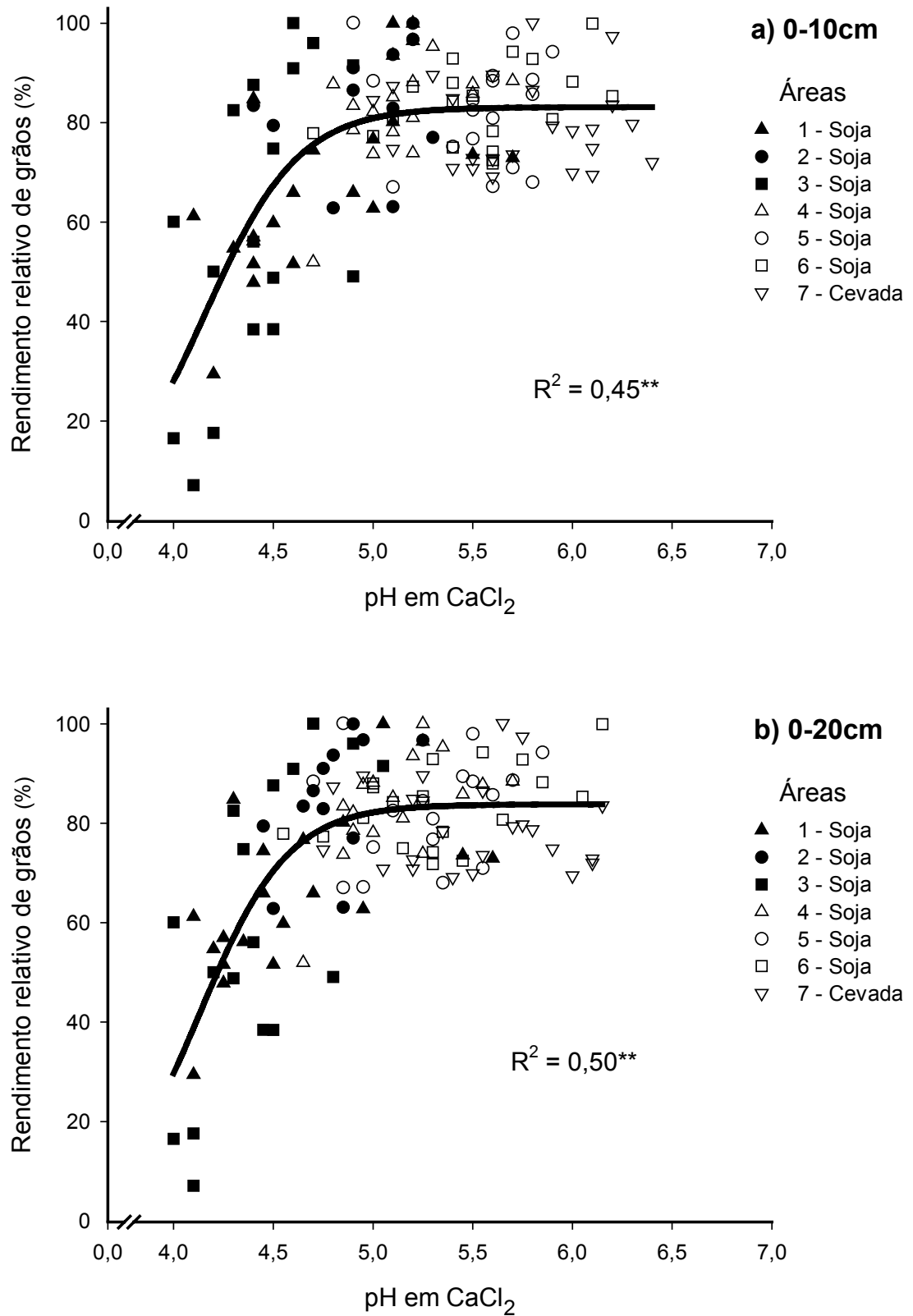


FIGURA 29. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o pH em CaCl_2 nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

cm, foram observados rendimentos máximos. A correlação entre o rendimento e o pH em CaCl_2 foi superior à observada entre o mesmo e o pH em água (Figura 28). A correlação entre o pH medido nas duas soluções é estreita ($R^2 > 0,96$ - Figura 8). Verifica-se, para esses solos pouca influência de sais na determinação do pH em água (Figuras 28 e 29). No caso da utilização do pH em CaCl_2 para a tomada de decisão para a calagem o valor de referência sugerido é em torno de 5,0 para esses solos.

A relação entre o rendimento relativo e a saturação por bases (Figura 30), apresentou valores de R^2 superiores aos observados entre esse e o pH (Figuras 28 e 29), com os coeficientes de determinação também muito significativos ($P < 0,01$). As relações são similares nas duas camadas de solo. A saturação por bases é maior nas áreas com maior tempo de cultivo e com menor acidez. Os rendimentos máximos começam a ser obtidos com a saturação por bases a partir de 50 %, nas duas camadas de solo. Como citado anteriormente (Figura 7), o pH 5,5 corresponde a 70 % da saturação por bases, pela equação (Kaminski et al., 2001) adotada na ROLAS a partir de 2002. Como o que determina o(s) indicador(es) e o(s) valor(es) de referência para a tomada de decisão para a calagem são as regressões entre o rendimento relativo de grãos e os indicadores de acidez do solo, para a saturação por bases esse valor é em torno de 65 %, a partir do qual o incremento no rendimento de grãos é baixo, e é maior do que 95 % do máximo médio. Essa diferença de valores pela relação direta entre o pH em água e a saturação por bases e entre esses indicadores e o rendimento se devem as relações não lineares e ao fato da resposta da planta ser determinada pela interação de vários fatores.

A relação do rendimento relativo de grãos e o alumínio trocável (Figura 31) apresenta valores de R^2 superiores aos encontrados nas relações entre esse e o pH e a saturação por bases. Os rendimentos máximos foram obtidos com alumínio trocável até $0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, nas camadas de 0-10 e 0-20 cm, respectivamente. Com o aumento dos teores de alumínio trocável a partir de $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, ocorrem acentuadas limitações no rendimento. Com teor de $1,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de alumínio trocável nas camadas de 0-10 e 0-20 cm, ocorre uma perda de aproximadamente 15 % em relação ao rendimento médio. O efeito da calagem na diminuição da acidez determinando que não haja

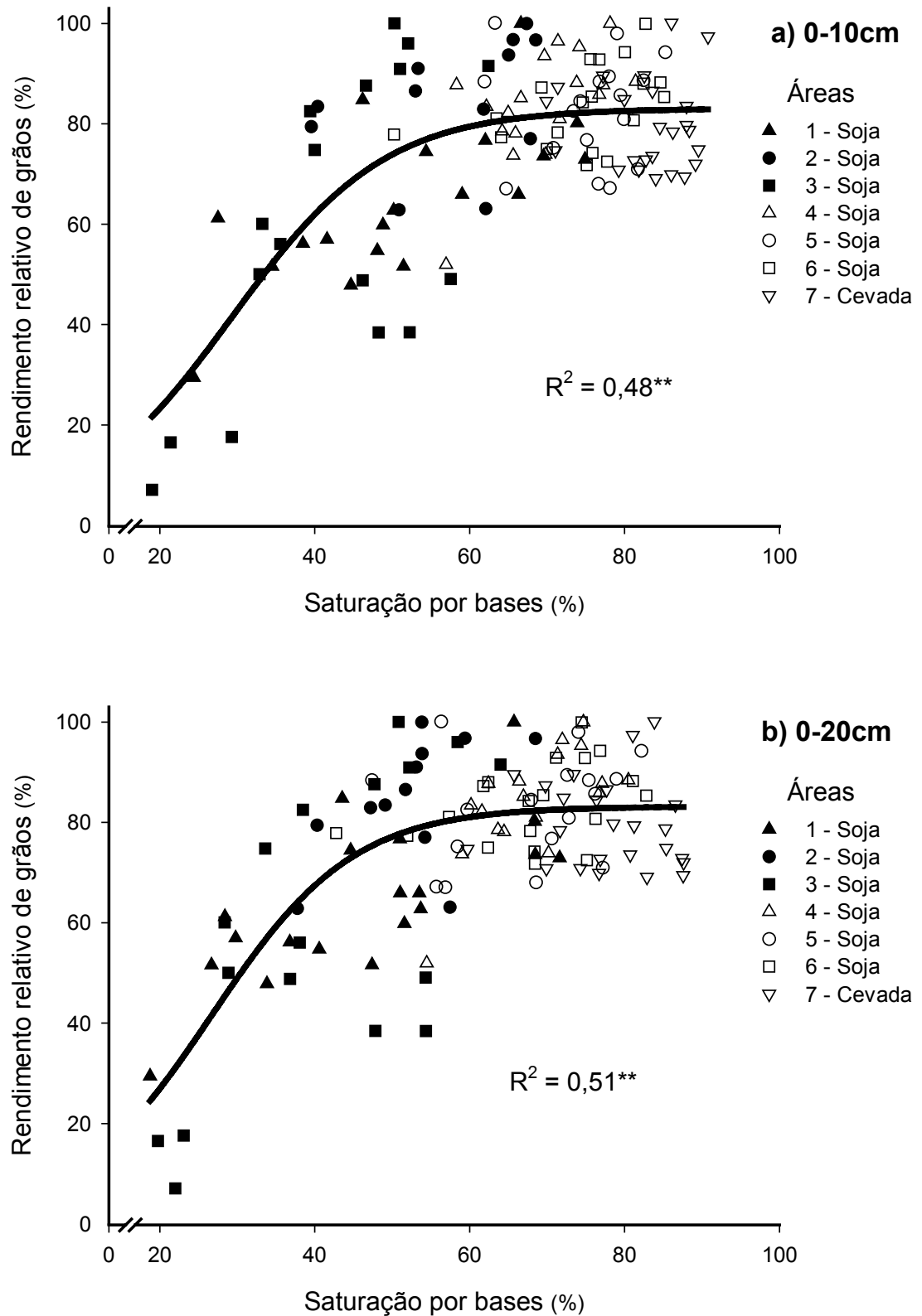


FIGURA 30. Relação entre o rendimento relativo de grãos e a saturação por bases nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

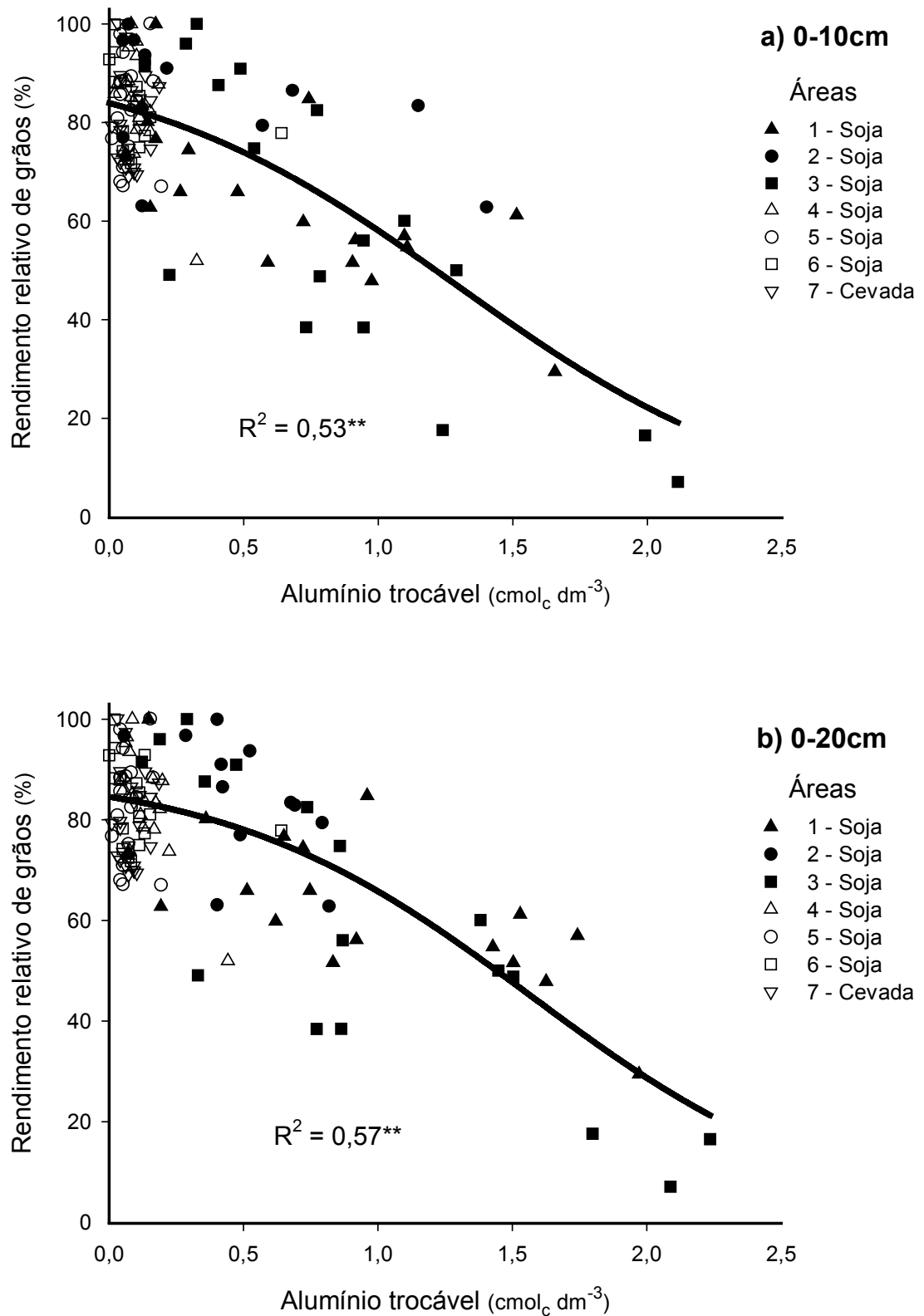


FIGURA 31. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o alumínio trocável nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

limitação no rendimento de grãos pelo alumínio trocável foi observado nas Áreas 4 a 7. Para maior segurança na manutenção de alto potencial produtivo das lavouras, é recomendável manter o teor de alumínio trocável menor que $0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, considerando a camada 0-10 cm.

O rendimento relativo de grãos diminuiu com o aumento da saturação por alumínio nas duas camadas de solo (Figura 32). Os coeficientes de determinação, em ambas as camadas analisadas, são bons ($R^2=0,51$ e $0,55$) e muito significativos ($P < 0,01$). O efeito da calagem é novamente observado, especialmente nas Áreas 4 a 7. Segundo Anghinoni & Salet (2000), a saturação por alumínio superior a 10 % tende a limitar o desenvolvimento das culturas; nessas áreas, este valor reduziu o rendimento de grãos em aproximadamente 10 % em relação à média. Em saturação por alumínio menor do que 5 %, outros fatores é que limitam o rendimento de grãos.

O rendimento tende a diminuir com o aumento da relação $\text{Al}/\text{Ca}+\text{Mg}$, na análise das duas camadas de solo (Figura 33). A boa correlação é refletida pelos valores de R^2 um pouco superiores na camada de 0-20 cm ($0,54$) em relação à camada 0-10 cm ($0,52$), porém ambos muito significativos ($P < 0,01$). Essa relação representa a proporção de alumínio trocável em relação à maioria das bases trocáveis do solo, similar a saturação por alumínio e a saturação por bases. A partir de 0,1 desta relação $\text{Al}/\text{Ca}+\text{Mg}$ ocorreu limitação no rendimento de grãos.

A relação entre o rendimento relativo de grãos e $\text{H}+\text{Al}$, que representa a acidez potencial, é relativamente baixa ($R^2 < 0,40$) nas duas camadas do solo (Figura 34). Há uma maior diminuição no rendimento de grãos com o aumento da acidez potencial nas Áreas 1 a 3 comparado as Áreas 4 a 7. Como a acidez potencial também aumenta com o teor de argila do solo, os valores de $\text{H}+\text{Al}$, necessários para causar limitação no rendimento de grãos nos solos mais argilosos, deveria ser mais elevado possibilitando a determinação do nível de referência desse indicador de acidez de acordo com o teor de argila do solo. Em geral, os rendimentos máximos são obtidos na faixa de 2 a $5,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de $\text{H}+\text{Al}$, porém acima de $5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ houve uma maior queda no rendimento. Os valores de R^2 , da relação entre a acidez potencial e o rendimento foram menores que os obtidos nas relações entre esse e os demais indicadores de acidez do solo.

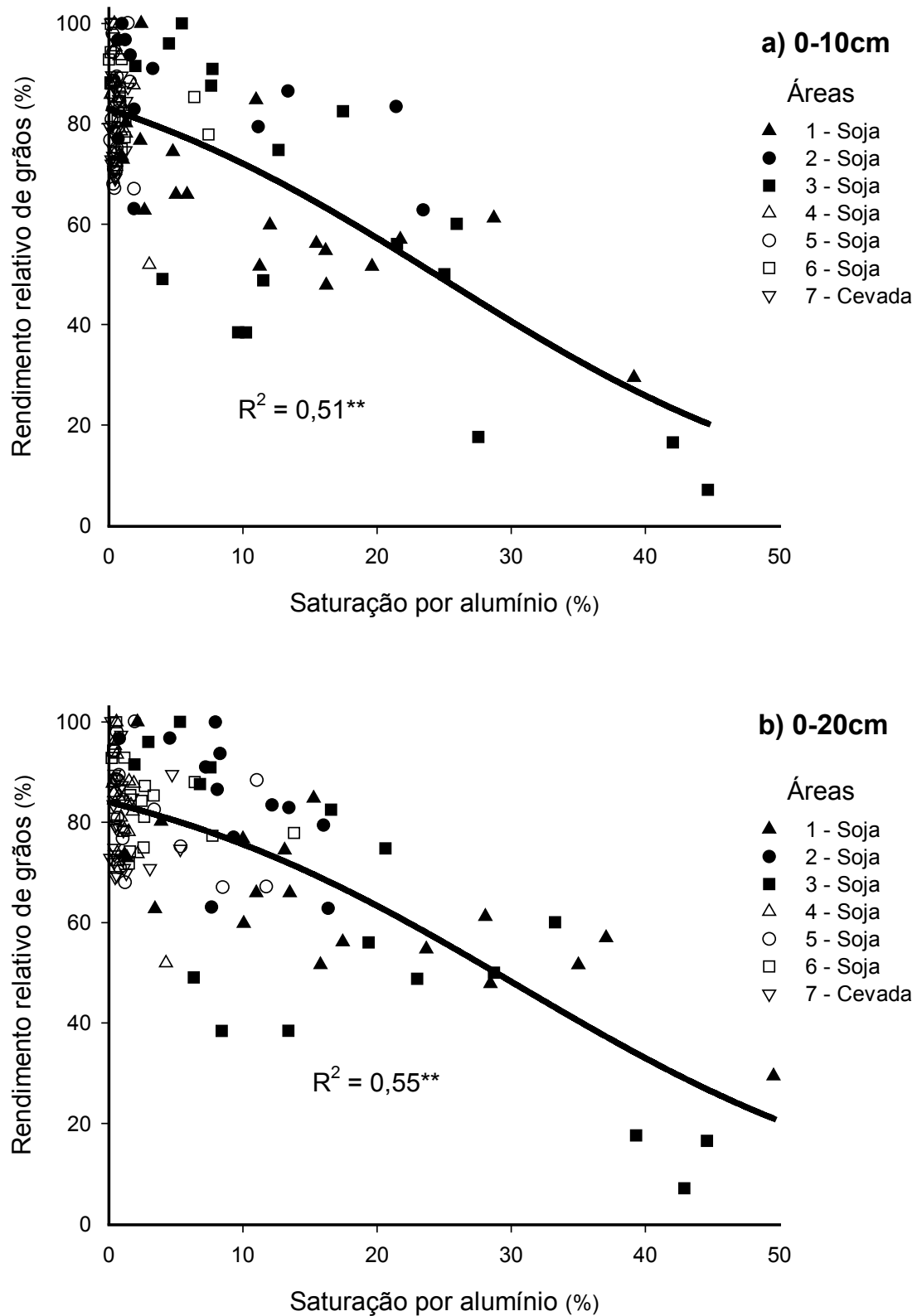


FIGURA 32. Relação entre o rendimento relativo de grãos e a saturação por alumínio nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

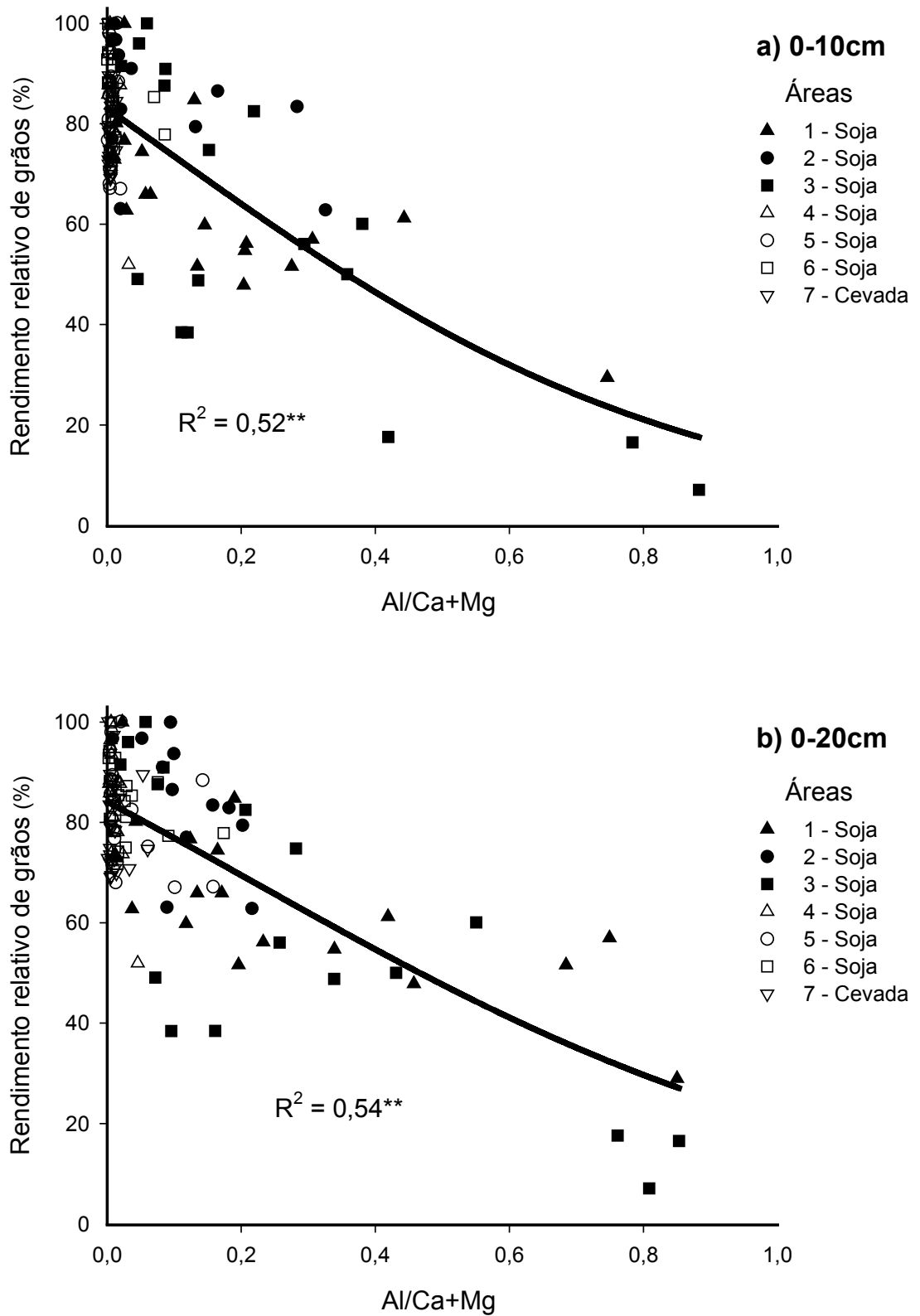


FIGURA 33. Relação entre o rendimento relativo de grãos e Al/Ca+Mg nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, nas lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

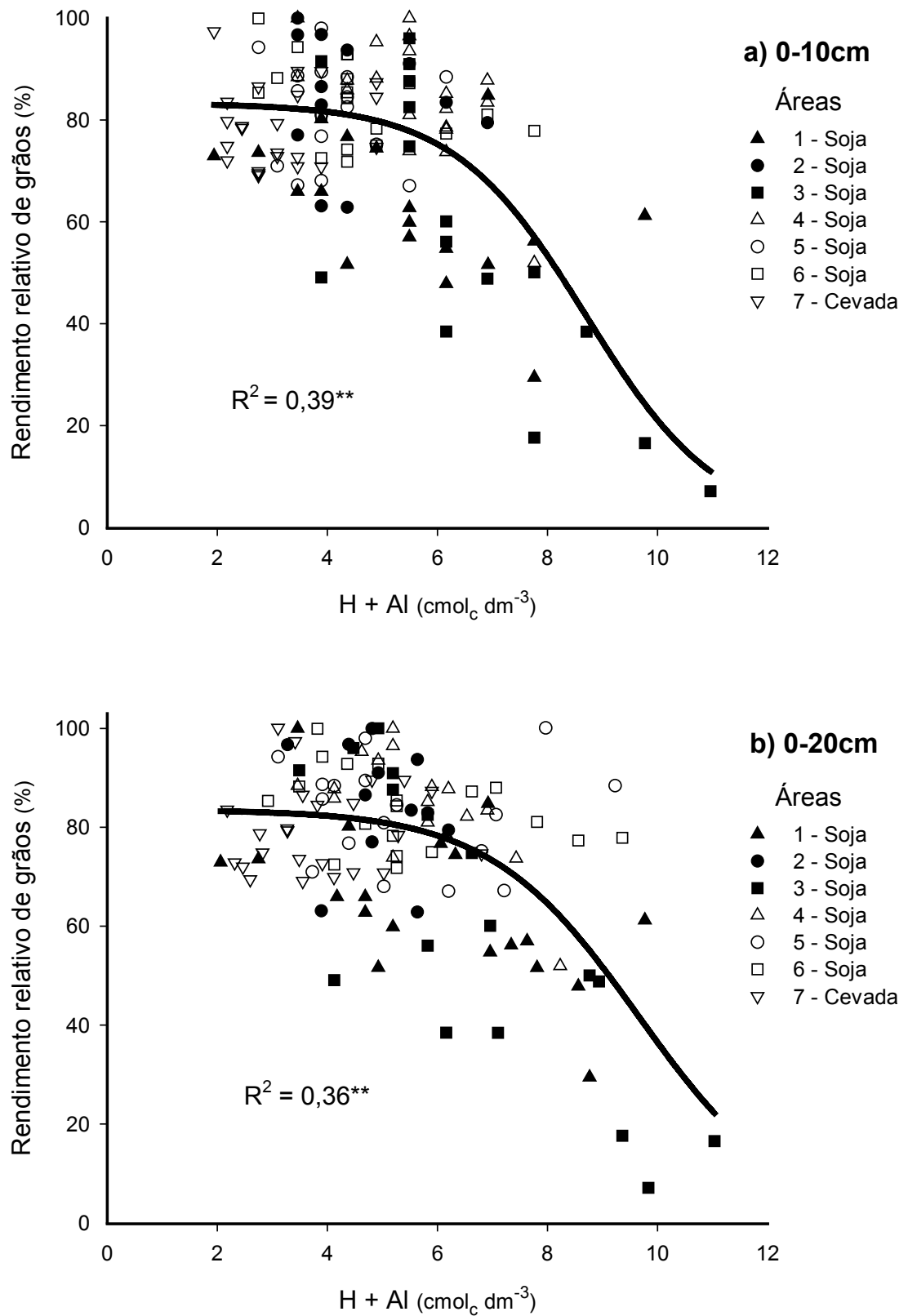


FIGURA 34. Relação entre o rendimento relativo de grãos e H+Al nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, nas lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

A relação entre o rendimento relativo de grãos e a matéria orgânica (Figura 35) mostra um efeito diferenciado de acordo com a textura do solo das áreas utilizadas. Embora muito significativos, os coeficientes R^2 são baixos, sendo maior na camada de 0-10 cm ($R^2=0,35$). Com aumento do teor de matéria orgânica há um aumento no rendimento de grãos. Nos solos com textura média, os rendimentos máximos foram obtidos a partir de 2,1 % de matéria orgânica e, nas áreas de textura argilosa, acima de 2,4 %. A matéria orgânica é responsável pelo incremento da CTC efetiva (Apêndice 4). No entanto, a CTC efetiva apresenta menor valor de R^2 da relação entre essa e o rendimento de grãos do que desse e a matéria orgânica (Apêndice 9). Esse comportamento se deve às contribuições da matéria orgânica, além da CTC efetiva e da fertilidade do solo, na parte física, principalmente na estrutura e retenção de água, e na parte biológica do solo.

A relação entre o rendimento relativo e o teor de fósforo disponível no solo (Figura 36) é baixa ou inexistente ($R^2=0,03$ e $0,07$). Isso se deve aos teores elevados de fósforo disponível no solo nas camadas analisadas. Essa dispersão e baixos valores de R^2 também foram observados nas relações deste nutriente com os tipos de acidez do solo. Os melhores coeficientes de determinação nas relações entre o fósforo disponível foram obtidos e o alumínio trocável (Figura 21), seguido do pH em água (Figura 19) na camada de 0-20 cm. Poucos pontos e áreas apresentaram teores baixos de fósforo, não sendo limitante, nas áreas de textura argilosa. Na Área 2, por exemplo, mesmo com baixos teores de fósforo disponível, nas duas camadas de solo, foram obtidos bons rendimentos de soja (média de $3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$). O potássio disponível, pelos seus teores elevados, também não causou limitação no desenvolvimento das plantas na maioria das áreas utilizadas (Apêndice 10).

Em geral, foi observado bons níveis de fertilidade do solo tanto pelos baixos teores de alumínio trocável como pelos elevados níveis de pH, de fósforo e potássio disponíveis, de saturação por bases e de matéria orgânica, na maioria dos pontos e das áreas utilizadas.

A relação entre o rendimento de grãos e a concentração de fósforo no tecido vegetal (Figura 37a) apresenta coeficientes de determinação maiores ($R^2=0,38$) do que desse com o fósforo disponível no solo ($R^2=0,03$) (Figura 36), na camada (0-10 cm). Isto confirma que a baixa correlação do fósforo

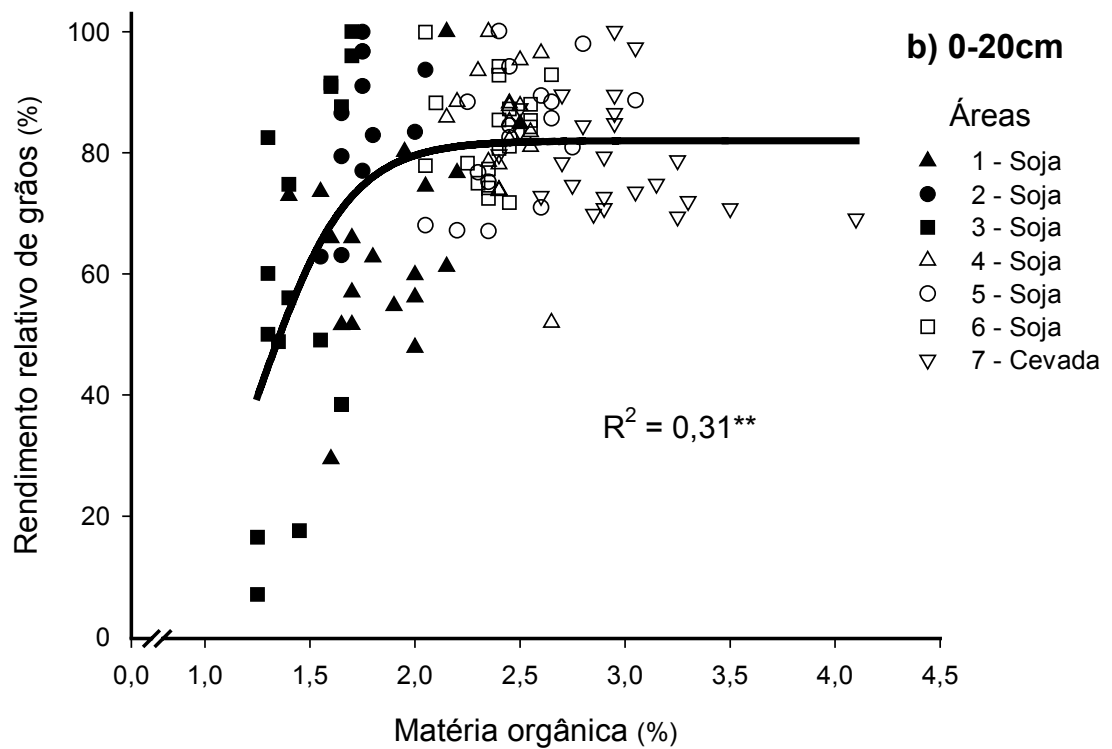
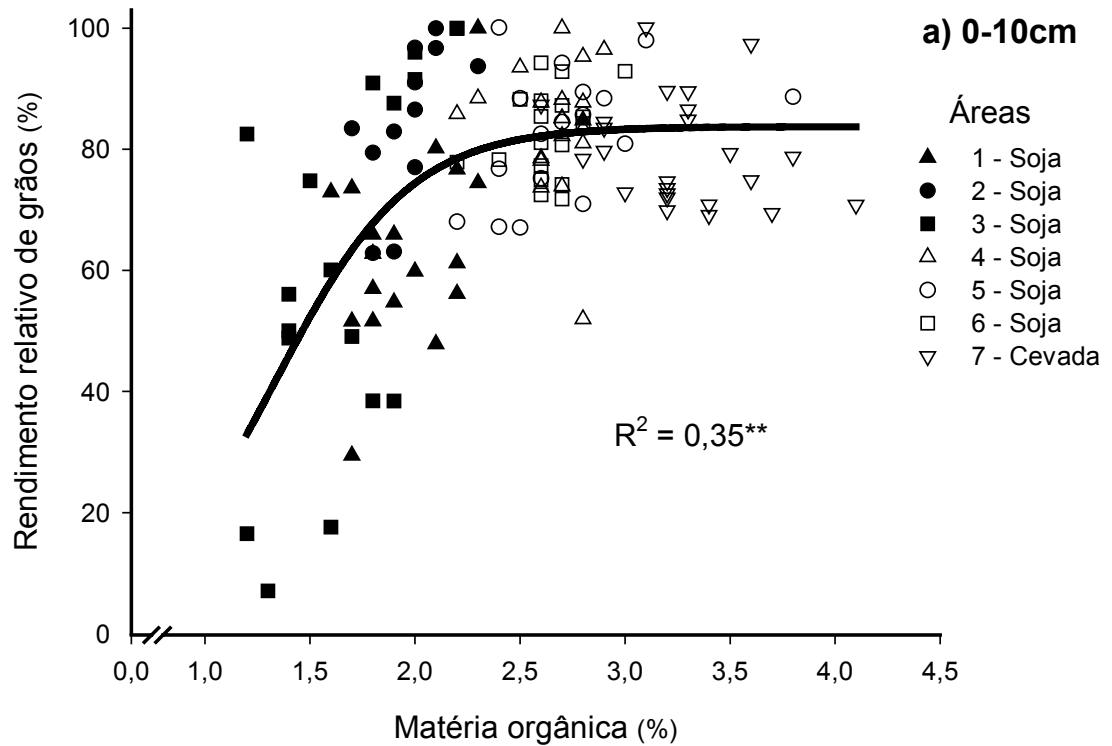


FIGURA 35. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o teor de matéria orgânica nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

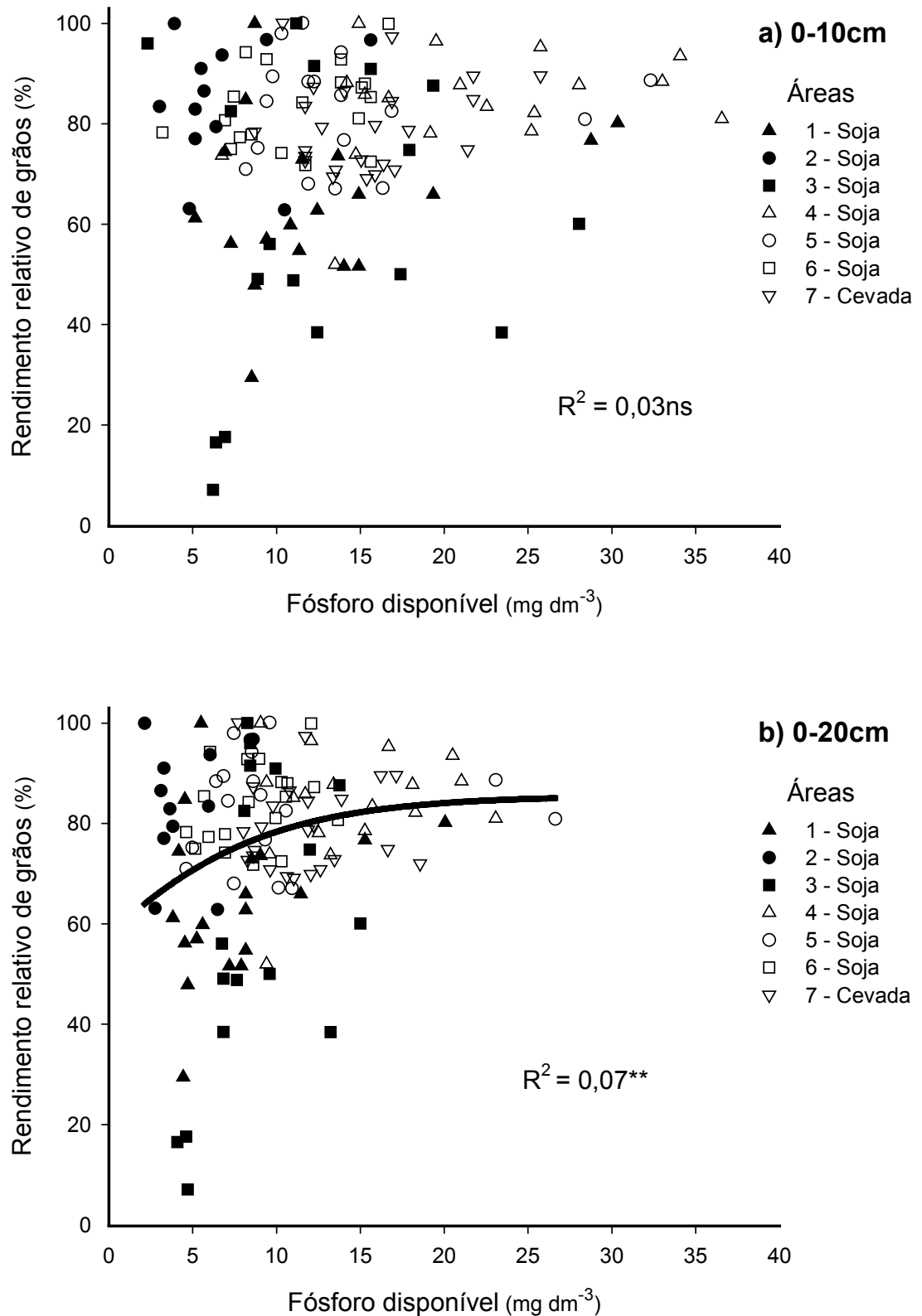


FIGURA 36. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o teor de fósforo disponível (Mehlich I) nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

disponível com o rendimento de grãos deve-se aos altos teores desse nutriente no solo, possibilitando suprimento adequado para absorção pelas plantas. A Figura 37a mostra uma maior concentração de fósforo no tecido vegetal da soja nas áreas com o maior teor de argila e com menor pH e alumínio trocável. A relação entre o rendimento e a concentração de potássio ($R^2=0,11$) (Figura 37b) é menor do que com a concentração de fósforo. Embora seus teores no solo também sejam elevados. Nessa relação não há separação das áreas por efeito de acidez ou por textura do solo.

Houve uma melhor relação entre o rendimento e a concentração de cálcio (Figura 38a) do que com o magnésio (Figura 38b) no tecido vegetal. Ambas, são muito significativas e demonstram efeito da quantidade de bases no solo, diminuindo a toxidez do alumínio trocável e a sua importância na constituição da planta.

Embora os valores de R^2 não tenham sido altos, pela coleta de elevado número de pontos, foram muito significativos, na maioria das relações a $P < 0,01$ e muito representativos, pela utilização de lavouras e de várias áreas. Na avaliação das áreas de lavoura, a resposta das plantas é o resultado de interação de fatores, do efeito do sistema e do manejo adotado. Avaliando somente fatores ligados à química do solo, que não são os únicos determinantes do rendimento de grãos, os coeficientes de determinação das regressões entre o rendimento de grãos e os indicadores de acidez e de fertilidade são menores que os encontrados em condições experimentais, onde é alterado apenas um fator. Para a condição de variabilidade esses valores de R^2 são considerados bons, além desses é importante a tendência dos pontos e a representatividade da condição natural de lavoura, para a qual são elaboradas as recomendações de calagem.

A Tabela 1 apresenta os valores de R^2 das relações entre o rendimento relativo de grãos e os indicadores do solo e de planta; as respectivas equações encontram-se no Apêndice 11. Os valores dos coeficientes de determinação dos indicadores de acidez apresentaram uma pequena faixa de variação, de 0,39 a 0,53, na camada de 0-10 cm e de 0,36 a 0,57 na camada de 0-20 cm. Em geral, os valores de R^2 foram maiores na camada de 0-20 cm para os indicadores de acidez e fósforo disponível, diferente do observado para matéria orgânica e acidez potencial, que foram

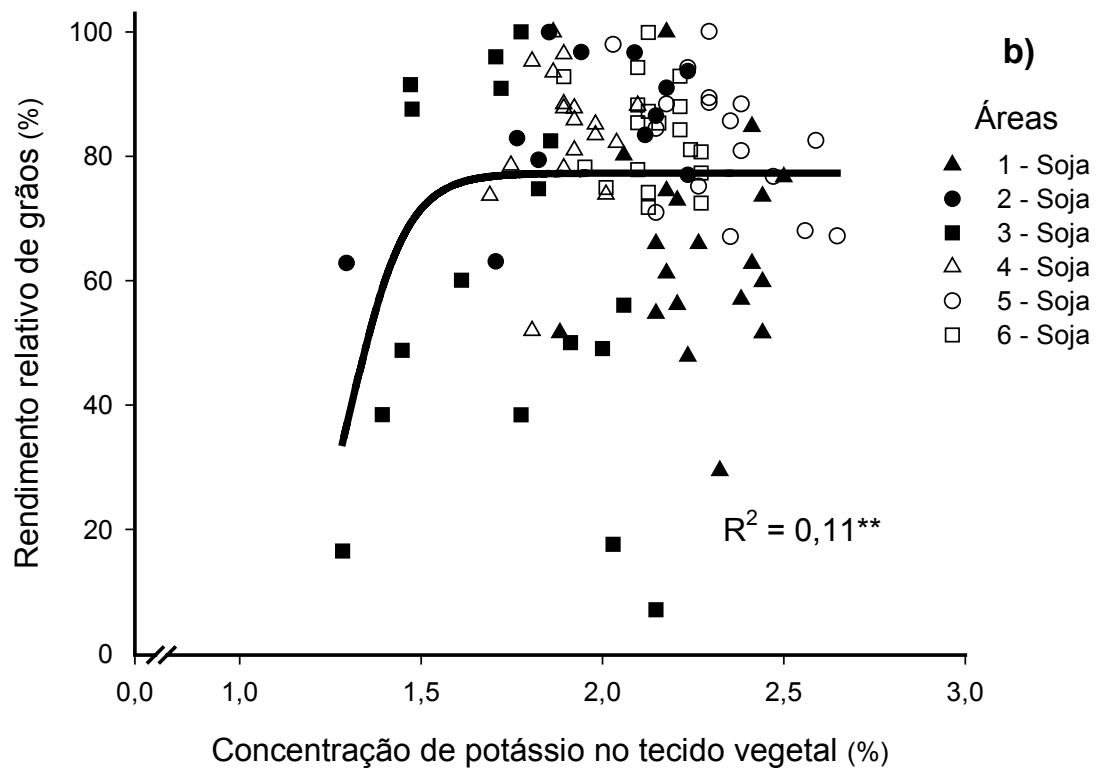
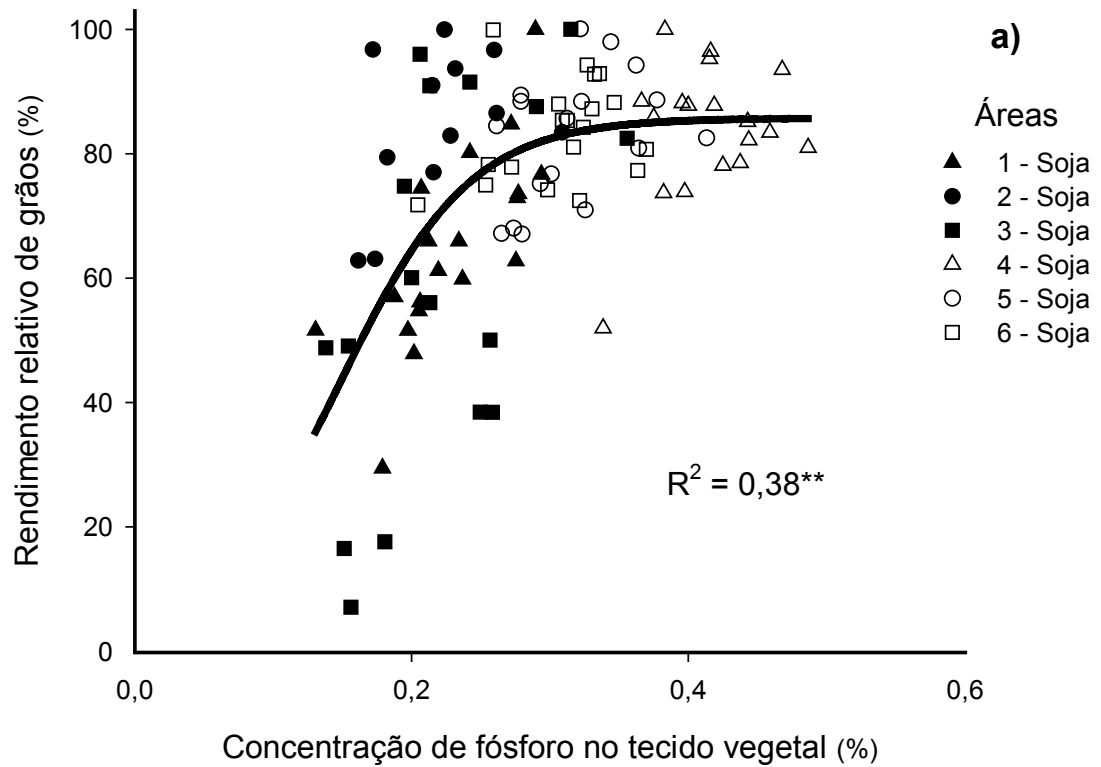


FIGURA 37. Relação entre o rendimento relativo de grãos e a concentração de fósforo (a) e potássio (b) no tecido vegetal da soja, em lavouras, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

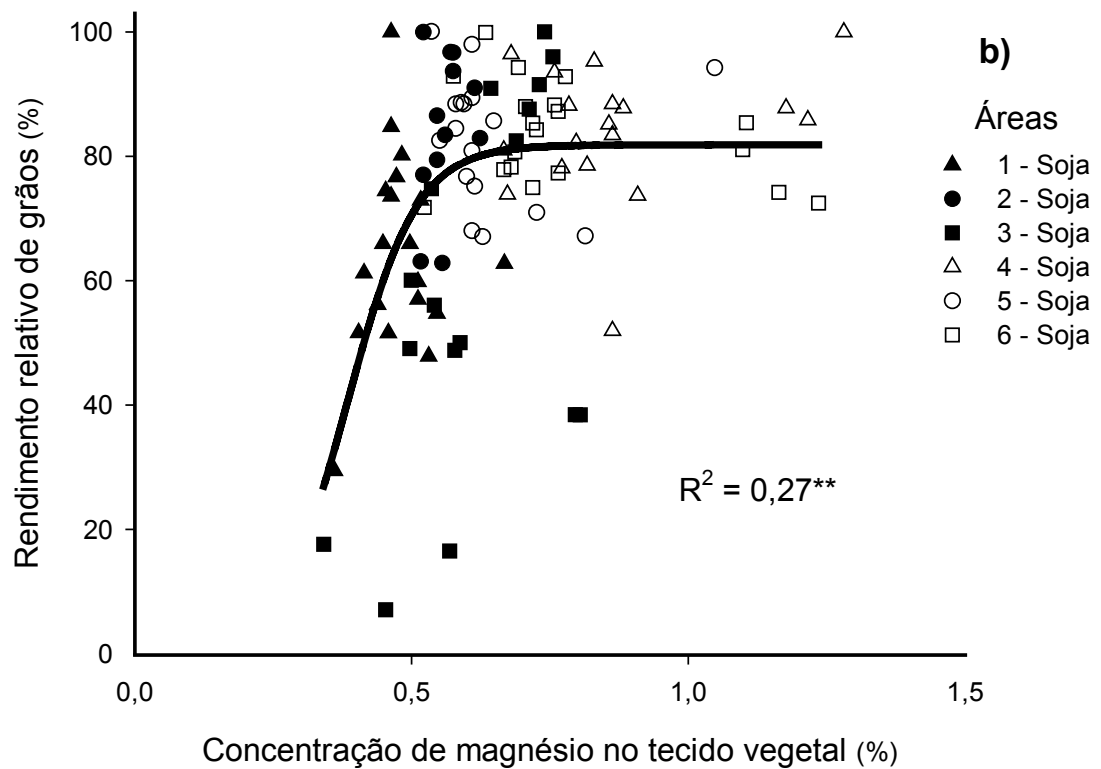
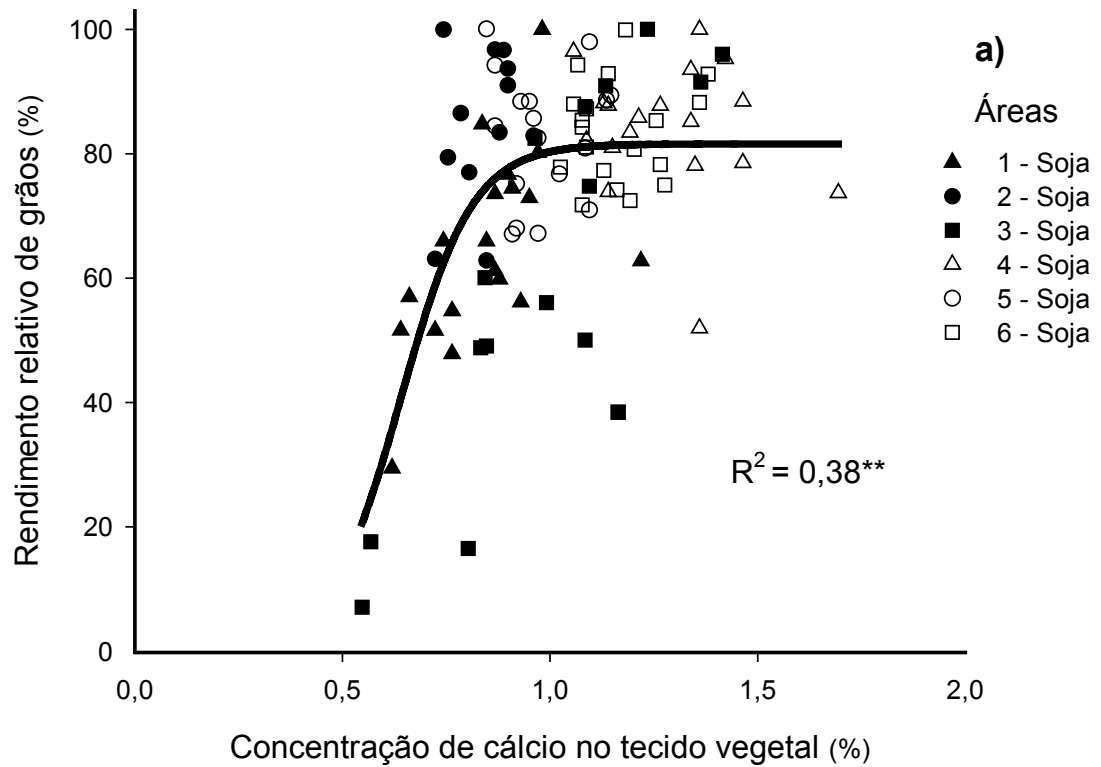


FIGURA 38. Relação entre o rendimento relativo de grãos e a concentração de cálcio (a) e magnésio (b) no tecido vegetal da soja, em lavouras, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

Tabela 1. Valores dos coeficientes de determinação (R^2) das regressões simples entre o rendimento relativo de grãos e os indicadores de solo e de planta, em áreas de lavoura, sob sistema plantio direto, no Planalto Médio do RS.

Resposta das plantas	Indicadores	Coeficientes de determinação	
		Camada de solo	
	Indicadores de solo	0-10 cm	0-20 cm
Rendimento relativo de grãos	pH em água	0,43**	0,49**
	pH em CaCl ₂	0,45**	0,50**
	Saturação por bases	0,48**	0,51**
	Alumínio trocável	0,53**	0,57**
	Saturação por alumínio	0,51**	0,55**
	Al/Ca+Mg	0,52**	0,54**
	H + Al	0,39**	0,36**
	Matéria orgânica	0,35**	0,31**
	Fósforo disponível	0,03ns	0,07**
		Indicadores de planta	Tecido vegetal (%)
	Fósforo	0,38**	
	Potássio	0,11**	
	Cálcio	0,38**	
	Magnésio	0,27**	

ns = não significativo ($P > 0,05$).

* = significativo ($P < 0,05$).

** = muito significativo ($P < 0,01$).

superiores na camada de 0-10 cm. O indicador de acidez do solo que melhor se correlacionou com o rendimento relativo de grãos foi o alumínio trocável, nas duas camadas de solo, seguido, de perto, na camada de 0-10 cm pelo Al/Ca+Mg, pela saturação por alumínio e pela saturação por bases e mais distante pelo pH em CaCl₂, pelo pH em água e por último pelo H+Al. Na camada 0-20 cm, o alumínio trocável foi seguido pela saturação por alumínio, pelo Al/Ca+Mg, pela saturação por bases, pelo pH em CaCl₂ e pelo pH em água e, por último, pelo H+Al. Nas relações entre a concentração de nutrientes no tecido da soja e o rendimento, os maiores coeficientes de determinação foram obtidos com o fósforo e o cálcio, seguido do magnésio.

De acordo com os coeficientes de determinação das regressões entre o rendimento de grãos e os indicadores de acidez do solo (Tabela 1), o alumínio trocável, a relação Al/Ca+Mg e a saturação por alumínio foram superiores a saturação por bases e ao pH em água, sendo estes os indicadores utilizados pela Comissão... (2000) para a tomada de decisão para a

calagem no sistema plantio direto. Como a relação Al/Ca+Mg apresenta faixa de valores muito estreita e muito sensível, o mais prático seria, então, o uso do alumínio trocável ou da saturação por alumínio como indicadores adicionais a tomada de decisão para a calagem. Os valores desses indicadores já vem sendo fornecidos nos laudos de análises de solo, o que facilita o processo de tomada de decisão. É importante lembrar que a saturação por alumínio envolve um maior número de informações no seu resultado final, representa a proporção da acidez trocável retida na CTC efetiva, possível de passar para solução e causar toxidez às plantas, na condição atual de pH. Destas informações, fazem parte as relacionadas ao tipo de solo, a CTC efetiva, dependente especialmente do teor de matéria orgânica e textura do solo, a quantidade de bases trocáveis (Ca, Mg e K), ao alumínio trocável, que representa a acidez trocável, o maior responsável pela limitação do desenvolvimento das culturas, também no sistema plantio direto. Esse indicador, saturação por alumínio, além de representar esse conjunto de informações, também apresenta valores de R^2 muito próximos dos obtidos nas relações entre o rendimento de grãos e o alumínio trocável e Al/Ca+Mg.

A saturação por bases também pode ser utilizada como indicador de tomada de decisão, com vantagem em relação ao pH em água por representar a proporção de bases efetiva em relação a acidez potencial, da qual faz parte a acidez trocável, refletida pelo R^2 superior, nas relações entre esses e o rendimento de grãos, enquanto o pH representa a atividade dos íons hidrogênio na solução do solo. A relação entre o rendimento e o pH em CaCl_2 apresentou R^2 superior ao pH em água, esses valores foram muito próximos, portanto ambos podem ser utilizados na tomada de decisão, embora os valores de R^2 sejam menores que os obtidos com a maioria dos indicadores de acidez. A acidez potencial (H+Al) não é indicada para tomada de decisão por apresentar um R^2 muito baixo, e representa a capacidade do solo em fornecer H^+ para a solução do solo e não a condição atual de acidez.

Em geral, os valores de R^2 da relação entre o rendimento com os indicadores de acidez do solo foram superiores aos obtidos nas relações entre o mesmo e os indicadores de fertilidade do solo e de planta (Tabela 1). A avaliação da concentração de nutrientes no tecido vegetal foi realizada para

detectar possíveis deficiências de nutrientes no solo e não visando sua utilização como indicador de tomada de decisão.

Como visto anteriormente, na maioria das relações entre os indicadores de acidez do solo e o rendimento de grãos apresentaram R^2 um pouco maiores na camada de 0-20 cm quando comparados com 0-10 cm. Essas relações apresentaram valores de R^2 menores que os esperados, o que, em parte, é justificado pela natureza da pesquisa e pela resposta das plantas ser o resultados das interações existentes entre os fatores de solo, não só dos relacionados com a química e fertilidade, mas também com a parte física e biológica. A maior variabilidade de indicadores de solo e planta, em áreas de lavoura, inclusive em várias áreas, sem isolar fatores nem efeitos, reflete em R^2 menores dos encontrados em condição experimental, porém na maioria das vezes, foram muito significativos. Também se observa que uma faixa em torno de 20% do rendimento de grãos não foi limitado por fatores de acidez e, provavelmente, nem sejam por fatores de fertilidade do solo. É importante a realização de estudos que contemplem tanto a parte da fertilidade do solo (química), como a física e a biologia do solo. Com intuito de buscar informações sobre os fatores que limitam o rendimento de grãos quando a acidez trocável é baixa, foram realizadas algumas tentativas relacionando esse e alguns indicadores de fertilidade do solo, utilizando somente os pontos, amostras de solo e grãos, que apresentavam teor de alumínio trocável menor que $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ na camada de 0-10 cm (Apêndice 12). Embora algumas relações tenham sido significativas ($P < 0,01$), todas apresentaram valores de R^2 muito baixos: matéria orgânica ($R^2=0,09$) e CTC efetiva ($R^2=0,06$), e as demais, não foram significativas ($P > 0,05$): com alumínio trocável, saturação por bases, pH em água, pH em CaCl_2 e fósforo disponível. Essas relações confirmam a importância da contribuição da matéria orgânica no aumento da CTC efetiva, ciclagem de nutrientes e nas partes física e biológica do solo. Com o objetivo de verificar se a combinação de um grupo de fatores, indicadores da acidez e fertilidade do solo, apresenta melhor relação com o rendimento relativo de grãos que os observados entre esse e cada indicador avaliado, foram realizadas as regressões múltiplas. Utilizou-se modelo Stepwise (SAS, 1991), com um nível de significância de 0,25 ($P < 0,25$) para entrada e permanência das variáveis no modelo. Esse nível foi utilizado para

permitir a entrada de maior número de variáveis independentes no modelo. Não foram estipulados nem o número e nem as variáveis que deveriam permanecer no mesmo.

O uso de mais de uma variável não aumentou os valores de R^2 (Tabela 2). Na camada de 0-10 cm na regressão múltipla linear, o R^2 chegou a 0,53 com Al/Ca+Mg e o alumínio trocável e, no modelo quadrático, a 0,55 incluindo a saturação por alumínio e a matéria orgânica. Na camada de 0-20 cm, na regressão múltipla linear chegou a 0,55 com alumínio trocável, Al/Ca+Mg e saturação por bases e, na múltipla quadrática, a 0,61 com saturação por alumínio, matéria orgânica e alumínio trocável. O pequeno incremento nos valores de R^2 deve-se ao fato que a maioria das variáveis apresentam uma boa correlação entre si. Os demais indicadores avaliados, ligados à fertilidade do solo, apresentavam incrementos mínimos no R^2 total, e por isto não foram apresentados. Era esperado que a combinação de indicadores um grupo de fatores apresentasse de incrementos significativos nos valores dos R^2 , tanto pela característica da regressão múltipla quanto por ser conhecido que o rendimento é determinado pela interação de vários fatores, principalmente, em áreas de lavoura no sistema plantio direto consolidado, com suas alterações e particularidades, o que não ocorreu neste trabalho. Kaminski (1974) verificou, pelo uso de regressões múltiplas, que os fatores combinados apresentaram altos coeficientes de determinação com a necessidade de calcário, no sistema convencional. Isso justifica a premissa do efeito da associação dos diferentes fatores na acidez do solo, indicando que o alumínio trocável e a matéria orgânica são os principais contribuidores para altos valores de R^2 no sistema convencional, como também foi verificado no presente estudo no sistema plantio direto. Esse comportamento pode ser parcialmente explicado pelo uso de fatores ligados somente à parte química do solo e não avaliados os que representam as partes física e biológica do solo. Pelo pequeno incremento nos valores de R^2 incluindo dois ou três fatores, ou o conjunto de fatores, não se justifica utilizar uma equação para a tomada de decisão da aplicação calcário no sistema plantio direto. É mais importante, então, a avaliação das melhores relações simples entre os indicadores de acidez e o rendimento de grãos, tornando a tomada de decisão mais prática com o valor de referência obtido diretamente na análise de solo. Por isso, os

Tabela 2. Valores dos coeficientes de determinação (R^2) das regressões múltiplas entre o rendimento relativo de grãos e os indicadores de acidez e de fertilidade do solo, em áreas de lavoura, sob sistema plantio direto, no Planalto Médio do RS.

Regressão múltipla	Indicadores de solo	Camada de solo	Coeficientes de determinação (R^2)	
			Contribuição individual	Valor total
Linear	Al/Ca+Mg	0 – 10 cm	0,52	0,52
	Alumínio trocável	0 – 10 cm	0,01	0,53
	Alumínio trocável	0 – 20 cm	0,53	0,53
	Al/Ca+Mg	0 – 20 cm	0,01	0,54
	Saturação por bases	0 – 20 cm	0,01	0,55
Quadrática	Saturação por alumínio	0 – 10 cm	0,51	0,51
	Matéria orgânica	0 – 10 cm	0,04	0,55
	Alumínio trocável	0 – 20 cm	0,57	0,57
	Matéria orgânica	0 – 20 cm	0,02	0,59
	Saturação por alumínio	0 – 20 cm	0,02	0,61

indicadores de acidez do solo que apresentaram os maiores coeficientes de determinação nas relações entre esses e o rendimento de grãos isoladamente mostraram ser a melhor alternativa para a tomada de decisão para a calagem no sistema plantio direto.

5. CONCLUSÕES

1. Os valores dos coeficientes de determinação das regressões entre o rendimento relativo de grãos e os indicadores de acidez e de fertilidade do solo encontrados não são tão elevados como os obtidos em condições experimentais, esses são considerados bons para avaliação de variabilidade e de áreas de lavoura, e foram na sua grande maioria muito significativos ($P < 0,01$) e representam a condição de lavoura, sob sistema plantio direto consolidado, para a qual são elaboradas as recomendações de calagem.

2. A acidez do solo foi a maior responsável pela limitação no rendimento de grãos dentre os indicadores de acidez e de fertilidade do solo testados nas áreas de lavoura, no sistema plantio direto consolidado.

3. As melhores relações entre a acidez do solo e seus indicadores foram: entre o pH em água (acidez ativa) e o pH em CaCl_2 e a saturação por bases; entre o alumínio trocável (acidez trocável) e a saturação por alumínio e $\text{Al}/\text{Ca}+\text{Mg}$; entre $\text{H}+\text{Al}$ (acidez potencial) e a saturação por bases e o pH em CaCl_2 . O pH em água representou melhor a acidez trocável do solo que o pH em CaCl_2 .

4. Os coeficientes de determinação das regressões simples entre o alumínio trocável, a saturação por alumínio e $\text{Al}/\text{Ca}+\text{Mg}$ e o rendimento relativo de grãos foram superiores aos obtidos nas relações desse com a saturação por bases e com o pH em água, sendo esses os indicadores de tomada de decisão adotados pela Comissão de Química de Fertilidade do Solo a partir de 2000.

5. De acordo com as regressões simples entre o rendimento e grãos e os indicadores de acidez do solo, o nível de referência dos indicadores de tomada de decisão para o pH em água é em torno de 5,5, validando as recomendações da Comissão de Química e Fertilidade do Solo do RS/SC a partir de 2000, e para a saturação por bases é em torno de 65 % para a recomendação de calcário no sistema plantio direto consolidado.

6. Com base nas relações entre o rendimento relativo de grãos com os indicadores de acidez do solo os valores de referência de $0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de alumínio trocável ou 5 % de saturação por alumínio podem ser utilizados, na camada de 0-10 ou 0-20 cm, como critérios adicionais ao pH em água de 5,5 e/ou saturação por bases de 65 %, para a tomada de decisão para a calagem no sistema plantio direto.

7. O uso da combinação de um grupo de indicadores de acidez e de fertilidade do solo, não contribuiu para a melhoria do processo de tomada de decisão para a calagem no sistema plantio direto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, A.S. **Mecanismos de correção da acidez do solo no sistema plantio direto com aplicação de calcário na superfície.** 2002. 107f. Tese (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, 2002.

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

ANGHINONI, I.; SALET, R. L. Reaplicação de calcário no sistema plantio direto consolidado. In: KAMINSKI, J. **Uso de corretivos de acidez do solo no sistema plantio direto.** Pelotas: SBCS/Núcleo Regional Sul, 2000. p.41-59.

BAYER, C. **Características químicas do solo, nutrição e rendimento do milho afetados por métodos de preparo do solo e sistemas de culturas.** 1992. 172f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.

BOHNEN, H.; MEURER, E.J; BISSANI, C.A. Solos ácidos e solos afetados por sais. In: MEURER, E.J. (Ed) **Fundamentos de química do solo.** Porto Alegre: UFRGS, 2000. p.109-125.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento de reconhecimento de solos do Estado do Rio Grande do Sul.** Convênio MA/DPP-SA/DRNR. Recife, 1973. 431p. (Boletim Técnico, 30)

CAIRES, E. F. et al. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivos sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, V. 22, n.1, p.27-34, 1998.

CIOTTA, N.M. et al. Componentes da acidez da fase sólida de uma Latossolo Vermelho após cinco anos da aplicação superficial de calcário em plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 25., 2000 (Fertbio 2000), Santa Maria, RS. **Resumos...** Santa Maria: SBCS, 2000. (CD-ROM).

CIOTTA, M.N et al. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.4, p.1055-1064, 2002.

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

COMISSÃO DE PESQUISA DE CEVADA. **Indicações técnicas para produção de cevada cervejeira: Safras 2001 e 2002**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 2001. 80p.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Ata da Reunião Grupo de Trabalho para as Recomendações de Adubação e de Calagem no Sistema Plantio Direto**. Passo Fundo: SBCS/Núcleo Regional Sul; EMBRAPA-CNPT, 2000. 5p.

COREY, R.B. Factors affecting the availability of nutrients to plants. In: WALSH, L.M.; BEATON, J.D., (ed.) **Soil testing and plant analysis**. Madison, American Society of Agronomy, 1973. p.23-33.

ECKERT, D.J. Soil test interpretations: basic cation saturation ratios and sufficiency levels. In: BROWN, J.R. (ed.) **Soil testing: sampling, correlation, calibration, and interpretation**. Madison, American Society of Agronomy, 1987. p. 53-64

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA – SNLCS, 1997. 247p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa – Produção de Informação, 1999. 412p.

ESCOSTEGUY, P.A.; BISSANI, C.A. Estimativa de H + Al pelo pH SMP em solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, V.23, n.1, p.175-179, 1999.

FIORIN, J.E. et al. Fertilidade do solo. In: SILVA, M.T.B. **A soja em rotação de culturas no sistema plantio direto**. Cruz Alta: FUNDACEP FECOTRIGO, 1998. p.35-96.

FRANCHINI, J.C. et al. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.12, p.2267-2276, 1999.

IBGE. **Censo Agropecuário de 1996 para o Rio Grande do Sul**. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br>>. Acesso em 20 de out. de 2002.

KAMISNKI, J. **Fatores de acidez e necessidade de calcário em solos do Rio Grande do Sul**. 1974. 96p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1974.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S. A acidez do solo e a nutrição mineral de plantas. In: KAMINSKI, J. **Uso de corretivos de acidez do solo no sistema plantio direto**. Pelotas: SBCS/Núcleo Regional Sul, 2000. p.21-39.

KAMINSKI, J. et al. Proposta de nova equação para determinação do valor de H+Al pelo uso do índice SMP em solos do RS e de SC. In: REUNIÃO ANUAL DA REDE OFICIAL DE LABORATÓRIOS DE ANÁLISE DE SOLO E DE TECIDO VEGETAL DOS ESTADOS DO RIO GRANDE DO SUL E DE SANTA CATARINA, 33., 2001, Frederico Westphalen. **Anais...** Frederico Westphalen: SBCS/Núcleo Regional Sul - ROLAS, 2001. p.21-26.

KAMINSKI, J. et al. Estimativa da acidez potencial em solos e sua implicação no cálculo da necessidade de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, n.4, p.1107-1113, 2002.

MIELNICZUK, J. Economicidade da calagem. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO: ACIDEZ E CALAGEM NO BRASIL, 15., 1983, Campinas. **Anais...** Campinas: SBCS, 1983, p.63-77.

MIYAZAWA, M; PAVAN, M.A.; CALEGARI, A.; Efeito do material vegetal na acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, n.3, p.411-416, 1993.

MIYAZAWA, M; PAVAN, M.A.; FRANCHINI, J.C. Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais. **Informações Agrônomicas POTAFOS**, Piracicaba, n.92, p.1-8, 2000 (Encarte Técnico).

PÖTTKER, D.; BEN, J. R. Calagem para uma rotação de culturas no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.4, p.675-684, 1998.

PÖTTKER, D. Calagem em solos sob plantio direto e em campos nativos do Rio Grande do Sul. In: NUERNBERG, N.J. **Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto**. Lages: SBCS/Núcleo Regional Sul, 1998. p.77-92.

PÖTTKER, D. Correção da acidez em lavouras sob plantio direto e campo nativo. In: KAMINSKI, J. **Uso de corretivos de acidez do solo no sistema plantio direto**. Pelotas: SBCS/Núcleo Regional Sul, 2000. p.77-93.

QUAGGIO, J.A. Reação do solo e seu controle In: DECHEN, A.R.; CARMELLO, Q.A.C. (Eds.) **Simpósio avançado de química e fertilidade do solo**. Campinas: Fundação Cargil, 1986. p.9-42.

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

RHEINHEIMER, D.S. et al. **Acidez do solo e consumo potencial de calcário no estado do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Depto de Solos da UFSM, 2000. 32p. (Boletim Técnico, 1).

RHEINHEIMER, D.S. et al. **Situação da fertilidade dos solos no estado do Rio Grande do Sul**. Santa Maria: Depto de Solos da UFSM, 2001. 41p. (Boletim Técnico, 2).

REUNIÃO DE PESQUISA DE SOJA DA REGIÃO SUL, 29., 2001 Porto Alegre. **Indicações técnicas para a cultura da soja no Rio Grande do Sul e em Santa Catarina 2001/2002**. Porto Alegre: FEPAGRO, 2001. 138p.

REUNIÃO ANUAL DA REDE OFICIAL DE LABORATÓRIOS DE ANÁLISE DE SOLO E DE TECIDO VEGETAL DOS ESTADOS DO RIO GRANDE DO SUL E DE SANTA CATARINA, ROLAS, 33., 2001, Frederico Westphalen. **Ata...** Frederico Westphalen: SBCS/Núcleo Regional Sul - ROLAS, 2001. 50p.

RUEDELL, J. **Plantio direto na região de Cruz Alta**. Cruz Alta: FUNDACEP/FECOTRIGO, 1995. 134P.

SALINAS, J.G; SANCHEZ, P.A. Soil-plant relationships affecting varietal and species differences in tolerance to low available soil phosphorus. **Ciência e Cultura**, São Paulo, V.28,n.2, 1976. p.156-168.

SAS INSTITUTE. Stastical Analysis System Institute – SAS/STAT Procedure guide for personal computers. Version 6.11, SAS Inst. Cary, Nc. 1991. 1 Disquete 3,5”

SALET, R. L. **Dinâmica de íons na solução de um solo submetido ao sistema plantio direto**. 1994. 110p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SALET, R. L. **Toxidez de alumínio no sistema plantio direto**. 1998. 117p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

SALET, R. L.; ANGHINONI, I.; KOCHHANN R.A. Atividade do alumínio na solução do solo do sistema plantio direto. **Revista Científica Unicruz**, Cruz Alta, v.1, n.1, p.9-13, 1999.

SIQUEIRA, O J. F. **Resposta do trevo vermelho (Trifolium pratense) à calagem e adubação fosfatada e suas relações com a disponibilidade de fósforo em solos ácidos no Rio Grande do Sul**. 1972. 137 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1972.

STRECK, E.V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: EMATER/RS; UFRGS, 2002. 107p.

SUMNER, M,E. Field experimentation: changing to meet current and future needs. In: BROWN, J.R. (ed.) **Soil testing: sampling, correlation, calibration, and interpretation**. Madison, American Society of Agronomy, 1987. p. 119-131

VIDOR, C. **Toxidez de alumínio e manganês e suas relações com a nodulação, rendimento e absorção de manganês na soja.** 1972. 71 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1972.

VOLKWEISS, S.J. Química da acidez dos solos. In: SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO, 2., 1989, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 1989. p.7-38.

TEDESCO, M.J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais.** 2. ed. Porto Alegre: Depto de Solos da UFRGS, 1995. 174p. (Boletim técnico, 5).

TISDALE, S.L. et al. Soil acidity an basicity. In: TISDALE, S.L. et al. **Soil Fertility and Fertilizers.** 5.ed. New York: Macmillan Publishing Company, 1993. p.364-404.

WIETHÖLTER, S. **Calagem no Brasil.** Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2000, 104p.

WIETHÖLTER, S. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto: experiência nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 24., Santa Maria. **Resumos...** Santa Maria: SBSC-UFSM, 2000. 35p. CD-ROM.

WIETHÖLTER, S. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: CURSO DE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 5., 2002, Guarapuava. **Resumos...** Passo Fundo: Aldeia Norte Editora, 2002a. p.14-53.

WIETHÖLTER, S. Revisão das recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 4., 2002. Porto Alegre. **Resumos...** SBSC/ Núcleo Regional Sul - UFRGS, 2002b. 23p. CD-ROM.

7. APÊNDICES

APÊNDICE 1. Médias das análises dos pontos de coleta do rendimento de grãos e das amostras de solo na camada de 0 a 10cm do solo, em cada área de lavoura sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS, utilizadas nesse trabalho.

Áreas de lavoura ¹	Rendimento de grãos		Teor de argila (%)	pH água	P ² (Mehlich I)	K ²	MO %	Cátions trocáveis			Al+H ¹	CTC	V ²	m ³
	médio	máximo						Al ³	Ca ³	Mg ³				
Mg ha ⁻¹mg dm ⁻³cmol _c dm ⁻³%.....		
1 – Soja	3,9	6,0	40	5,0	12,7	124	2,0	0,6	3,0	2,4	5,2	10,9	52	11,0
2 – Soja	3,6	4,2	35	5,3	6,6	104	2,0	0,4	3,5	2,5	4,4	10,7	59	6,3
3 – Soja	2,2	3,4	42	4,7	12,6	73	1,7	0,8	2,8	1,9	6,7	11,6	43	15,9
4 – Soja	3,5	4,4	>56	5,5	21,3	158	2,7	0,1	8,2	4,5	5,6	18,8	69	0,9
5 – Soja	3,4	4,2	>56	5,8	14,6	128	2,7	0,1	7,2	4,8	4,1	16,4	74	0,6
6 – Soja	4,0	4,8	>56	5,7	11,4	154	2,6	0,2	8,0	5,2	4,5	18,2	74	1,2
7- Cevada	2,2	3,0	>56	6,2	14,3	158	3,2	0,1	10,6	5,2	3,1	19,5	83	0,6

1. Equação Kaminski et al., 2001

2. Saturação por bases.

3. Saturação por alumínio.

APÊNDICE 2. Valores dos coeficientes das equações (a, b, x₀), das regressões simples entre os tipos de acidez do solo e seus indicadores em lavouras sob sistema plantio direto, no Planalto Médio do RS.

Tipos de acidez do solo	Indicadores de acidez do solo	Camada de solo	Coeficientes da equação ¹				
			a	b	X ₀	Y ₀	
pH em água (acidez ativa)	Alumínio trocável	0 – 10 cm	2,8230	- 0,3241	4,4138	-	
		0 – 20 cm	5,8469	-0,3989	4,0264	-	
	H + Al	0 – 10 cm	3,6568	-1,3936	20,8554	-	
		0 – 20 cm	22,8157	-1,3870	3,6030	-	
	Saturação por alumínio	0 – 10 cm	47,1927	-0,2262	4,5315	-	
		0 – 20 cm	96,8575	-0,2967	4,2254	-	
	Saturação por bases ²	0 – 10 cm	129,4236	-9,2750	-	-360,0719	
		0 – 20 cm	136,7702	-9,9540	-	-380,7785	
	Al/Ca+Mg	0 – 10 cm	0,6698	-0,1415	4,5786	-	
		0 – 20 cm	1,3032	-0,2105	4,3712	-	
	pH em CaCl ₂ ³	0 – 10 cm	1,0487	-	-	-0,4941	
		0 – 20 cm	1,0346	-	-	-0,4278	
	Alumínio trocável (acidez trocável)	H + Al	0 – 10 cm	12,2325	1,0322	0,7699	-
			0 – 20 cm	10,5304	0,7967	0,3641	-
Saturação por alumínio ²		0 – 10 cm	16,1908	2,7784	-	-0,6241	
		0 – 20 cm	15,4153	3,0506	-	-0,7092	
Saturação por bases ²		0 – 10 cm	1017,5316	-1,2868	-3,1841	-	
		0 – 20 cm	814,3301	-1,3948	-3,1353	-	
Al/Ca+Mg ²		0 – 10 cm	0,0980	0,1534	-	-0,0010	
		0 – 20 cm	0,1224	0,1318	-	-0,0046	
pH em CaCl ₂ ³		0 – 10 cm	3,2365	-0,1439	-0,0126	4,3703	
		0 – 20 cm	20,3554	-0,4358	-1,0987	4,2001	
H + Al (acidez potencial)	Saturação por alumínio	0 – 10 cm	61,3119	1,6334	9,4132	-	
		0 – 20 cm	67,4959	1,8077	9,9125	-	
	Saturação por bases ⁴	0 – 10 cm	-7,9563	-	-	100,1248	
		0 – 20 cm	-7,6417	-	-	98,2003	
	Al/Ca+Mg	0 – 10 cm	1,5521	1,6115	10,5381	-	
		0 – 20 cm	1,4371	1,6715	10,4744	-	
	pH em CaCl ₂	0 – 10 cm	27,4958	-14,5270	-16,4934	-	
		0 – 20 cm	24,5597	-16,9253	-16,9253	-	

1. Sigmóide 3 parâmetros ($Y = a / 1 + e^{-((x-x_0)/b)}$).

2. Quadrática ($Y = Y_0 + ax + bx^2$).

3. Sigmóide 4 parâmetros ($Y = Y_0 + a / 1 + e^{-((x-x_0)/b)}$).

4. Linear ($Y = Y_0 + ax$).

APÊNDICE 3. Valores dos coeficientes de determinação (R^2) e nível de significância das regressões simples entre os tipos de acidez do solo e seus indicadores em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

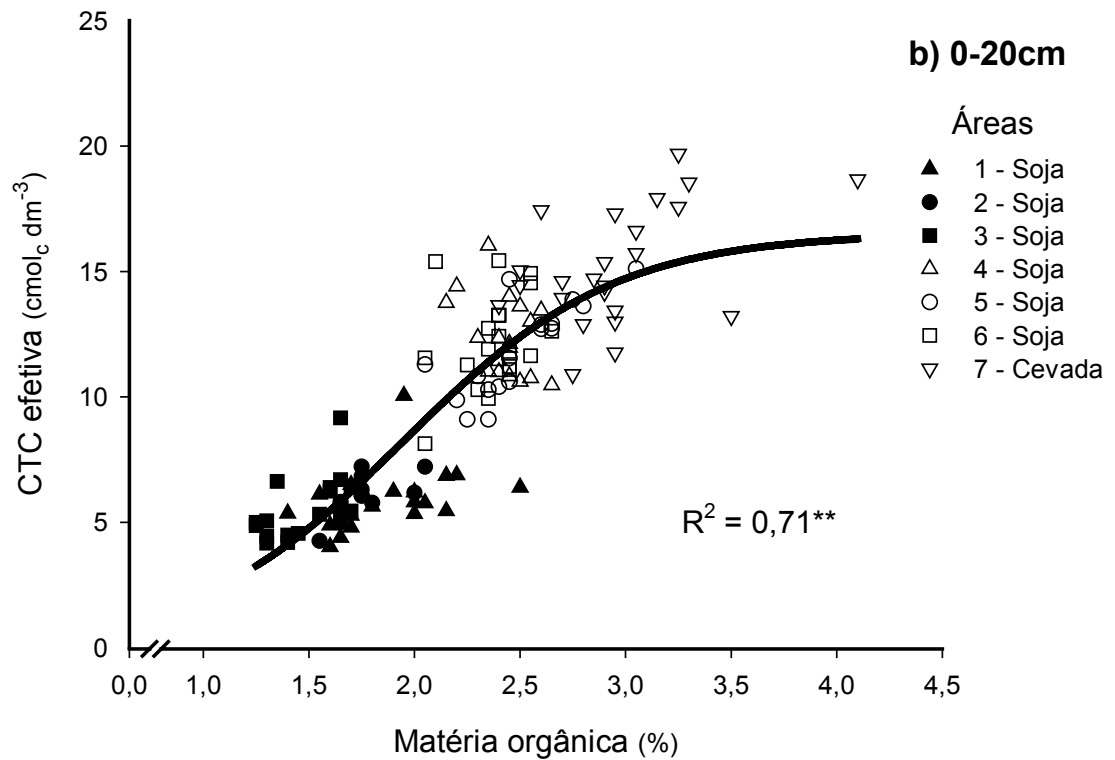
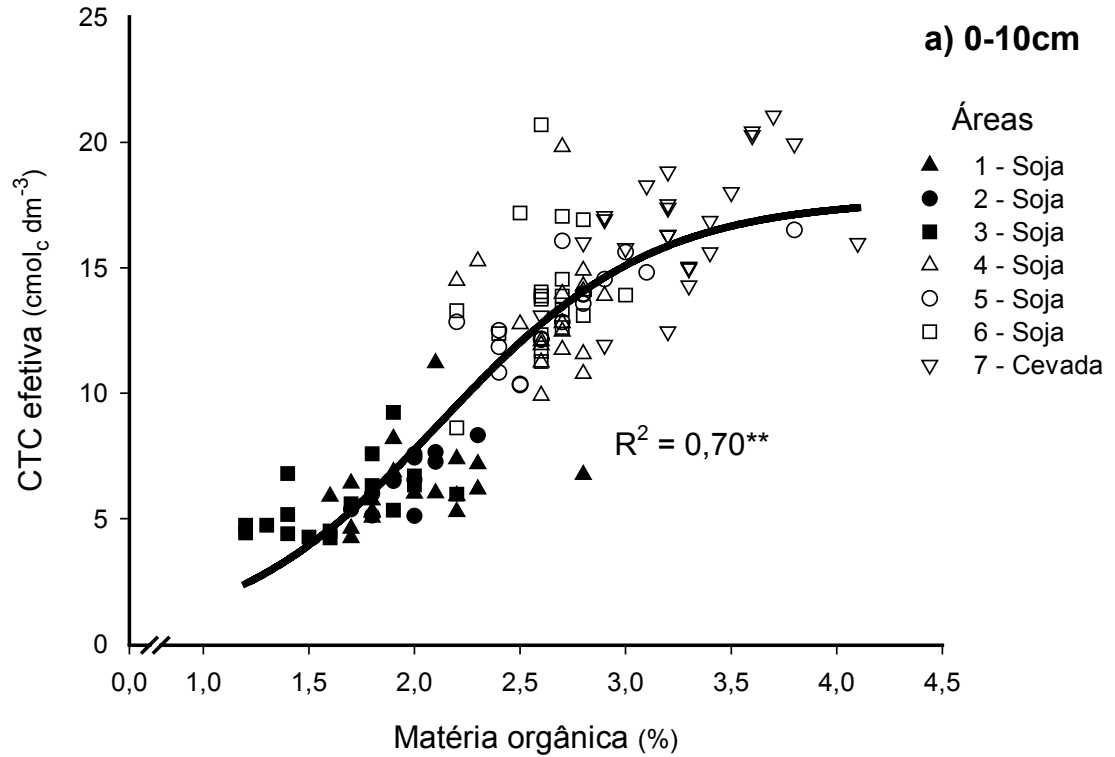
Tipos de acidez do solo	Indicadores de acidez do solo	Camada de solo	
		0-10 cm	0-20 cm
pH em água (acidez ativa)	Alumínio trocável	0,81**	0,89**
	H + Al	0,68**	0,64**
	Saturação por alumínio	0,82**	0,90**
	Saturação por bases	0,92**	0,92**
	Al/Ca+Mg	0,75**	0,86**
	pH em CaCl ₂	0,97**	0,96**
Alumínio trocável (acidez trocável)	H + Al	0,51**	0,61**
	Saturação por alumínio	0,97**	0,96**
	Saturação por bases	0,80**	0,86**
	Al/Ca+Mg	0,96**	0,95**
H + Al (acidez potencial)	pH em CaCl ₂	0,78**	0,78**
	Saturação por alumínio	0,56**	0,56**
	Saturação por bases	0,77**	0,72**
	Al/Ca+Mg	0,61**	0,55**
	pH em CaCl ₂	0,70**	0,64**

ns = não significativo ($P > 0,05$)

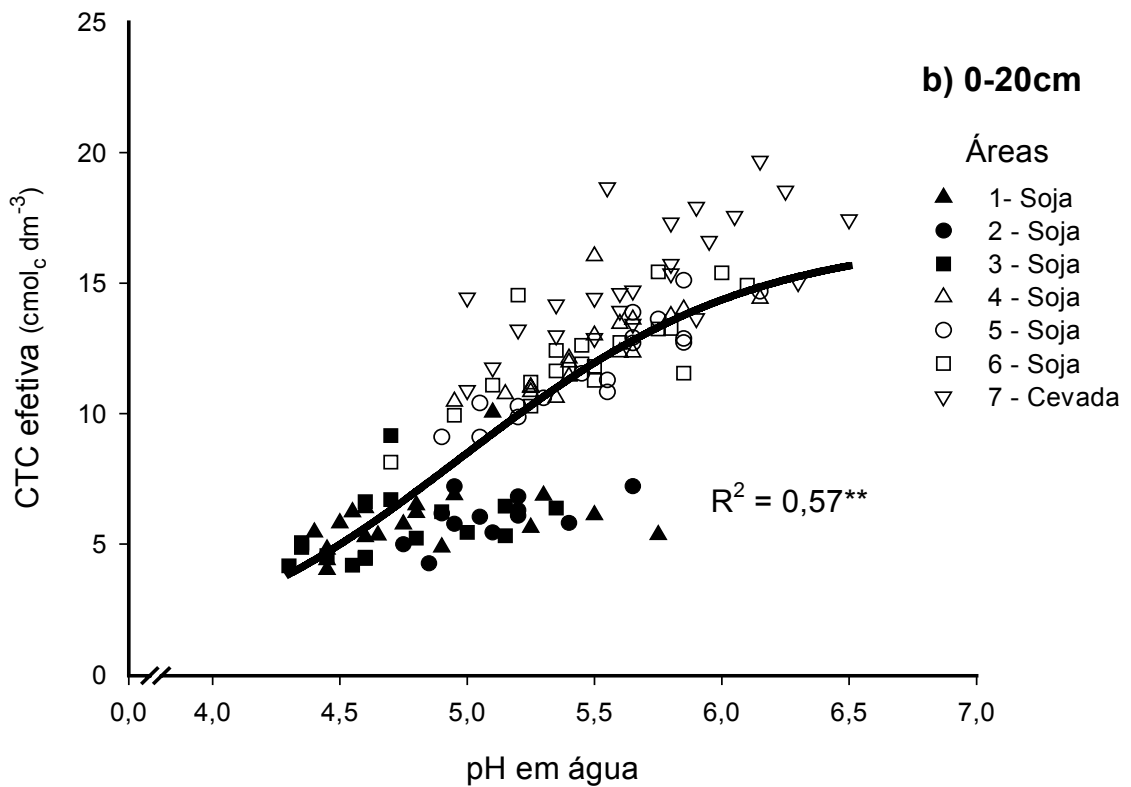
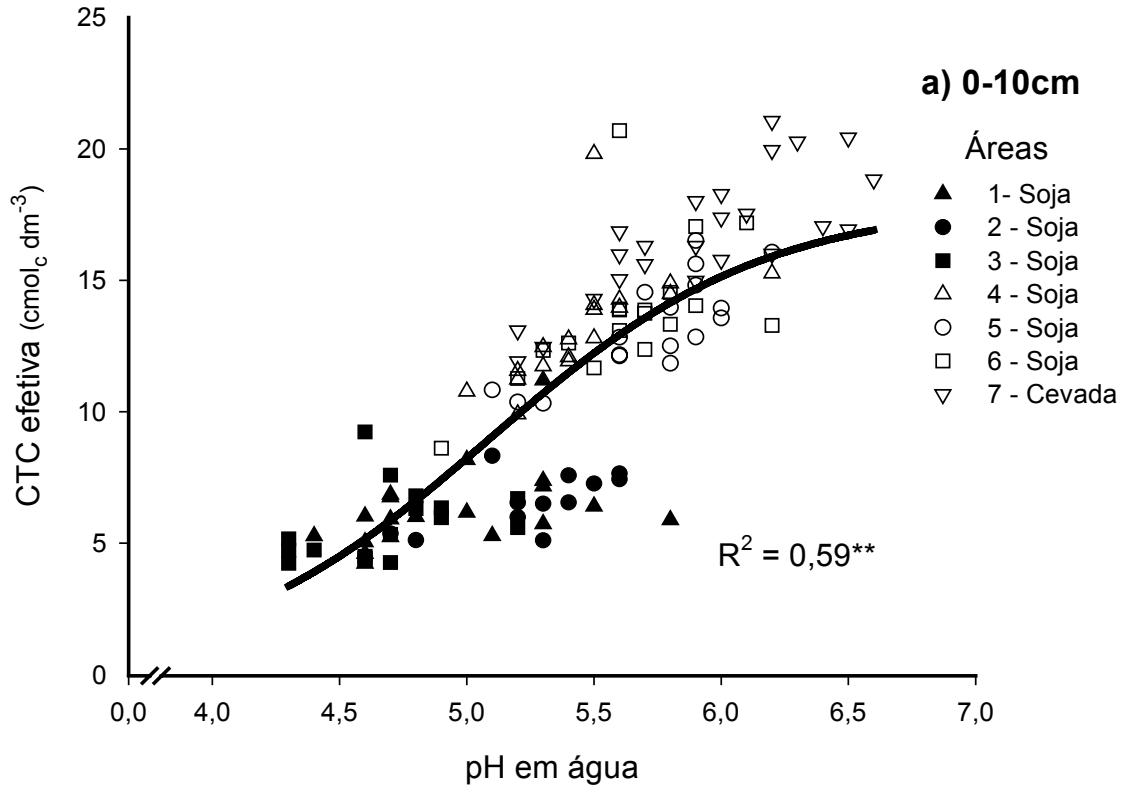
* = significativo ($P < 0,05$)

** = muito significativo ($P < 0,01$)

APÊNDICE 4. Relação entre o teor de matéria orgânica e a CTC efetiva nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.



APÊNDICE 5. Relação entre o pH em água e a CTC efetiva nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.



APÊNDICE 6. Valores dos coeficientes de determinação (R^2) e nível de significância das regressões simples entre os tipos de acidez do solo e os indicadores de fertilidade em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

Tipos de acidez do solo	Indicadores de fertilidade do solo	Camada de solo	
		0-10 cm	0-20 cm
pH em água (acidez ativa)	Matéria orgânica	0,57**	0,46**
	Fósforo disponível	0,11*	0,14**
Alumínio trocável (acidez trocável)	Matéria orgânica	0,43**	0,36**
	Fósforo disponível	0,06*	0,15**
H + Al (acidez potencial)	Matéria orgânica	0,25**	0,15*
	Fósforo disponível	0,03ns	0,07*

ns = não significativo ($P > 0,05$).

* = significativo ($P < 0,05$).

** = muito significativo ($P < 0,01$).

APÊNDICE 7. Valores dos coeficientes das equações (a, b, x_0) das regressões simples entre os tipos de acidez do solo e os indicadores de fertilidade do solo em lavouras, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

Tipos de acidez do solo	Indicadores de fertilidade do solo	Camada de solo	Coeficientes da equação ¹			
			a	b	X_0	Y_0
pH em água (acidez ativa)	Matéria orgânica ²	0 – 10 cm	0,8014	-	-	-2,0116
		0 – 20 cm	0,6853	-	-	-1,5160
	Fósforo disponível	0 – 10 cm ²	3,1482	-	-	-8,8580
		0 – 20 cm ³	3,7915	-0,0321	-	-9,3810
Alumínio trocável (acidez trocável)	Matéria orgânica ⁴	0 – 10 cm	3,3969	-0,3374	-0,1758	1,6305
		0 – 20 cm	2,6594	-0,5293	-0,1619	1,5001
	Fósforo disponível	0 – 10 cm ³	-3,6298	-0,1996	-	15,0765
		0 – 20 cm	72,3216	-1,9093	-3,1708	-
H + Al (acidez potencial)	Matéria orgânica	0 – 10 cm ²	-0,1529	-	-	2,9569
		0 – 20 cm ³	-0,0890	-0,0020	-	2,7950
	Fósforo disponível	0 – 10 cm	14,2540	-0,9780	10,1605	-
		0 – 20 cm	10,3867	-1,1387	9,7460	-

1. Sigmóide 3 parâmetros ($Y = a / 1 + e^{-((x-x_0)/b)}$).

2. Linear ($Y = Y_0 + ax$).

3. Quadrática ($Y = Y_0 + ax + bx^2$).

3. Sigmóide 4 parâmetros ($Y = Y_0 + a / 1 + e^{-((x-x_0)/b)}$).

APÊNDICE 8. Valores dos coeficientes de determinação (R^2), nível de significância das regressões simples entre o rendimento relativo de grãos e alguns indicadores de acidez do solo por área de lavoura, sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS, utilizadas nesse trabalho.

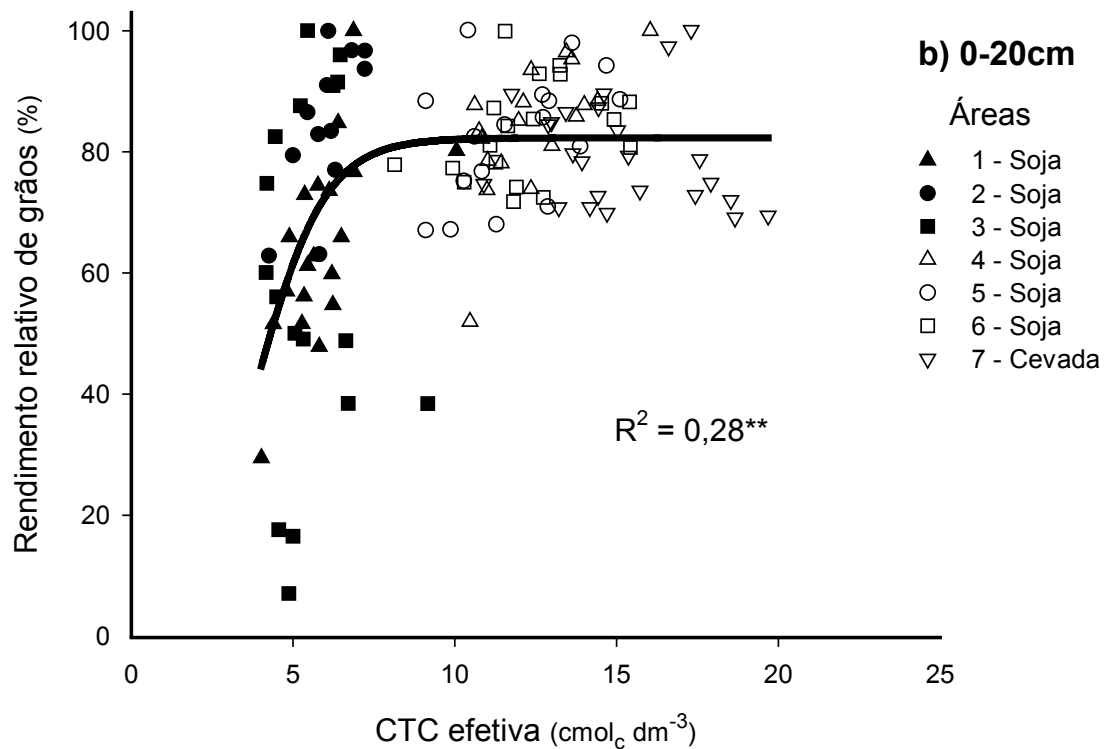
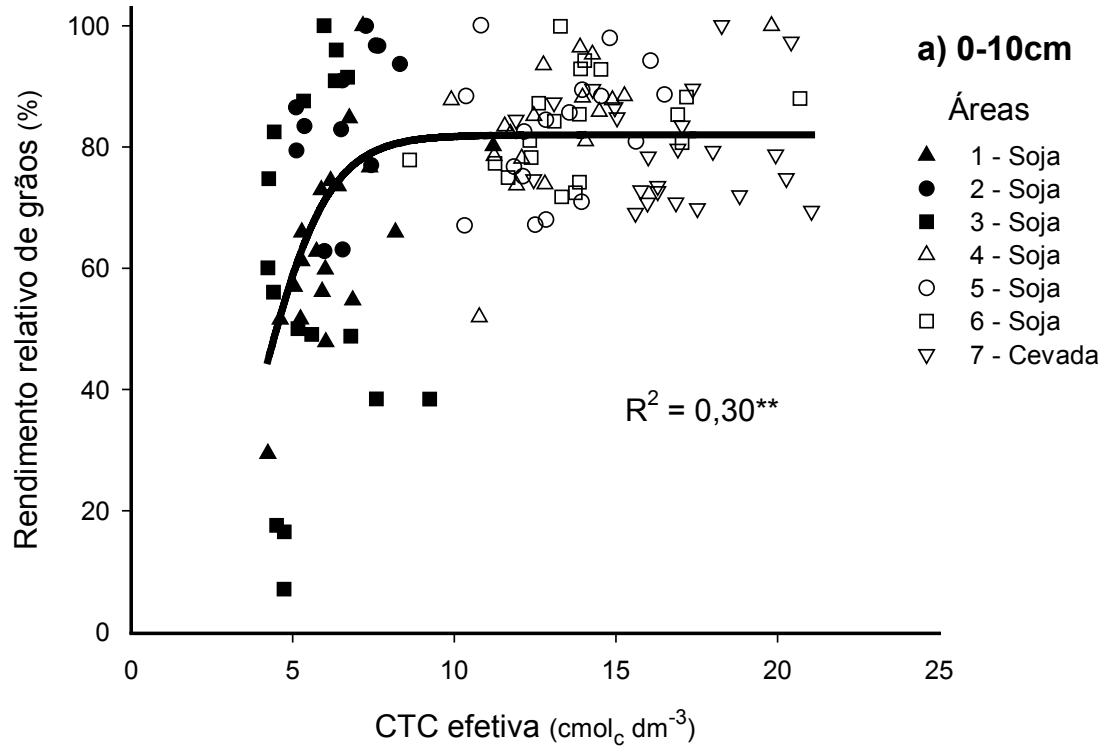
Áreas de lavoura	Camada de solo	Indicadores de acidez do solo			
		pH água	Alumínio trocável	Saturação por alumínio	Saturação por bases
Área 1 - Soja	0-10 cm	0,40*	0,51**	0,57**	0,49**
	0-20 cm	0,45**	0,53**	0,58**	0,55**
Área 2 - Soja	0-10 cm	0,03ns	0,31ns	0,31ns	0,12ns
	0-20 cm	0,11ns	0,32ns	0,36ns	0,34ns
Área 3 - Soja	0-10 cm	0,34ns	0,68**	0,53**	0,56**
	0-20 cm	0,45*	0,70**	0,59**	0,56**
Área 4 - Soja	0-10 cm	0,56**	0,55**	0,54**	0,42**
	0-20 cm	0,61**	0,65**	0,65**	0,67**
Área 5 - Soja	0-10 cm	0,01ns	0,03ns	0,01ns	0ns
	0-20 cm	0ns	0,03ns	0,17ns	0ns
Área 6 - Soja	0-10 cm	0,18ns	0,09ns	0,03ns	0,18ns
	0-20 cm	0,17ns	0,09ns	0,07ns	0,14ns
Área 7 - Cevada	0-10 cm	0ns	0,01ns	0ns	0,01ns
	0-20 cm	0,03ns	0,01ns	0ns	0,01ns

ns = não significativo ($P > 0,05$)

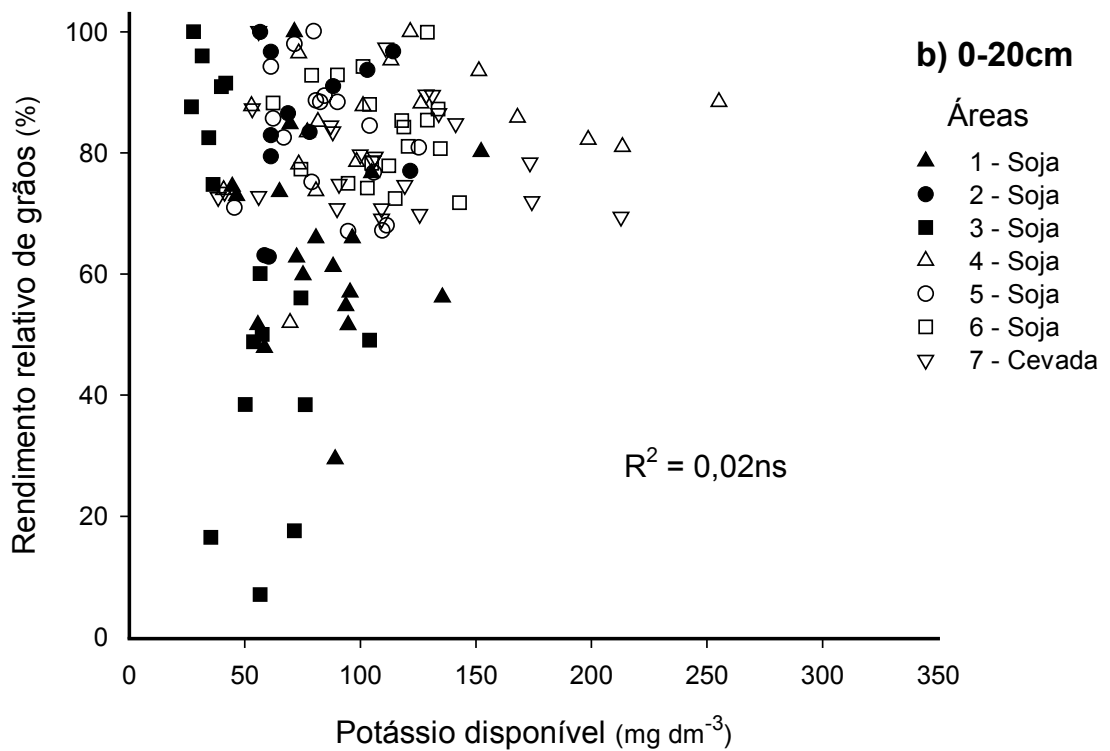
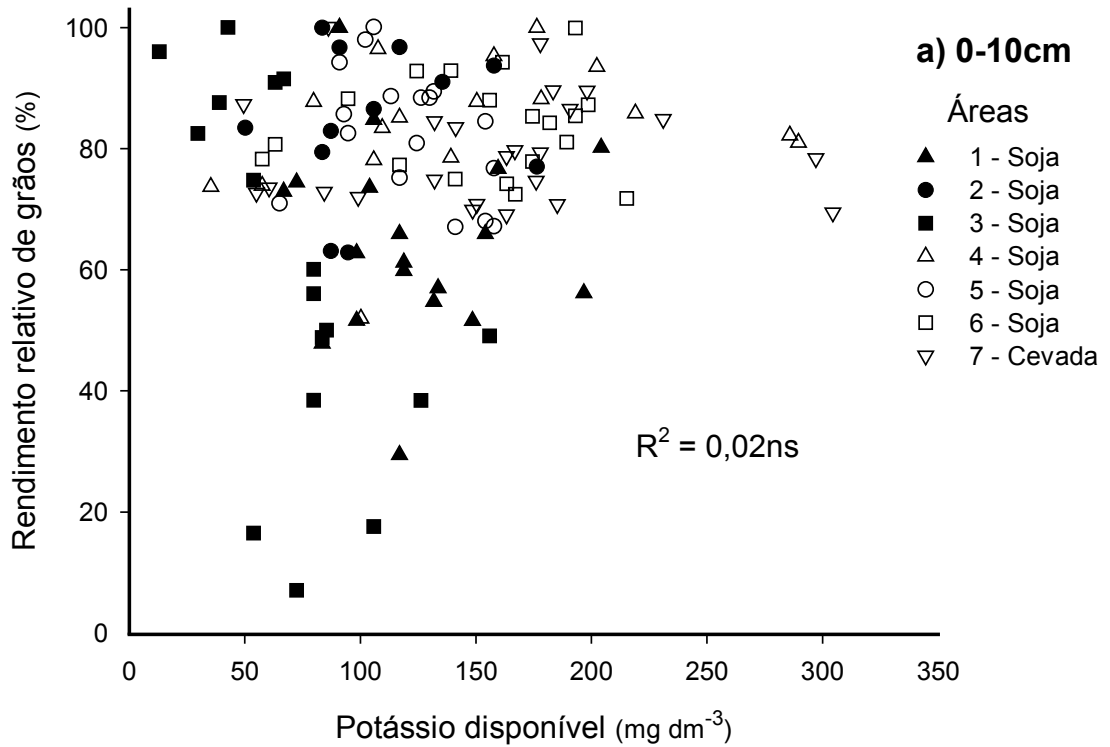
* = significativo ($P < 0,05$)

** = muito significativo ($P < 0,01$)

APÊNDICE 9. Relação entre o rendimento relativo de grãos e a CTC efetiva nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.



APÊNDICE 10. Relação entre o rendimento relativo de grãos e o teor de potássio disponível (Mehlich I) nas camadas de 0-10 cm (a) e 0-20 cm (b) do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.



APÊNDICE 11. Valores dos coeficientes das equações (a, b, x₀) das regressões simples entre o rendimento relativo de grãos e os indicadores de solo e de planta, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

Resposta das plantas	Indicadores		Coeficientes da equação ¹		
			a	b	X ₀
Rendimento relativo de grãos	pH em água	0 – 10 cm	83,2236	0,2366	4,4281
		0 – 20 cm	83,6885	0,2089	4,4097
	Alumínio trocável	0 – 10 cm	93,7912	-0,6033	1,2937
		0 – 20 cm	89,9490	-0,5688	1,5695
	H + Al	0 – 10 cm	83,2419	-1,2041	8,6966
		0 – 20 cm	83,5643	-1,3530	9,6564
	Saturação por alumínio	0 – 10 cm	98,1154	-14,6621	24,9252
		0 – 20 cm	95,3823	-15,1722	30,3495
	Saturação por bases	0 – 10 cm	83,0521	9,9170	29,3243
		0 – 20 cm	83,1716	9,1365	26,7048
	Al/Ca+Mg	0 – 10 cm	152,3715	-0,3982	0,0720
		0 – 20 cm	135,8496	-0,4547	0,2208
	pH em CaCl ₂	0 – 10 cm	83,1212	0,2350	4,1581
		0 – 20 cm	83,8017	0,2214	4,1326
	Matéria orgânica	0 – 10 cm	83,7422	0,3193	1,3376
		0 – 20 cm	81,9943	0,2113	1,2630
	Fósforo disponível	0 – 10 cm	122,1468	66,8216	-21,1812
		0 – 20 cm	85,5330	6,0430	- 4,4370
Indicadores de planta					
	Fósforo		85,7371	0,0474	0,1476
	Potássio		77,2936	0,0784	1,3027
	Cálcio		81,5871	0,0864	0,6414
	Magnésio		81,8465	0,0625	0,3855

1. Equação sigmóide 3 parâmetros ($Y = a / 1 + e^{-((x-x_0)/b)}$).

APÊNDICE 12. Relação entre o rendimento relativo de grãos e alguns indicadores de acidez e de fertilidade do solo nos pontos com teor de alumínio trocável menor que $0,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, na camada de 0-10 cm do solo, em lavouras sob sistema plantio direto, na região do Planalto Médio do RS.

