

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO: ATÉ
ONDE MIGRAM E ATÉ QUANDO PERSISTEM OS
EFEITOS NO PERFIL DO SOLO?**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Renan Gonzatto

Santa Maria, RS, Brasil

2014

APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO: ATÉ ONDE MIGRAM E ATÉ QUANDO PERSISTEM OS EFEITOS NO PERFIL DO SOLO?

Renan Gonzatto

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Químicos e ciclagem de elementos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Dr. Danilo Rheinheimer dos Santos

Santa Maria, RS, Brasil

2014

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

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

**APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO: ATÉ ONDE MIGRAM
ATÉ QUANDO PERSISTEM OS EFEITOS NO PERFIL DO SOLO?**

elaborada por
Renan Gonzatto

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Danilo Rheinheimer dos Santos
(Presidente/Orientador) – CCR – UFSM

Prof. Dr. Diovane Freire Moterle
IFRS–BG

Prof. Dr^a. Maria Alice Santanna dos Santos
CCNE – UFSM

4 de agosto de 2014

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Gonzatto, Renan
APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO: ATÉ ONDE MIGRAM E
ATÉ QUANDO PERSISTEM OS EFEITOS NO PERFIL DO SOLO? /
Renan Gonzatto.-2014.
62 p.; 30cm

Orientador: Danilo Rheinheimer dos Santos
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2014

1. Calagem 2. Acidez do Solo 3. Alumínio tóxico 4.
reacidificação I. Rheinheimer dos Santos, Danilo II.
Título.

Aos meus pais, Vilmar e Ieda

À minha Irmã Luana

À minha namorada Marina

Dedico este trabalho!

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Professor Danilo Rheinheimer dos Santos pela orientação desde a iniciação científica, pela amizade, confiança e pelo exemplo de dedicação à pesquisa e ao ensino superior.

Ao professor João Kaminski pela orientação e co-orientação durante todo período acadêmico, pela oportunidade de aprendizado durante o nosso convívio.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do solo pelos ensinamentos repassados durante o curso de mestrado.

Ao amigo Tales Tiecher que foi sempre prestativo em auxiliar a execução do trabalho em todas as suas etapas.

Aos colegas Marco, Tadeu, Cella, De Conti, Dênis, Mohsin, José Augusto e Elci pela amizade, pelo auxílio nas coletas de solo e análises laboratoriais e pelos momentos de estudo e descontração.

Aos colegas de laboratório pela convivência e pela amizade criada ao longo desses anos. Agradeço-os pelo convívio e conhecimento compartilhado.

Aos bolsistas de iniciação científica do Laboratório de Química e Fertilidade dos Solos, em especial ao Lucas, Marcos, Dani, Roque, Mayara, Frederico e à Melissa (*in memoriam*), pelo auxílio e seriedade na execução dos trabalhos de laboratório.

Ao Alex Giuliani e ao Alexandre Troian pela amizade, disposição e presteza.

Enfim, a todos que estiveram presentes direta ou indiretamente na durante esta caminhada e que contribuíram para a realização deste trabalho serão sempre lembrados.

RESUMO

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

APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE CALCÁRIO: ATÉ ONDE MIGRAM E ATÉ QUANDO PERSISTEM OS EFEITOS NO PERFIL DO SOLO?

AUTOR: RENAN GONZATTO

ORIENTADOR: DR. DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 4 de agosto de 2014.

A acidez do solo é um dos principais fatores limitantes na produção agrícola. A baixa solubilidade do calcário e a limitação espacial de sua dissolução restringem à neutralização da acidez do solo no entorno de onde estão suas partículas. O presente trabalho objetivou monitorar a migração e a persistência dos efeitos do calcário no perfil do solo em função de métodos de aplicação perante o processo de reacidificação em longo prazo. Dois experimentos de campo instalados na área da Universidade Federal de Santa Maria serviram como base de estudo do presente trabalho. O primeiro deles, instalado num Argissolo Vermelho distrófico arênico, no qual foi feita a última mobilização do solo em abril de 1988 com aplicação de calcário para a elevação do pH do solo da camada de 0–20 cm a 6,0 e foi adotado sistema plantio direto (SPD). Em outubro de 1994, constatou-se necessidade de reaplicação de calcário ($3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$). Optou-se, então, pela instalação do experimento, cujos tratamentos consistiram numa testemunha sem calcário; a dose integral em 1994; a metade da dose (1994, 1996 e 1998) e um terço da dose (1994, 1995, 1996, 1997 e 1998), totalizando 0, 3,6, 5,4 e $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, respectivamente. O segundo estudo foi instalado num Argissolo Acinzentado distrófico plúntico sob pastagem natural com elevada acidez potencial. A parcela principal constituiu-se da aplicação de calcário, superficial ou incorporado, enquanto as subparcelas, das doses de calcário (outubro de 1994) que foram de: 0,0; 2,0; 8,5 e $17,0$ (dose recomendada para pH 6,0) Mg ha^{-1} . A dose de 2 Mg ha^{-1} foi reaplicada em 1996, 1998 e 2000, sempre na superfície, totalizando 8 Mg ha^{-1} . Nos dois experimentos, em outubro de 2006 e 2012, aos 144 e 216 meses após sua instalação, numa trincheira por parcela, coletaram-se amostras de solo em camadas de 1 cm até os 10 cm de profundidade, de 2,5 cm até os 25 cm, de 5 cm até os 50 cm e da camada de 50–60 cm, nas quais foram determinados os atributos químicos relacionados a acidez do solo. Os resultados obtidos mostraram que mesmo após 24 anos sem reaplicar calcário, a liberação de Al trocável e o aumento da acidez potencial não foi suficiente para atingir patamares de acidez próximos dos observados para o solo em sua condição natural. A aplicação superficial de calcário promove a formação de uma frente alcalinizante a partir da superfície do solo que avança lentamente às camadas mais profundas do perfil do solo amenizando a acidez do solo até os 60 cm de profundidade. A incorporação do calcário acelera a sua reação no solo e neutralização da acidez ocorre rapidamente na camada em que o solo foi mobilizado. Abaixo da profundidade de incorporação, o restante dos produtos da dissolução do calcário que não reagiram, migram lentamente para camadas mais profundas do perfil do solo similarmente ao que ocorre quando o calcário é aplicado na superfície, sem incorporação. A aplicação de calcário seguida de incorporação previamente à adoção do SPD é a garantia que o solo, especialmente nas camadas subsuperficiais, não apresentará restrições ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas. A acidez do solo proveniente da reacidificação do solo é facilmente neutralizada pela calagem superficial.

Palavras chave: Alumínio tóxico; eficiência da calagem; reacidificação; efeito residual do calcário, sistema plantio direto.

ABSTRACT

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

SURFACE APPLICATION OF LIMESTONE: UP TO WHAT DEPTH AND HOW LONG IT EFFECTS SOIL PROFILE?

AUTHOR: RENAN GONZATTO

ADVISER: DR. DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS

Place and Date of the Defense: Santa Maria, 4th august 2014

Soil acidity is a major limiting factor in crop production. The low solubility of lime is a critical limitation which restricts its dissolution as well as neutralization of soil acidity in the vicinity of its particles. This study aimed to monitor the lime vertical movement and its persistence effects along the soil profile and also to evaluate the influence of lime application methods on the re-acidification process in a long term. Two field experiments were installed in the experimental field area of the Federal University of Santa Maria. The first was installed on a Rhodic Paleudalf soil, and last tillage was carried out on April, 1988 with lime application to increase the 0-20 cm soil layer pH up to 6.0 and thereafter adopted as no-tillage system (NTS). In October 1994, a need for reapplication of lime (3.6 Mg ha^{-1}) was noticed. Therefore, it was decided to install the experiment under following treatments: no lime; a full dose in 1994; a half dose (applied in 1994, 1996 and 1998) and a third dose (applied in 1994, 1995, 1996, 1997 and 1998) in total 0, 3.6, 5.4 and 6.0 Mg ha^{-1} , respectively. The second study was carried out on a Hapludalf under natural pasture with high potential acidity. The main plot consisted of liming, surface or mixed, while the subplots of lime (October 1994) were: 0.0; 2.0; 8.5 and 17.0 (recommended dose to raise pH up to 6.0) Mg ha^{-1} . The dose of 2 Mg ha^{-1} was surface reapplication during years 1996, 1998 and 2000, with a total of 8 Mg ha^{-1} . In both experiments, in October 2006 and 2012 i.e., after 144 and 216 months of experiment installation, a trench for each plot was developed and soil sample were collected at each 1cm from 1 to 10 cm depth, at each 2.5 cm from 10 to 25 cm depth, at each 5 cm from 25 to 50 cm depth and last from 50 to 60 cm soil layer. In each soil layer, certain chemical attributes were monitored which were associated to the soil acidity. The results showed that even after 24 years of without reapplication of limestone, the release of exchangeable Al and increased potential soil acidity was not enough to reach the levels of soil acidity near to those values observed for the soil (control) in its natural condition. The Liming promotes the formation of an alkalizing medium on the soil surface that slowly advanced to the deeper layers of the soil profile thus softening the acidity of the soil up to 60 cm depth. Lime incorporation accelerated these reaction and thus neutralizing soil acidity rapidly in the layer where the soil was mobilized. The deeper layers where incorporation of lime was not conducted, the remaining products of the dissolution of limestone slowly migrate to the deeper layers of the soil profile in a similar fashion to what occurs when limestone is applied to the soil surface without incorporation. Liming followed by mixing prior to the adoption of the NTS ensures that the soil, especially in subsoil do not present constraints to the development of the root system of plants. So it is concluded that the soil acidity as a result of re-acidification process can be easily neutralized by liming.

Keywords: aluminum toxicity, liming efficiency, re-acidification, residual effect of lime, no-tillage system

LISTA DE FIGURAS

ESTUDO I

- Figura 1.** Valores de saturação por alumínio e acidez potencial a pH 7,0 no solo de diferentes camadas (solo nativo e 212 e 293 meses após a aplicação de 3,1 Mg ha⁻¹ de calcário incorporado a 20 cm..... 21
- Figura 2.** Valores de saturação por alumínio, pH em água, cálcio e magnésio trocáveis no solo de diferentes camadas sob sistema plantio direto, após 216 meses da instalação do experimento..... 25
- Figura 3.** Valores de pH em água e alumínio trocável no solo de diferentes camadas manejado sob o sistema plantio direto, após 144 e 216 meses da aplicação de calcário..... 27
- Figura 4.** Valores de cálcio e magnésio trocáveis no solo de diferentes camadas manejado sob o sistema plantio direto, após 144 e 216 meses da aplicação de calcário..... 28
- Figura 5.** Saturação por alumínio e saturação por bases no solo de diferentes camadas manejado sob o sistema plantio direto, após 144 e 216 meses da aplicação de calcário..... 29

ESTUDO II

- Figura 1.** Valores de saturação por alumínio, saturação por bases do solo de diferentes camadas após 216 meses nos sistemas com e sem incorporação sem adição de calcário..... 44
- Figura 2.** Valores de saturação por alumínio, saturação por bases, pH em água e cálcio trocável no solo de diferentes camadas após 216 meses da aplicação de 17 Mg ha⁻¹ de calcário superficial e incorporado..... 46
- Figura 3.** Valores de saturação por alumínio, saturação por bases, pH em água e cálcio trocável no solo de diferentes camadas após 216 meses da aplicação de 8,5 Mg ha⁻¹ de calcário superficial e incorporado..... 48
- Figura 4.** Valores de saturação por alumínio, saturação por bases e pH em água no solo após 216 meses da aplicação de calcário superficial e incorporado..... 51
- Figura 5.** Valores de cálcio e magnésio trocáveis no solo após 216 meses da aplicação de calcário superficial e incorporado..... 52
- Figura 6.** Valores de saturação por alumínio e acidez potencial a pH 7,0 no solo de diferentes camadas após 144 e 216 meses após a aplicação de 17 Mg ha⁻¹ de calcário superficial e incorporado..... 54

LISTA DE TABELAS

ESTUDO I

Tabela 1. Valores de pH em água, teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al) trocáveis do solo; saturação por alumínio (m) e por bases (V) no solo de diferentes camadas do tratamento testemunha amostrado aos 221 e 293 meses do início do experimento.....	22
Tabela 2. Profundidade do solo modificada pela aplicação de calcário aplicado na superfície, avaliada pela análise estatística convencional ($p < 0,05$); pelas faixas de disponibilidade da CQFS-RS/SC (2004) e considerando recomendações de Almeida et al. (1999).....	31

ESTUDO II

Tabela 1. Faixas de interpretação preconizadas pela CQFS-RS/SC (2004) como critério para a tomada de decisão de reaplicação de calcário em sistema plantio direto.	56
Tabela 2. Profundidade do solo modificada pela aplicação de calcário aplicado na superfície, avaliada pela análise estatística convencional ($p < 0,05$); pelas faixas de disponibilidade da CQFS-RS/SC (2004) e considerando recomendações de Almeida et al. (1999).....	58

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo geral.....	14
2.2 Objetivos específicos	14
3 ESTUDO I : MIGRAÇÃO E PERSISTÊNCIA DOS EFEITOS DA REAPLICAÇÃO DE CALCÁRIO EM SOLO ARENOSO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO	15
3.1 Introdução	16
3.2 Material e métodos.....	18
3.3 Resultados e Discussão	20
3.3.1 Análise temporal da testemunha - reacidificação.....	20
3.3.2 Análise do efeito residual da dose recomendada – propagação em profundidade...	24
3.3.3 Análise do fracionamento temporal da aplicação da doses de calcário na propagação em profundidade.....	26
3.3.4 Interpretação do efeito da migração em profundidade quando da calagem superficial	29
3.4 Conclusões	33
3.5 Referências.....	34
4 ESTUDO II: INCORPORAR CALCÁRIO EM SOLO COM ALTA ACIDEZ POTENCIAL É A MELHOR FORMA DE CORREÇÃO DA ACIDEZ	38
4.1 Introdução	39
4.2 Material e métodos.....	41
4.2.1 Histórico da área experimental.....	41
4.2.2 Coleta e análises das amostras de solo	42
4.2.3 Análises estatísticas	43
4.3 Resultados e Discussão	43
4.3.1 Efeito do cultivo do solo sem correção da alta acidez potencial.....	43
4.3.2 Efeito da correção da acidez potencial em nível recomendado	45
4.3.3 Efeito da correção parcial da acidez potencial em nível recomendado.....	47
4.3.4 Efeito da aplicação de baixas doses de calcário fracionadas no tempo	49
4.3.5 Análise da reacidificação do solo em relação a progressão da frente de neutralização	53
4.3.6 Problemática da interpretação estatística de até onde se propaga o efeito da calagem superficial em profundidade.....	55
4.4 Conclusões	59
4.5 Referências.....	59
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63

1 INTRODUÇÃO GERAL

A correção dos solos para a produção agrícola é praticamente obrigatória para diminuir os efeitos deletérios da acidez e promover um melhor desenvolvimento e produtividade das plantas sensíveis antes de adotar-se um programa de adubação (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO RS/SC, 2004). Para tal, recomenda-se a aplicação de um produto corretivo da acidez, normalmente o calcário agrícola. Consiste na elevação do pH e consequente neutralização do Al trocável e dos hidrogênios coordenados nos grupos funcionais, em especial, da matéria orgânica do solo. O calcário, composto principalmente de carbonatos de cálcio (CaCO_3) e magnésio (MgCO_3), sofre baixíssima solubilização e a sua dissociação é restrita à região próxima às suas partículas.

Vários pesquisadores brasileiros, em especial gaúchos, desde a década de 40 do século passado têm se dedicado à temática da acidez do solo e sua neutralização. Aspectos como a definição das doses para cada conjunto de culturas, num solo nativo, e as alterações na frequência e nas doses para a reaplicação, bem como o monitoramento da dinâmica de sua descida no perfil do solo (Rheinheimer et. al 2000; Kaminski et. al 2000; Gattiboni et. al 2003; Kaminski et. al 2005) são bem documentados. No entanto, ainda há divergência entre os técnicos, os agricultores e, até, entre alguns pesquisadores, sobre a necessidade ou não de incorporação do corretivo ao solo no sistema plantio direto (SPD), uma vez que em muitos casos ainda persistem problemas sérios de saturação por alumínio no solo de camadas abaixo dos dez centímetros de profundidade.

A calagem, que no cultivo convencional era e é recomendada para homogeneização no volume de solo revolvido, no SPD deve se restringir à deposição na superfície, pois a base do sistema está em não se revolver o solo e maximizar os efeitos da cobertura vegetal. Caso o alumínio trocável tenha sido totalmente neutralizado no solo, no mínimo naquele da camada 0-20 cm, as futuras reaplicações do corretivo serão perfeitamente possíveis em superfície. Basta apenas definir o critério para tomada de decisão: se há necessidade de reaplicar ou não e a definição da dose a ser reaplicada. Ambas as respostas já estão satisfatoriamente definidas pela CQFS-RS/SC (2004). Com essas recomendações é possível manter o solo indefinidamente sem restrições ao crescimento radicular devido à toxidez de alumínio, uma vez que não haverá necessidade de migração dos efeitos da calagem no perfil do solo. Aliás, a velocidade de migração é suficiente para amortizar os efeitos da reacidificação do solo causada pela água da chuva e, secundariamente, pela atividade radicular e microbiana.

No entanto, grande parte dos solos cultivados sobre o SPD apresenta elevada saturação por alumínio no solo de camadas prioritárias ao crescimento radicular. Isso é decorrente do erro técnico cometido na instalação do SPD e não do processo de reacidificação. Naqueles solos onde não foi feita correta correção da acidez do solo em profundidade, não será a reaplicação superficial do corretivo que irá solucionar o problema, pois é inquestionável que se trata de um insumo agrícola de baixa solubilidade e de dissolução totalmente dependente de prótons na solução do entorno das partículas.

Os efeitos benéficos do cultivo do solo sob SPD com adequada cobertura do solo e rotação de culturas, como a conservação do solo, biociclagem de nutrientes e sustentabilidade da produção dos cultivos agrícolas, são inegáveis. Contudo, no Brasil criou-se um conceito irreduzível, compartilhado pela maioria dos técnicos e pesquisadores, de que o solo sob SPD não deve ser revolvido sob a hipótese alguma. A mobilização do solo com arado e grade realizada uma única vez para incorporação do calcário é confundida com o revolvimento do solo realizado semestralmente no sistema de cultivo convencional o qual provoca a desestabilização dos agregados, diminuição da porosidade, deixando o solo mais suscetível à ação dos processos erosivos.

Com o avanço da fronteira agrícola na metade sul do Rio Grande do Sul, áreas de campo natural vem sendo substituídas e utilizadas para o cultivo de culturas anuais com adoção do SPD. A aplicação superficial de calcário nestas áreas pode alterar os atributos químicos do solo em profundidade, principalmente em solos com baixa acidez potencial e sem impedimentos físicos por compactação ou selamento de poros. Entretanto a incorporação do corretivo pode trazer maiores benefícios às culturas mais exigentes, pois a neutralização da acidez ocorre rapidamente na camada de maior concentração radicular, em função da mistura eficiente solo/corretivo, e se propaga lentamente em profundidade.

Assim, a compreensão da dinâmica da acidez a partir da superfície do solo, bem como a mensuração da residualidade da calagem em longo prazo são fundamentais para que se estabeleçam ajustes na recomendação de calagem e, na frequência de reaplicação do corretivo em solos com diferentes históricos de manejo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho objetivou estudar a migração e persistência dos efeitos da aplicação de calcário no perfil do solo em função de métodos de aplicação perante o processo de reacidificação em longo prazo

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho que serviram também de estratégia de estudo, sendo abordado um em cada estudo do presente trabalho são:

- a) Monitorar e interpretar a migração e a persistência dos efeitos da calagem superficial sobre os atributos químicos de um solo arenoso reacidificado cultivado sob o sistema plantio direto.

- b) Estudar a migração e o efeito residual de métodos de aplicação de calcário precedendo a implantação do sistema plantio direto a partir de campo nativo em solo com elevada acidez potencial.

3 ESTUDO I : MIGRAÇÃO E PERSISTÊNCIA DOS EFEITOS DA REAPLICAÇÃO DE CALCÁRIO EM SOLO ARENOSO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

Resumo: As modificações de atributos químicos do solo provocadas pelo calcário aplicado em superfície dependem da dose aplicada e do tempo de reação, limitando-se geralmente aos primeiros centímetros do perfil do solo. O objetivo do presente trabalho foi monitorar a migração e persistência dos efeitos da calagem superficial sobre os atributos químicos de um solo arenoso reacidificado cultivado sob sistema de plantio direto (SPD). O experimento foi instalado num Argissolo Vermelho distrófico arênico onde a última mobilização do solo foi realizada no ano de 1988 com aplicação de fertilizante e calcário para a elevação dos teores de macronutrientes e correção da acidez da camada de 0–20 cm. Posteriormente, a área foi cultivada sob SPD desde então. Em outubro de 1994 o solo foi amostrado e o experimento foi instalado a partir da necessidade da reaplicação de calcário para elevar o pH a 6,0. Os tratamentos consistiram numa testemunha sem calcário; a dose integral recomendada na instalação do experimento; a metade da dose aplicada a cada dois anos e um terço da dose reaplicada anualmente, totalizando 0, 3,6, 5,4 e 6,0 Mg ha⁻¹ de calcário, respectivamente. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com cinco repetições. Em outubro de 2006 e 2012, aos 144 e 216 meses após o início do experimento, foram abertas uma trincheira por parcela e coletadas amostras de solo em camadas de 1 cm até os 10 cm de profundidade, de 2,5 cm até os 25 cm, de 5 cm até os 50 cm e da camada de 50-60 cm, nas quais foram determinados os atributos químicos relacionados à acidez do solo. Os resultados obtidos mostraram que a aplicação de calcário anterior à instalação dos tratamentos manteve os níveis de acidez do solo inferiores à sua condição natural. A calagem superficial promoveu a formação de uma frente alcalinizante em todo o perfil do solo, mas há evidências de forte reacidificação da camada subsuperficial. A migração e residualidade dos efeitos da calagem superficial foram proporcionais à dose aplicada e ao seu fracionamento.

Palavras chave: acidez do solo, reacidificação, calagem, mobilidade de calcário.

MOVEMENT AND PERSISTENCE EFFECTS OF RELIMING TO A SANDY SOIL UNDER NO-TILL SYSTEM

The changes of soil chemical properties caused by surface applied lime depend on the lime

application rate and its reaction time in soil, which is generally limited to the top few centimeters of the soil profile. The objective of this study was to monitor the migration and persistence effects of liming on the soil chemical attributes which contribute to re-acidification process on a sandy soil under no-tillage system (NTS). The experiment was installed in Rhodic Paleudalf soil, where the last tillage was performed in 1988 with the recommended fertilizer and lime application to increase the soil fertility and applying lime from 0 to 20 cm. Thereafter, the same area was cultivated under NTS. In October 1994, the soil was sampled and the results indicated the necessity of further lime addition to raise the soil pH up to 6.0. The treatments constructed includes: no lime; the full recommended dose in the experiment; half of the applied dose every two years and a third dose reapplied annually, resulting a total of 0.0, 3.6, 5.4 and 6.0 Mg ha⁻¹ lime, respectively. The experimental design was randomized blocks with five replications. In October 2006 and 2012 i. e., 144 and 216 months after the start of the experiment, a trench per plot were opened and the soil sample were collected at each 1cm for 1 to 10 cm soil depth, at each 2.5 cm from 10 to 25 cm depth, at each 5 cm from 25 to 50 cm depth and last from 50 to 60 cm soil layer. The results showed that the soil receiving different rate of lime have lower soil acidity when compared to control soil without lime addition. The liming promoted the formation of an alkaline phenomena throughout the soil profile, however, there was a strong evidence of re-acidification in the deeper subsurface layer. Migration and residual effects of liming were proportional to the applied lime dose and its fractionation.

Key words: soil acidity, re-acidification, lime, limestone mobility

3.1 Introdução

Os solos ocorrentes nas regiões tropicais e subtropicais possuem intensidade e duração de intemperismo diferentes. Todavia, a maioria dos solos presentes nos biomas tropicais e subtropicais são altamente intemperizados, como os Latossolos e os Argissolos. Estes solos compreendem cerca de $1,7 \times 10^6$ hectares em 72 países e representam a maior porção de terra potencialmente agricultável no mundo (cerca de 49%). Somente no Brasil eles ocupam 571 milhões de hectares (67% do território) (IBSRAM, 1985). A mineralogia destes solos é predominantemente composta por óxidos de ferro e alumínio e filossilicatos de camada 1:1,

como a caulinita, e apresentam quantidades não negligenciáveis de argilominerais do tipo 2:1. Os problemas relacionados à acidez do solo são bem conhecidos (Olmos & Camargo, 1976) e a eliminação dos seus efeitos deletérios é comumente realizada por meio da aplicação de calcário. No sistema plantio direto (SPD) a correção da acidez do solo é realizada pela aplicação de calcário na superfície do solo, sem incorporação. Os efeitos benéficos da calagem superficial são observados em curto prazo nos primeiros centímetros do perfil do solo (Rheinheimer et al., 2000a; Caires et al., 2008). A correção das camadas mais profundas do solo é lenta, principalmente em solos com cargas variáveis (Ernani et al., 2004). A aplicação superficial promove a formação de gradiente e frente alcalinizante que avança verticalmente no perfil do solo. A taxa de progressão da frente alcalinizante depende do tempo e das doses de calcário aplicadas, da forma de aplicação de calcário, do sistema de cultivo, das características do solo, das condições climáticas e da adição de fertilizantes ácidos (Oliveira & Pavan, 1996; Rheinheimer et al., 2000b; Conyers et al., 2003; Tang et al., 2003).

Segundo Rheinheimer et al. (2000a), as camadas subsuperficiais somente serão corrigidas quando o pH do solo nos primeiros centímetros atingir valores superiores a 5,5. Apesar disso, a movimentação dos agentes corretivos da acidez do solo em SPD vem sendo estudada por vários autores nos últimos anos e os resultados são discordantes (Oliveira & Pavan, 1996; Rheinheimer et al., 2000 a e b; Caires et al., 2005; Silva et al., 2007; Caires et al., 2008; Sorato et al., 2008). Contudo, esses trabalhos demonstram que a correção do solo em subsuperfície no SPD é favorecida devido a dois mecanismos. Primeiramente, a melhoria das características físicas e biológicas do solo promovidas pela manutenção de palha na superfície e a ausência de revolvimento, que propiciam a movimentação de partículas de calcário por canais preferenciais formados pelo aumento da porosidade, canalículos formados pelas raízes mortas e bioporos formados pelo meso e macrofauna do solo. O segundo é devido à decomposição de resíduos vegetais depositados em superfície após o fim do ciclo dos cultivos, promovendo a liberação de ácidos orgânicos de baixo peso moleculares que podem se ligar com o Ca e o Mg na superfície e atingir camadas mais profundas trocando esses cátions pelo Al e liberando Ca e Mg na solução em subsuperfície, diminuindo assim a atividade do Al.

A CQFS-RS/SC (2004) preconiza a calagem na camada de 0 -20 cm de solo, por meio de aração e gradagens na introdução do SPD com média e alta acidez potencial. Esta recomendação permite a colocação de partículas de calcário até a profundidade de 20 cm, favorecendo a correção do solo em toda a camada arável. Isso permite neutralizar o Al^{+3} o mais profundamente possível, uma vez que o sistema não prevê mobilização de solo posterior

a implantação do sistema. Após, a reaplicação de calcário no SPD é realizada superficialmente, criando uma frente alcalinizante a partir da superfície do solo. Isso permite que a reacidificação a partir da superfície do solo, seja controlada com aplicações superficiais de calcário ao solo CQFS-RS/SC (2004). No entanto, a reaplicação superficial é viável somente se antes da adoção do SPD a calagem tivesse seguido as recomendações técnicas (CQFS-RS/SC 1995 e 2004). Infelizmente, durante as décadas de 80 e 90, a maioria dos agricultores do RS e SC simplesmente deixou de mobilizar o solo sem antes fazer uma avaliação química do mesmo e, caso necessário, uma calagem profunda. Como resultado, atualmente existe uma extensa área agrícola no sul do Brasil que apresenta problemas sérios de acidez do solo nas camadas subsuperficiais (Martinazzo, 2006).

O objetivo do presente trabalho foi monitorar e interpretar a migração e a persistência dos efeitos da calagem superficial sobre os atributos químicos de um solo arenoso reacidificado cultivado sob o sistema plantio direto.

3.2 Material e métodos

O trabalho foi realizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (Latitude S 29° 43' 03,5''; Longitude W 53° 42' 05,6''), em um Argissolo Vermelho Distrófico arênico (Embrapa et al., 1999), textura média, relevo ondulado, substrato arenito. O clima é Cfa, segundo classificação de Koeppen, com precipitação média anual de 1.769 mm e temperatura média anual de 19,2°C.

A área foi cultivada com milho (*Zeamays L.*) e soja (*Glycinemax L. Merr.*), no sistema cultivo convencional implantado sobre campo nativo, com aração e gradagem antecedendo os cultivos de verão, e com uma gradagem antes da implantação das culturas de cobertura do solo de inverno, até 1988. A semeadura era feita em nível, com a presença de terraços de base larga. A análise do solo da camada 0-20 cm apresentou valores de 140, 250, 400 e 210 g kg⁻¹ de argila, silte, areia fina e areia grossa, respectivamente; 11 g kg⁻¹ de matéria orgânica, pH em água 4,8, Al trocável 1,70 cmol_c kg⁻¹, Ca + Mg trocáveis 2,90 mol kg⁻¹, P disponível 3,2 mg kg⁻¹ e K trocável 35 mg dm⁻³.

Em novembro de 1988, aplicou-se 3,1 t ha⁻¹ de calcário dolomítico com 60% de PRNT, para elevar o pH do solo a 6,0, seguida de aração e gradagem. Depois disso, adotou-se o sistema plantio direto, sendo cultivados milho e aveia preta (*Avena strigosa*) + ervilhaca (*Vicia sativa*) até a safra 1993/94. Em setembro de 1994, foram coletadas amostras de solo, da

camada de 0-20 cm cujos resultados químicos foram: pH em água 5,0, Índice SMP 5,8, Al trocável $0,40 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, Ca + Mg trocáveis $3,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, P disponível 10 mg kg^{-1} e K trocável 75 mg kg^{-1} .

Em outubro de 1994, o experimento foi instalado cujos tratamentos foram baseados na estimativa da correção da acidez para pH 6,0 seguindo a recomendação da CQFS-RS/SC para o SPD. Os tratamentos consistiram em aplicações superficiais de calcário, em dose integral e fracionada, estas distribuídas ao longo do tempo, e mais um tratamento sem aplicação de calcário. No primeiro ano aplicaram-se a dose total recomendada de calcário pelo índice SMP ($3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$), metade da dose em uma parcela e 1/3 dela em outra parcela por bloco. No segundo ano reaplicou-se metade da dose na parcela que recebera a mesma quantia no ano anterior e mais 1/3 na parcela correspondente a essa quantia no ano anterior. No terceiro ano apenas este último tratamento teve a reaplicação repetida de 1/3 da dose. No sexto ano foram reaplicadas as doses de 1/2 e 1/3 da dose nas parcelas que haviam recebido essas duas doses no início do experimento. No sétimo ano novamente foi reaplicada a dose de 1/3. As doses acumuladas ao longo dos anos corresponderam a 0, 3,6, 5,4 e $6,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, para os tratamentos Testemunha, 1 SMP, 1/2SMP bienal e 1/3 SMP anual, respectivamente. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, com quatro repetições e as parcelas mediram 10 x 15 m, distribuídas ao longo de um declive de 7%, entre os terraços.

Cultivou-se milho (safras 94/95; 97/98; 99/00; 00/01), aveia preta (95; 96; 98; 00; 01; 03; 04; 05), soja (95/96; 96/97; 01/02; 02/03; 03/04; 04/05), aveia preta + ervilhaca (97), crotalária (*Crotalaria juncea*) (98/99), trigo (*Triticumaestivum*) (99; 07;13) soja + mamona (*Ricinus communis* L.)(07/08) e milheto (*Pennisetum glaucum*) (08/09). Nas safras de primavera/verão (05/06; 09/10; 10/11; 11/12) e de inverno (06; 08; 09; 10; 11; 12), a área permaneceu em pousio. Os resultados da produtividade das safras de 94/95 a 96/97 foram discutidos por Rheinheimer et al. (2000b), e os resultados das safras 00 e 00/01 por Gatiboni et al. (2003).

Em outubro de 2006 e 2012, aos 144 e 216 meses após a aplicação dos tratamentos, uma trincheira por parcela foi aberta para coleta de amostras de solo. As amostras foram coletadas em camadas de 1 até 10 cm de profundidade, de 2,5 até 25 cm e de 5 até 60 cm, sendo compostas por duas sub amostras retiradas de duas faces previamente limpas do perfil do solo. Em 2006, aos 216 meses da aplicação dos tratamentos, amostras de solo de uma área adjacente ao experimento foram coletadas em camadas idênticas às coletadas nas parcelas que recebeu calcário, assumindo que esta amostra representa o solo em sua condição natural com mínima ação antrópica (solo nativo). As amostras de solo foram secas em estufa a $\pm 55^\circ\text{C}$,

destorroadas e passadas em peneira com malha de 2 mm. Foram determinados o pH em água, índice SMP e os teores de Ca, Mg e Al trocáveis (Tedesco et al., 1995). Com esses resultados calculou-se então a acidez potencial, a saturação por alumínio e a saturação por bases.

O modelo estatístico adotado foi um trifatorial com blocos casualizados com cinco repetições. As doses foram consideradas as parcelas principais, as camadas as subparcelas e o tempo aplicação dos tratamentos as subsubparcelas. Quando os efeitos dos tratamentos foram significativos a 5% de probabilidade de erro, as diferenças entre as médias foram comparadas pelo teste de Tukey.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Análise temporal da testemunha - reacidificação

A área experimental foi cultivada no sistema convencional até 1988, apresentando forte erosão, inclusive em sulcos. Em maio daquele ano, fez-se a última lavração seguida de gradagem para incorporação do corretivo da acidez do solo para elevar o pH do solo a 6,0. Foram feitos terraços de base larga para direcionar o movimento de água no início do sistema de plantio direto (SPD). O tratamento testemunha está há 293 meses (24 anos e 5 meses) sem reaplicação de calcário e mesmo assim, o solo da camada 0-4 cm tem efeito da calagem, cuja saturação por Al é menor do que a original (perfil de campo nativo - Figura 1). Isso demonstra que o efeito de reacidificação do solo é pouco pronunciado a partir da superfície do solo, devido às baixas doses de nitrogênio aplicadas na área experimental, contrastando com dados da literatura americana, onde se aplicam doses extremamente elevadas e, portanto, cria-se um forte frente de acidificação em função da adição de fertilizantes nitrogenados (Abruna et al., 1964; Adams & Pearson 1967).

A manutenção do solo nos primeiros centímetros no perfil com menor toxidez de Al permite que as primeiras raízes das plantas cresçam em ambiente menos tóxico. Isso ameniza o efeito da toxidez de Al^{+3} no rendimento das culturas, uma vez que as raízes das plantas ao atingirem solo com altos teores de Al trocável continuam crescendo (Loneragan et al., 1977; Rheinheimer et al., 1994; Petry et al., 1994). Ao contrário, em casos onde as raízes têm contato com altos teores de Al na fase inicial, mesmo que atinjam zonas sem a presença de elemento tóxico, não recuperam mais sua capacidade de expansão e, portanto, a produtividade

das plantas é afetada severamente.

Em sistemas de cultivo como o SPD, a adição e a manutenção dos restos culturais na superfície do solo aumentam os teores de carbono na camada superficial. Isso diminui a atividade do Al tóxico pela formação de complexos organometálicos entre o Al^{+3} e ácidos orgânicos liberados pela decomposição vegetal ou pela exsudação das raízes (Salet et al., 1999; Alleoni & Caires 2010). A toxidez do Al que se encontra na forma livre na solução do solo é consideravelmente diminuída, condicionando um ambiente sem restrições ao crescimento radicular (Brown et al., 2008).

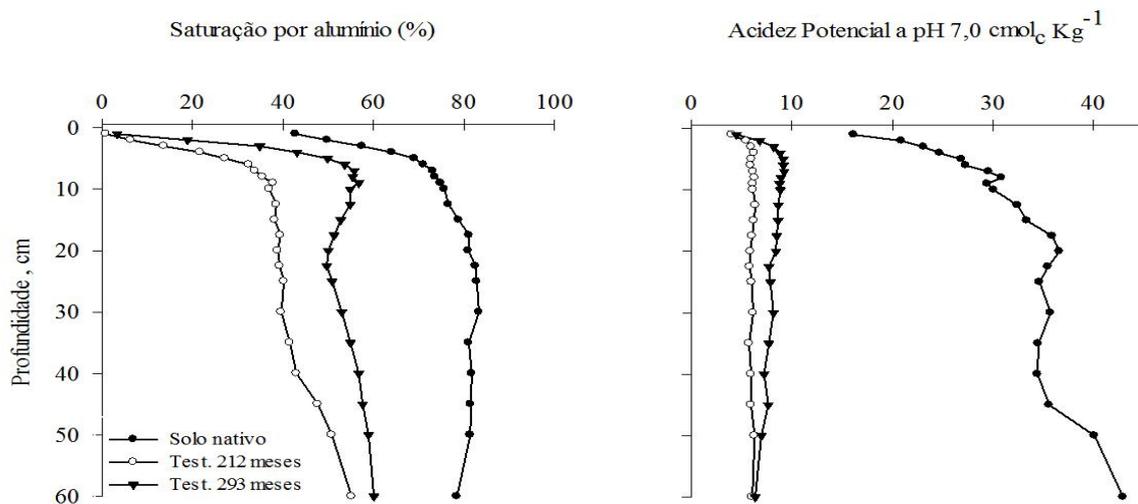


Figura 1. Valores de saturação por alumínio e acidez potencial a pH 7,0 no solo de diferentes camadas (solo nativo e 212 e 293 meses após a aplicação de $3,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário incorporado a 20 cm).

Aos 144 meses da aplicação dos tratamentos na profundidade abaixo de 4 cm, o valor de pH da testemunha encontra-se em torno de 4,8; com $1,4$, $< 1,0$ e $< 0,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de Al, Ca e Mg trocáveis; saturação por Al e de bases de aproximadamente 50% e menor que 20%, respectivamente. Esses dados demonstram que o ambiente para crescimento radicular não está adequado (CQFS-RS/SC 2004). As variedades modernas das principais culturas de grãos, como soja, milho e trigo não toleram saturação por Al superior a 20%. Também as variedades de forrageiras ou plantas de cobertura têm restrição de produtividade quando cultivadas em solos com características similares à encontrada no tratamento testemunha.

A reacidificação do solo no tratamento testemunha na camada de 0-4 cm foi bastante pronunciada nos últimos seis anos (entre 221 e 293 meses após a última calagem) (Tabela 1). Na camada de 4 a 10 cm os valores de pH passaram de 4,8 para 4,7; de Al trocável de 0,7 para

1,5 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$; Ca trocável de 1,8 para 0,9 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e de Mg trocável de 0,9 para 0,4 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. Isso resultou na elevação de saturação por Al de 21 para 55% e diminuição da saturação por bases de 30 para 13%. Na camada de 10 a 30 cm observou-se o mesmo comportamento, com redução ainda maior nos teores de pH e bases trocáveis e elevação nos teores de Al que refletiram na variação nos valores de saturação por Al de 37 para 55% e de saturação por bases de 22 para 13%. Estes valores indicam que o processo de reacidificação do solo vem ocorrendo de forma significativa em curto período de tempo, indicando que a reaplicação de calcário para a correção do solo é necessária nesse tratamento para garantir produtividades satisfatórias.

A presença de Al tóxico e a baixa disponibilidade de bases nas camadas subsuperficiais impedem que o sistema radicular se desenvolva adequadamente. O Al restringe a expansão das raízes, forçando-as a concentrar-se nas camadas superficiais, tornando as plantas mais suscetíveis aos períodos de estiagem. A aplicação superficial de calcário ameniza os efeitos deletérios da acidez do solo em profundidade dependendo das condições físicas do solo (textura, estrutura, bioporos), tempo de aplicação e doses aplicadas. Entretanto, os efeitos são mais pronunciados se restringem aos primeiros 10 cm (Gatiboni et al., 2003; Kaminski et al., 2005; Caires et al., 2008).

Tabela 1. Valores de pH em água, teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e alumínio (Al) trocáveis do solo; saturação por alumínio (m) e por bases (V) no solo de diferentes camadas do tratamento testemunha amostrado aos 221 e 293 meses do início do experimento.

Atributo	221 meses				293 meses			
	Camada de solo, cm							
	0 - 4	4 - 10	10 - 30	30 - 60	0 - 4	4 - 10	10 - 30	30 - 60
pH em água	5,4 - 4,8	4,8 - 4,8	4,8 - 4,8	4,8 - 4,9	5,4 - 4,7	4,7 - 4,7	4,7 - 5,1	5,1 - 5,1
Al trocável, $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	0,0 - 0,7	0,7 - 1,0	1,0 - 1,2	1,2 - 1,5	0,1 - 1,0	1,0 - 1,5	1,5 - 1,4	1,4 - 1,4
Ca trocável, $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	3,4 - 1,8	1,8 - 1,2	1,2 - 1,3	1,3 - 0,7	2,5 - 1,0	1,0 - 0,9	0,9 - 0,7	0,7 - 0,7
Mg trocável, $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$	2,0 - 0,9	0,9 - 0,5	0,5 - 0,6	0,6 - 0,5	1,7 - 0,6	0,6 - 0,4	0,4 - 0,5	0,5 - 0,4
Saturação por Al (%)	0,9 - 21	21 - 37	37 - 40	40 - 55	3,3 - 43	43 - 55	55 - 53	53 - 57
Saturação por bases (%)	57 - 30	30 - 22	22 - 23	23 - 19	50 - 16	16 - 13	13 - 15	15 - 14

Para efeito de comparação foram utilizados resultados das análises químicas de amostras de solo numa área adjacente ao experimento coletadas em camadas idênticas às

avaliadas nas parcelas deste trabalho. Ao comparar o estado atual de acidez do solo com o solo nativo da área, verificou-se que a condição muito próxima a original do solo em relação a sua eletroquímica. Os valores de saturação por Al trocável e de acidez potencial do solo nativo são bastante elevados (Figura 1). Até os 10 cm de profundidade, a saturação por Al alcança valores de 75% e se estabiliza em 80% até os 60 cm. A acidez potencial alcança valores de $30 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ na camada de 0 a 10 cm e aumenta até valores de $40 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ nas camadas mais profundas.

Quando a área era manejada sob SCC a aplicação de corretivos e fertilizantes e a perda de solo era intensa devido à ação dos processos erosivos era muito intensa, acelerando o processo de reacidificação do solo a partir da superfície. Em função disso, foram realizadas aplicações periódicas de calcário e de fertilizantes de acordo com as recomendações da CQFS-RS/SC (1994). A última incorporação de corretivo para elevação do pH a 6,0 na camada de 0-20 cm foi realizada antes da adoção do SPD. Em função das aplicações de calcário, a acidez diminuiu drasticamente e os valores de saturação por Al e acidez potencial se mantiveram inferiores aos observados no solo em condição original após 293 meses. Tal comportamento remete ao efeito da residualidade dos efeitos calagem. Em estudo sobre a dinâmica evolutiva de um Latossolo Bruno, Azevedo et al. (1996) observaram que os efeitos da calagem se mantiveram após 23 anos da sua aplicação. Os valores de pH, Ca e Mg trocáveis apresentaram-se superiores ao tratamento controle enquanto que os teores de Al trocável continuaram mais baixos que o solo na condição natural. Este comportamento evidencia que o solo não retornou ao seu estado natural mesmo após ¼ de século da adição de calcário.

As partículas carregadas reagem fortemente com as superfícies carregadas dos colóides do solo, havendo uma “penetração” na estrutura das partículas de solo, fazendo com que a eletroquímica das superfícies dos grupos funcionais modifique-se. Os distúrbios provocados pela calagem e a magnitude do processo de acidificação dificilmente fará com que os níveis de acidez retornem à condição inicial do solo, sem adição de corretivo (Barrow 1999).

O processo de reacidificação em longo prazo é extremamente lento comparativamente a percepção empírica dos técnicos que atuam no campo (Figura 1). À medida que avança a intemperização dos solos, inicialmente ocorre a acumulação de prótons na solução do solo e o valor de pH diminui. No entanto, não necessariamente haverá a liberação de quantidades expressivas de Al^{+3} para a solução do solo e o aumento da acidez potencial. A acidez potencial é uma combinação do acúmulo de matéria orgânica com a destruição dos minerais

do solo, transformando-os em argilominerais 1:1 e óxidos, em que seus grupos funcionais periféricos podem também coordenar hidrogênios passíveis de serem liberados para a solução do solo. Assim, não se pode confundir a diminuição do pH do solo com toxidez de Al (presença na solução do solo e nos grupos funcionais) e acidez potencial. Os resultados aqui apresentados demonstram que após 25 anos sem reaplicação de calcário, a saturação por Al e a acidez potencial não retornaram ao seu patamar original (Tabela 1; Figura 1).

A reacidificação se acelera com o tempo, pois a presença de próton na solução do solo rompe os minerais liberando Al^{+3} da fase sólida para a solução e esse ao hidrolisar moléculas de água, neutraliza-se, mas libera mais prótons e o ciclo é acelerado. Por este motivo o processo de acidificação se acelerou nos últimos anos, notadamente entre 18 e 24 anos após o início do experimento (Figura 1). Nesse sentido, em casos em que ocorre reaparecimento de Al trocável, dificilmente a frente de neutralização da calagem superficial seria capaz de amortizar a acidez do solo das camadas mais profundas do perfil em curto prazo. Como alternativa para correção do solo em profundidade a incorporação de calcário com aração e gradagem desestabiliza a estrutura do solo e aumenta a susceptibilidade à ação dos processos erosivos. Por outro lado há uma mistura eficiente de solo e corretivo que proporciona a rápida correção da camada mobilizada. A formação da frente de alcalinização origina-se a partir da profundidade em que o corretivo for incorporado (Rheinheimer et al., 2000) e é possível ainda que a migração dos agentes de neutralização atinjam alguns centímetros além da camada mobilizada. Portanto, caso a incorporação seja realizada até 20 cm, a calagem por este modo de aplicação poderia proporcionar um ambiente adequado ao crescimento radicular pela neutralização da acidez nas camadas subsuperficiais. Embora o reaparecimento de Al trocável na solução do solo e nos grupos funcionais seja lento, esses resultados demonstram que para realizar a reaplicação do corretivo da acidez do solo não é preciso esperar todo esse período experimental (25 anos).

3.3.2 Análise do efeito residual da calagem e propagação em profundidade

A reaplicação de calcário na dose recomendada pela CQFS-RS/SC (2004) (1 SPM para pH 6,0 que foi $3,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) feita na superfície do solo em 1994 mantém alterados os atributos químicos do solo em todo perfil analisado após 216 meses (Figura 2). O solo da camada superficial (0–4 cm) apresentou valores de pH em torno de 5,1; 0,6, < 1,0 e < 0,5 $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de Al, Ca e Mg trocáveis; saturação por Al e por bases de aproximadamente 50% e

menor que 20%, respectivamente. Apesar de se observar a existência de reacidificação nas camadas subsuperficiais do solo (> 4 cm), a replicação de $3,6 \text{ t ha}^{-1}$ em 1994 manteve os valores de pH, Ca e Mg trocáveis superiores aos observados no tratamento testemunha sem reaplicação de calcário. A saturação por bases manteve-se aproximadamente o dobro quando foi reaplicado calcário superficial em relação ao tratamento testemunha.

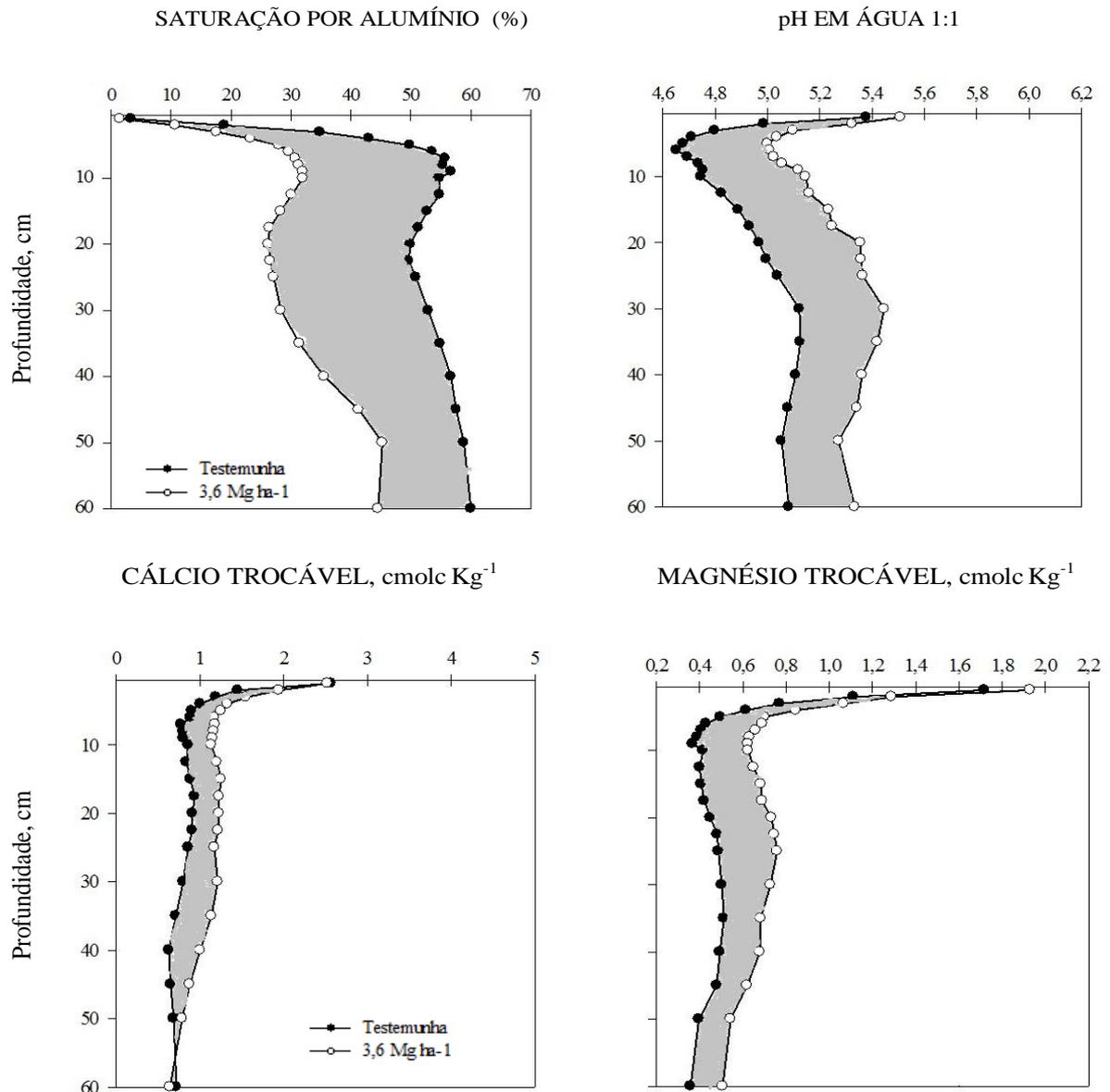


Figura 2. Valores de saturação por alumínio, pH em água, cálcio e magnésio trocáveis no solo de diferentes camadas sob sistema plantio direto, após 216 meses da instalação do experimento.

O solo abaixo dos 4 cm, apresentou valores de pH em torno de 4,8; 1,4, $< 1,0$ e $< 0,5$

cmol_c kg⁻¹ de Al, Ca e Mg trocáveis; saturação por Al e de bases de aproximadamente 50% e menor que 20%, respectivamente (Figura 2).

A reacidificação do solo no tratamento testemunha foi bastante pronunciada nos últimos seis anos (221 e 293 meses após a última calagem) (Tabela 1). Na camada de 4 a 10 cm os valores de pH variam de 4,8 para 4,7, e os teores de Al trocável de 0,7 para 1,5 cmol_c kg⁻¹.

3.3.3 Análise do fracionamento temporal de doses de calcário na propagação em profundidade

A reaplicação da dose recomendada de calcário fracionadas no tempo causou maiores alterações nos atributos do solo nas camadas mais profundas comparativamente a aplicação da dose cheia numa única vez (Figuras 3, 4, 5 e 6). No tratamento em que se aplicou a dose integral recomenda de 3,6 Mg ha⁻¹, o solo das camadas subsuperficiais (4 – 60 cm) apresenta em média pH em torno de 5,2; 0,8, < 1,2 e < 0,8 cmol_c kg⁻¹ de Al, Ca e Mg trocáveis; saturação por Al e de bases de aproximadamente 32% e menor que 25%, respectivamente. Quando foi aplicada a dose de 5,4 Mg ha⁻¹, fracionada em 3 aplicações a cada dois anos, os valores observados em subsuperfície em média foram pH de 5,3; 0,5, < 1,9 e < 1,0 cmol_c kg⁻¹ de Al, Ca e Mg trocáveis, refletindo em valores de saturação por Al variando de 14 a 20 % na camada de 4 a 10 cm e de 20 a 40 % nas camadas mais profundas. A saturação por bases ficou próxima a 32 % abaixo dos 4 cm do perfil em todas as camadas amostradas. No tratamento em que a dose de 6,0 Mg ha⁻¹ foi dividida em 5 aplicações anuais, a saturação por bases abaixo da camada superficial oscilou entre 36 e 43% e a saturação por Al variou de 10 a 12%. Os valores de pH, Ca e Mg trocáveis foram superiores e os teores de Al apresentaram-se menores que os encontrados nos demais tratamentos.

O maior efeito em profundidade não é somente proporcional à dose aplicada. O fracionamento da aplicação de calcário pode ter evitado a perda de partículas de calcário por escoamento superficial. Ao fracionar a calagem, o calcário aplicado é menos susceptível às perdas porque ele é menos reativo devido ao pH da camada superficial estar mais elevado, diminuindo a sua solubilidade, permitindo a migração na forma particulada no perfil do solo.

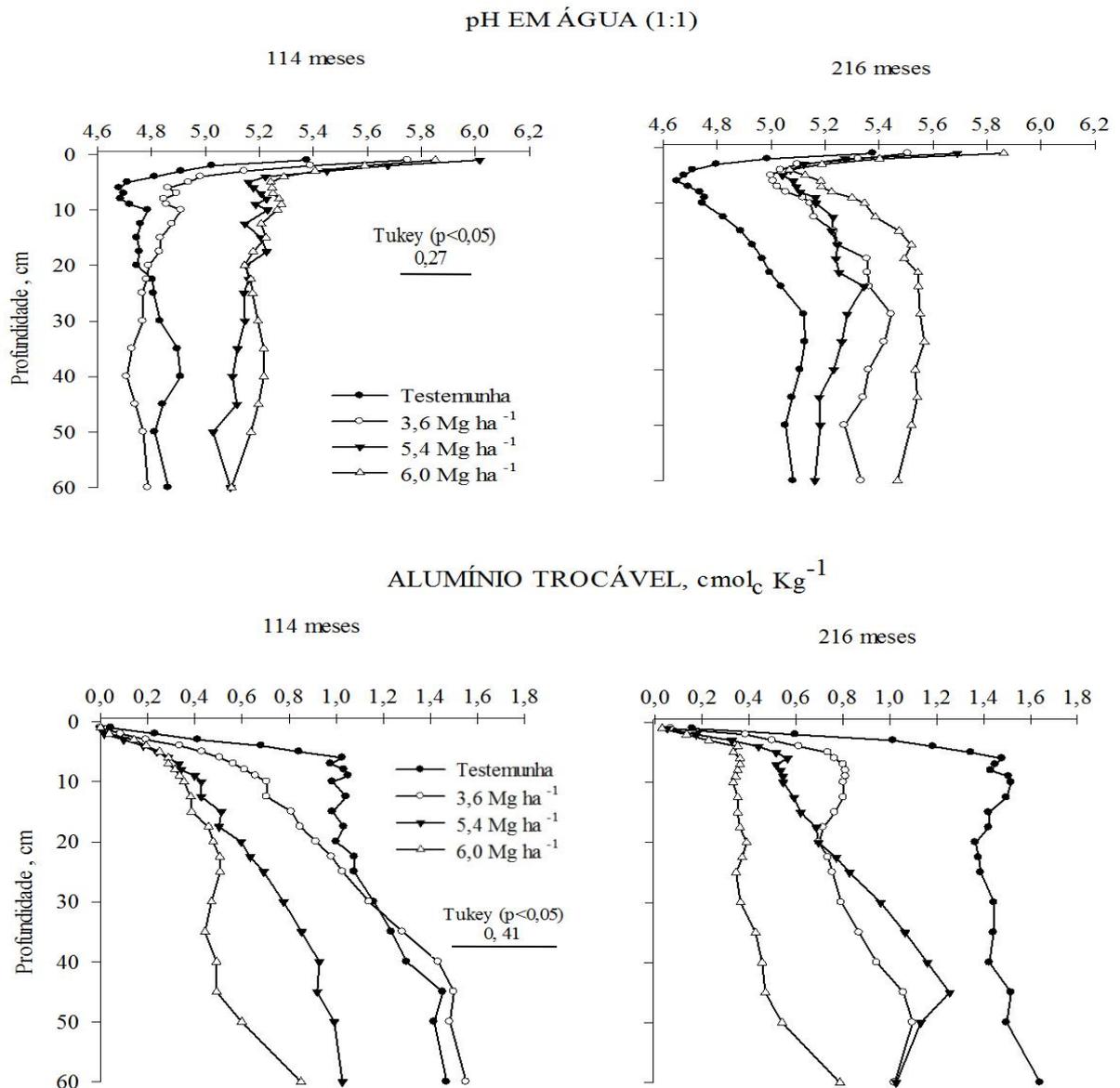


Figura 3. Valores de pH em água e alumínio trocável no solo de diferentes camadas manejado sob o sistema plantio direto, após 144 e 216 meses da aplicação de calcário.

A migração de partículas de calcário via canalículos e bioporos do solo reforçam a importância da qualidade física do solo, pela presença de macroporos/bioporos e da disponibilidade temporal de partículas de calcário na superfície do solo.

Aplicação superficial cria uma frente de neutralização a partir da superfície do solo, mas a correção das camadas mais profundas do perfil somente ocorrerá quando a acidez dos primeiros centímetros for neutralizada. A taxa de progressão da frente de neutralização depende principalmente da migração de partículas finas de calcário (Amaral et al., 2004)

associadas aos ligantes orgânicos hidrossolúveis com grupos funcionais hidroxílicos (R-OH) e carboxílicos (R-COOH) presentes em resíduos orgânicos presentes na superfície do solo sob SPD (Franchini et al., 2001).

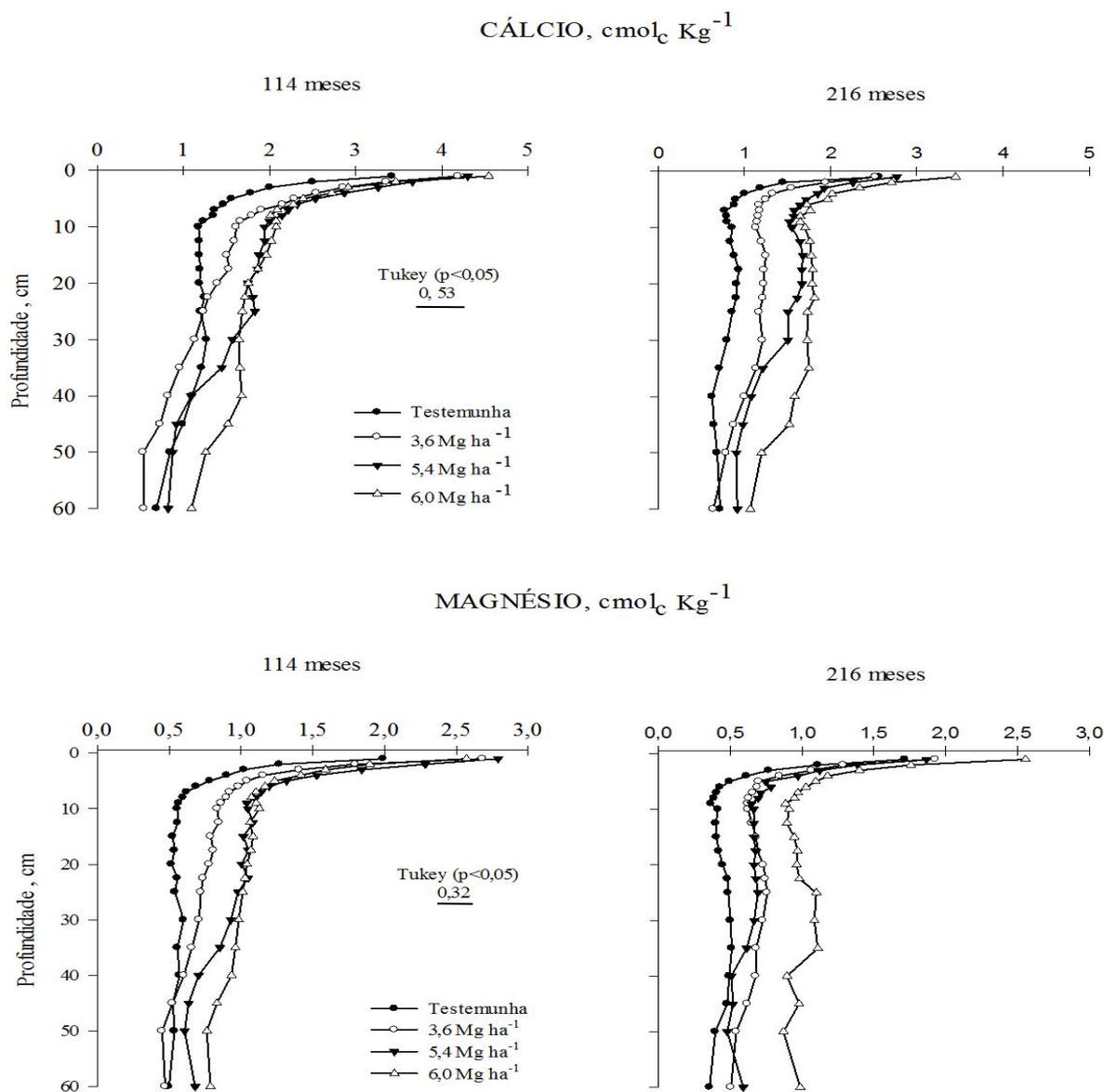


Figura 4. Valores de cálcio e magnésio trocáveis no solo de diferentes camadas manejado sob o sistema plantio direto, após 144 e 216 meses da aplicação de calcário.

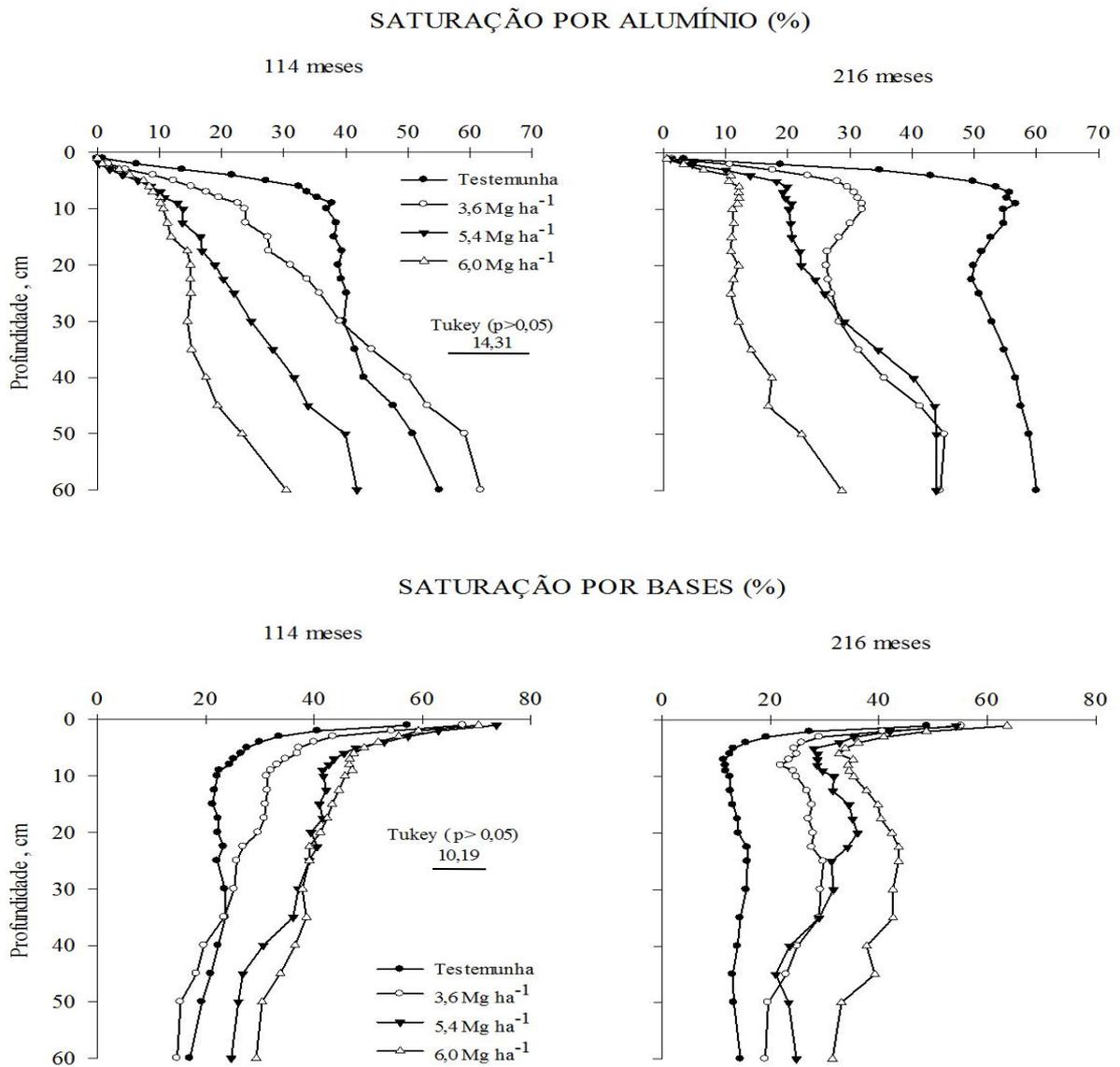


Figura 5. Saturação por alumínio e saturação por bases no solo de diferentes camadas manejado sob o sistema plantio direto, após 144 e 216 meses da aplicação de calcário.

3.3.4 Interpretação do efeito da migração em profundidade quando da calagem superficial

A forma mais usual nos trabalhos relacionados ao tema é a mensuração através de métodos estatísticos. Quando se utiliza tal forma de análise, assume-se que as diferenças significativas encontradas entre o parâmetro observado nos tratamentos em relação ao tratamento controle representam os efeitos da calagem no solo. Neste caso, pequenas alterações, como variações de 0,1 unidades de pH ou $\pm 5\%$ na saturação por Al e saturação por

bases, podem ser significativas, mas sob ponto de vista agrônomo não representam relevância (Kaminski et al., 2005).

A outra forma que pode ser utilizada para avaliar os efeitos da calagem é quando se observam aspectos agrônômicos relativos ao desenvolvimento das plantas. Nesta condição, não são consideradas faixas ideais preestabelecidas para os atributos químicos associados à acidez do solo e sim a possível resposta das plantas quando o ambiente de crescimento radicular apresentar teores enquadrados nestas faixas. Neste trabalho a eficiência efetiva da correção da acidez foi avaliada de acordo com os critérios adotados pela CQFS RS/SC (2004) para a tomada de decisão para reaplicação de calcário em solos manejados sob o SPD, que são valores de pH iguais ou menores que 5,5, saturação por bases igual ou inferior a 65% e saturação por Al superior a 10%. Para Ca e Mg trocáveis utilizou-se a faixa de boa disponibilidade com teores superiores a 4,0 e 1,0 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente.

Na literatura vários autores têm estudado a eficiência da calagem superficial sobre os atributos químicos do solo, relacionados à acidez, utilizando comparações estatísticas (Potter & Bem, 1998; Petere & Anghinoni, 2001; Gatiboni et al., 2003; Kaminski et al., 2005; Caires et al., 2005; Caires et al., 2008). Os efeitos mostram que é possível, considerando este método de comparação, alterar significativamente os atributos químicos da camada superficial do solo em comparação à condição original quando aplicadas as doses integrais recomendadas para a elevação do pH do solo para 6,0. Já a magnitude dos efeitos em profundidade é variável de acordo com as características do solo, como textura e estrutura; dose aplicada; tempo de aplicação e atributo considerado. Em relação às camadas subsuperficiais, alguns casos são observados efeitos significativos na elevação do pH e saturação por bases e redução na saturação por Al até a profundidade de 60 cm com aplicação de doses de 2 a 5,5 Mg ha^{-1} , em solos de textura média e argilosa num espaço de tempo de 12 a 72 meses (Oliveira & Pavan, 1996; Silva et al., 2007; Soratto et al., 2008).

No presente trabalho aos 114 meses da aplicação dos tratamentos foram observados efeitos significativos estatisticamente em profundidades de 7 a 60 cm, dependendo da dose aplicada e do atributo considerado (Tabela 2). Para o tratamento onde foi aplicada a dose de 3,6 Mg ha^{-1} recomendada para elevar o pH a 6,0 na instalação do experimento, observou-se alteração significativa para pH; saturação por Al e saturação por bases até os 7; 17 e 20 cm de profundidade, respectivamente. Nos tratamentos onde se aplicou as doses de 5,4 Mg ha^{-1} e 6,0 Mg ha^{-1} , fracionadas em 3 aplicações de 1,8 Mg ha^{-1} a cada dois anos e 5 aplicações de 1,2 Mg ha^{-1} a aplicada anualmente, os efeitos observados atingiram os 60 cm de profundidade para a maioria dos atributos analisados. Aos 216 meses da aplicação dos tratamentos, os

efeitos sobre a saturação por Al foram significativos estatisticamente até os 60 cm de profundidade em todos os tratamentos.

Tabela 2. Profundidade do solo modificada pela aplicação de calcário aplicado na superfície, avaliada pela análise estatística convencional ($p < 0,05$); pelas faixas de disponibilidade da CQFS-RS/SC (2004) e considerando recomendações de Almeida et al. (1999).

Atributo	114 meses			216 meses		
	3,6 ¹	5,4 ²	6,0 ³	3,6	5,4	6,0
<i>Interpretação estatística</i>	----- cm -----					
Saturação por Al	17	60	60	60	60	60
pH em água	7	60	60	60	25	60
Al trocável	17	60	60	60	60	60
Cálcio trocável	25	60	60	40	40	60
Magnésio trocável	20	35	60	30	60	60
Saturação por bases	20	60	60	60	45	60
<i>Interpretação CQFS-RS/SC (2004)</i>						
Saturação por Al	4	6	12	2	2	35
pH em água	1	2	2	1	1	1
Magnésio trocável	5	10	25	3	4	35
Cálcio trocável	6	8	6	2	2	6
Saturação por bases	1	1	1	n	n	n
<i>Interpretação Almeida et al., (1999)</i>						
Saturação por Al	4	8	15	2	3	45
pH em água	3	45	50	60	60	60
Cálcio trocável	6	8	6	2	2	6
Magnésio trocável	40	60	60	45	35	60
Saturação por bases	2	4	4	1	1	1

¹ Aplicado na instalação em 1994

² 1,8 Mg ha⁻¹ na instalação, 1,8 Mg ha⁻¹ aos 24 meses e 1,8 Mg ha⁻¹ aos 48 meses

³ 1,2 Mg ha⁻¹ na instalação, 1,2 Mg ha⁻¹ aos 12 meses, 1,2 Mg ha⁻¹ aos 24 meses, 1,2 Mg ha⁻¹ aos 36 meses e 1,2 Mg ha⁻¹ aos 48 meses.

Ao avaliar os valores dos atributos químicos de acordo com os limites estabelecidos como adequados para um bom desenvolvimento das plantas, observamos que as

profundidades modificadas pela calagem superficial foram menores que as observadas pela comparação estatística (Tabela 2).

Nas duas épocas avaliadas, os tratamentos onde se aplicou doses de 3,6 Mg ha⁻¹ e 5,4 Mg ha⁻¹ a saturação por Al manteve-se abaixo de 10 % apenas até os 6 primeiros centímetros. Os valores de pH e saturação por bases foram insuficientes para manter um ambiente quimicamente favorável ao desenvolvimento radicular, abaixo de 4 cm de profundidade, de acordo com os padrões adotados pela CQFS RS/SC (2004) para a recomendação da calagem. A reaplicação de 6,0 Mg ha⁻¹ calcário fracionado em 5 doses anuais, a saturação por Al manteve-se corrigida até os 12 e 35 cm de profundidade aos 114 e 216 meses da instalação dos tratamentos, respectivamente (Tabela 2).

Desta forma, verifica-se que os efeitos significativos da calagem apenas por comparação estatística entre os tratamentos e a condição natural, há uma superestimação da profundidade alterada em relação à significância agrônômica. A discrepância entre os métodos de avaliação utilizados pode ser atribuída ao erro experimental. O número adequado de repetições pode aumentar a precisão do experimento, ou seja, melhorar a capacidade de um teste estatístico em detectar diferenças menores entre as estimativas das médias dos tratamentos (Velini et al., 2006). Assim, pode-se afirmar que o solo fora corrigido até determinada profundidade; no entanto a melhoria dos atributos da acidez do solo não é adequada para garantir uma boa produtividade das plantas cultivadas de acordo com os padrões agrônômicos estabelecidos.

A interpretação agrônômica dos parâmetros de acidez do solo também foi realizada segundo as faixas estabelecidas por Almeida et al. (1999), onde assume-se que a toxidez de Al é praticamente ausente em solos com pH superior a 5,1, a fim de verificar se existe coerência dos resultados (Tabela 2). Foram considerados os valores de pH maiores que 5,1; saturação por Al <12 % e saturação por bases >50%. (Tabela 2). Além disso, foram considerados valores de 1 cmol_ckg⁻¹ para Mg trocável e a faixa de 1,5 a 3 cmol_c kg⁻¹ para valores de Ca. Nas duas épocas avaliadas os tratamentos onde se aplicou doses de 3,6 Mg ha⁻¹ e 5,4 Mg ha⁻¹ a saturação por Al manteve-se sempre abaixo de 12 % apenas até os 8 primeiros centímetros do perfil do solo. No tratamento onde se reaplicou 6,0 Mg ha⁻¹ calcário fracionado em 5 doses anuais, a saturação por Al manteve-se corrigida até os 15 e 45 cm de profundidade aos 114 e 216 meses da instalação dos tratamentos, respectivamente. Os valores de pH quando foi aplicada a dose integral de 3,6 Mg ha⁻¹ mantiveram-se acima de 5,2 até os 3 cm e para os demais tratamentos até 45 cm de profundidade aos 114 meses. Aos 216 meses em todos os tratamentos o pH foi superior a 5,2 até os 60 cm.

É possível observar que a migração dos efeitos da calagem avançou a partir dos primeiros centímetros para as camadas mais profundas elevando os valores de pH e diminuindo a saturação por Al conforme a dose e o fracionamento da aplicação. Entretanto, na camada de 4 a 12 cm o pH tem um abaixamento em relação à camada superficial e subsuperficial na ordem de 0,2 unidades de pH aos 216 meses. Tal comportamento pode ser atribuído ao processo de acidificação do solo que é induzido pelo cultivo de plantas.

A saturação por bases não ultrapassou os 4 cm de profundidade com valores superiores a 50% e para Ca trocável os valores situaram-se na faixa estabelecida até os 8 cm de profundidade nas duas épocas avaliadas em todos os tratamentos. Para o Mg trocável, observou-se que com a redução do nível crítico para a tomada de decisão de aplicação de calcário, quase todas as profundidades foram alteradas (Tabela 2), evidenciando que o Mg possui uma maior mobilidade de que o Ca no perfil do solo e que os níveis críticos para Ca estão muito altos e Mg muito baixos.

3.4 Conclusões

- 1- Mesmo após 24 anos sem reaplicar calcário o processo de reacidificação não liberou sequer a metade da quantidade de Al trocável e menos de um terço da acidez potencial original do solo.
- 2- Após 18 anos a calagem superficial promoveu a formação de gradiente de alcalinização no perfil do solo, modificando os atributos associados à acidez do solo até 60 cm de profundidade.
- 3- A migração dos agentes neutralizantes e o seu efeito residual foi maior quando a dose de calcário foi fracionada em aplicações anuais e proporcional à quantidade de corretivo aplicado.
- 4- A avaliação dos efeitos da recalagem no perfil do solo, utilizando métodos estatísticos não é adequada para representar a real condição da acidez do solo para fins de recomendação.

3.5 Referências

ABRUNA, F.; VICENTE-CHANDLER, J.; PEARSON, R.W, Effects of liming on yields and composition of heavily fertilized grasses and on soil properties under humid tropical conditions. *Soil Science Society of America Proceedings*, 28:657-661, 1964.

ADAMS, F. & PEARSON, R.W. Crop response to lime in the Southern United States and Puerto Rico. In: PEARSON, R.W. & ADAMS, F. eds. *Soil Acidity & liming*. Madison, American Society of Agronomy, 161-206, 1967.

ALLEONI, L.R.F.; CAMBRI, M.A.; CAIRES, E.F.; GARBUIO, F.J. Acidity and aluminum speciation as affected by surface liming in tropical no-till soils. *Soil Science Society of America Journal*, 74:1010-1017, 2010.

ALMEIDA, J.A.; ERNANI, P.R. & MAÇANEIRO, K.C. Recomendação alternativa de calcário para solos altamente tamponados do extremo Sul do Brasil. *Ci. Rural*, 29:651-656, 1999.

AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I.; HINRICHS, R. & BERTOL, I. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:359-367, 2004.

AZEVEDO, A.C.; KÄMPF, N. & BOHNEN, H. Alterações na dinâmica evolutiva de Latossolo Bruno pela calagem. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:191-198, 1996.

BARROW, N.J. The four laws of soil chemistry: The Leeper lecture 1998. *Australian Journal of Soil Research*, 37: 787-829, 1999.

BROWN, T.T.; KOENIG, R.T.; HUGGINS, D.R.; J.B. HARSH, J.B.; ROSSI, R.E. Lime effects on soil acidity, crop yield, and aluminum chemistry in direct-seeded cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 72:634-640, 2008.

CAIRES, E.F.; ALLEONI, L.R.F.; CAMBRI, M.A.; BARTH, G. Surface application of lime for crop grain production under a no-till system. *Agronomy Journal*, 97:791-798, 2005.

CAIRES, E.F.; PEREIRA FILHO, P.R.S.; ZARDO FILHO, R. & FELDHAUS, I.C. Soil acidity and aluminium toxicity as affected by surface liming and cover oat residues under a no-till system. *Soil Use Manage.*, 24:302-309, 2008.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 3.ed. Passo Fundo SBCS - Núcleo Regional Sul/Embrapa/CNPT, p. 224, 1994.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre, SBCS - Núcleo Regional Sul, p. 394

CONYERS, M.K.; HEENAN, D.P.; MCGHIE, W.J.; POILE, G.P. Amelioration of acidity with time by limestone under contrasting tillage. *Soil Tillage Res*, 42:85-94, 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Serviço de Produção de Informação, p. 412, 1999.

ERNANI, P.R.; BAYER, C. & RIBEIRO, M.F.S. Chemical modifications caused by liming below the limed layer in a predominantly variable charge acid soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 35:889-901, 2004.

FRANCHINI, J.C.; MEDA, A.R. & CASSIOLATO, M.E. Potencial de extratos de resíduos vegetais na mobilização do calcário no solo por método biológico. *Sci Agric.*, 58:357-360, 2001.

GATIBONI, L.C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; FLORES, J.P.C.; KAMINSKI, J. & RHEINHEIMER, D.S. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. *Ci. Rural*, 33:282-290, 2003.

KAMINSKI, J.; SANTOS, D.R.; GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G. & SILVA, L.S. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um Argissolo sob pastagem natural. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:573-580, 2005.

LONERAGAN, J. F.; SNOWBALL, K. Calcium requirements of plants. *Aust. J. Agric. Res.*, v. 20, p. 465-478, 1979.

MARTINAZZO, R. Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob sistema plantio direto consolidado. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)– Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 80 f, 2006.

OLIVEIRA, E.L. & PAVAN, M.A. Control of soil acidity in no tillage system for soybean production. *Soil Till. Res.*, 38:47-57, 1996.

OLMOS, J.I.L.; CAMARGO, M.N. Ocorrência de alumínio tóxico nos solos do Brasil, sua caracterização e distribuição. *Ciência e Cultura*, Rio de Janeiro, n.2, 28:171-180, 1976.

PETRERE, C. & ANGHINONI, I. Alterações de atributos químicos no perfil do solo pela calagem superficial em campo nativo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:885-895, 2001.

PETRY, C. et al. Influência do estresse de alumínio em plantas de fumo: I. Efeito dos parâmetros cinéticos de absorção de fósforo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 18:69-72, 1994.

POTTKER, D. & BEN, J.R. Calagem para uma rotação de culturas no plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:675-684, 1998.

RHEINHEIMER, D. S.; PETRY, C.; KAMINSKI, J.; BARTZ, H.R. Influência do estresse de alumínio em plantas de fumo virgínia: I. Efeito no sistema radicular, na absorção de fósforo e cálcio e na produtividade de matéria seca. *R. Bras. Ci. Solo*, 18:63-68, 1994.

RHEINHEIMER, D.S.; SANTOS, E.J.S.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, L.C. & BORTOLUZZI, E.C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:797-805, 2000a.

RHENHEIMER, D.S.; SANTOS, E.J.S.; KAMINSKI, J.; XAVIER, F.M. Aplicação superficial de calcário no sistema de plantio direto consolidado em solo arenoso. *Ciência Rural*, 30:263-268, 2000b.

SALET, R.L.; ANGHINONI, I. & KOCHHANN, R.A. Atividade do alumínio na solução de solo do Sistema plantio direto. *R. Ci. Unicruz*, 1:9-13, 1999.

SILVA, M.A.C.; NATALE, W.; PRADO, R. de M.; CORREA, M.C.M.; STUCHI, E.S.; ANDRIOLI. Aplicação superficial de calcário em pomar de laranja pêra em produção. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 29:606-612, 2007.

SORATTO, R.P. & CRUSCIOL, C.A.C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:675-688, 2008.

TANG, C.; RENGEL, Z.; DIATLOFF, E.; GAZEY, C. Responses of wheat and barley to liming on a sandy soil with subsoil acidity. *Field Crops Research* 80: 235-244, 2003.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.; BOHNEN, H.& VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 174 (Boletim Técnico, 5) , 1995.

VELINI, E.D.; PALMA, V.; SOUZA, L.S.; MARTINS, D. Interferência de plantas daninhas na cultura do milho. I – Efeito do número de repetições sobre a precisão dos resultados obtidos. Planta Daninha, Viçosa, MG, n.3, 24:435-442, 2006.

4 ESTUDO II: INCORPORAR CALCÁRIO EM SOLO COM ALTA ACIDEZ POTENCIAL É A MELHOR FORMA DE CORREÇÃO DA ACIDEZ ?

Resumo: A dose e a forma de aplicação de calcário modificam os atributos químicos do solo, o que pode afetar o crescimento radicular das plantas. Este trabalho objetivou estudar a migração e o efeito residual de métodos de aplicação de calcário precedendo a implantação do sistema plantio direto (SPD) a partir de campo nativo em solo arenoso com elevada acidez potencial. O experimento foi realizado no campo experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, RS, em um Argissolo Acinzentado distrófico plíntico. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com parcela subdividida e com quatro repetições. A parcela principal constituiu-se da aplicação de calcário, superficial ou incorporado, enquanto as subparcelas, das doses de calcário que foram de: 0,0; 2,0; 8,5 e 17,0 Mg ha⁻¹, sendo a dose de 2 Mg ha⁻¹ reaplicada a cada dois anos e sempre na superfície, totalizando 8 Mg ha⁻¹. Em outubro de 2006 e 2012, aos 144 e 216 meses após o início do experimento, foi aberta uma trincheira por parcela e coletadas amostras de solo em camadas de 1 cm até os 10 cm de profundidade, de 2,5 cm até os 25 cm, de 5 cm até os 50 cm e da camada de 50-60 cm, nas quais foram determinados os atributos químicos relacionados à acidez do solo. Mesmo após 18 anos da aplicação de calcário o processo de reacidificação não liberou sequer a metade da quantidade de Al trocável e menos de um terço da quantidade de acidez potencial originais do solo. A aplicação de calcário promoveu a formação de gradiente de alcalinização no perfil do solo a partir da profundidade de aplicação, mantendo alterados os atributos associados à acidez do solo até 60 cm de profundidade após 18 anos. A progressão da frente de neutralização ocorreu de forma lenta quando o calcário foi aplicado superficialmente e manteve longo efeito residual. A calagem incorporada apresentou maior eficiência na amenização da acidez do solo e manutenção dos efeitos corretivos em camadas mais profundas do perfil do solo.

Palavras chave: calagem, métodos de aplicação, saturação por alumínio, efeito residual.

INCORPORATION OF LIMESTONE TO HIGH POTENTIAL ACID SOIL: WHICH IS THE BEST WAY TO CORRECT IT?

Abstract: The lime application rate and its mode of application modifies soil chemical attributes which can affect plant root growth. This work aimed to study the migration rate and the residual effect of lime application methods on shifting soil use from a native grassland to no-tillage system (NTS) in a sandy soil with high potential acidity. The experiment was conducted at the experimental field of the Department of Soil Science, the Federal University of Santa Maria, in a Hapludalf. The experimental design was laid out in a randomized block design with split plot design and four replications. The main plot consisted of liming either surface application or incorporation, while the subplots includes where limestone was added at 0.0, 2.0, 8.5 and 17.0 Mg ha⁻¹, at a total of 2 Mg ha⁻¹ surface application every two years, with an additional cumulative total of 8 Mg ha⁻¹ lime. In October 2006 and 2012 i. e., 144 and 216 months after the installation of the experiment, the soil sample were collected at each 1cm for 1 to 10 cm soil depth, at each 2.5 cm from 10 to 25 cm depth, at each 5 cm from 25 to 50 cm depth and last from 50 to 60 cm soil layer. The chemical attributes related to soil acidity was recorded. The results indicated that even after 18 years of lime application due to re-acidification process, yet, half of the amount out of the total exchangeable aluminum was not released and also one third of the potential acidity was not released when compared to native soil. The liming promoted the formation of alkalization gradient in the soil profile where it was applied and considerably altered the chemical attributes associated with the soil acidity up to 60 cm depth after 18 years. The vertical movement of lime and neutralization process relatively at slow rate when surface application of lime was done, however, it showed long residual effect. On the other hand, when lime was incorporated, it proved a rapid and the most efficient way to mitigate soil acidity as well as it showed its suitability for the correction of deep layered soil acidity in the soil profile.

Keywords: liming, application methods, aluminum saturation, residual effect

4.1 Introdução

A correção dos solos para a produção agrícola em solos altamente intemperizados é praticamente obrigatória para diminuir os efeitos deletérios da acidez e promover melhor desenvolvimento e produtividade das plantas. No Sul do Brasil, há mais de sete décadas que se conhece o fator causador do dano ao sistema radicular das plantas em solos ácidos (Mohr, 1947 e 1960) e, inclusive, desde os anos 70 que se tem quantificada a dose de corretivo necessária para sua correta correção (Mielniczuk et al., 1969; Kaminski, 1974). Há grande número de estudos relativos a métodos de estimativa da acidez potencial e do Al trocável; de quanto da acidez potencial é necessário corrigir para cada grupo de cultura; de definição da dose de corretivo a ser usado; da reatividade do calcário (mármore) em função de sua granulometria e forma de aplicação; da frequência de reaplicação do corretivo, entre outros aspectos.

Em 1994, a Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, em plena expansão do sistema plantio direto (SPD) na região, estimulou as instituições de pesquisa e ensino a montarem uma rede de experimentos com a reaplicação de calcário na superfície do solo. Na época, havia dúvidas sobre a efetividade em neutralizar o Al trocável do solo das camadas subsuperficiais, uma vez que a teoria e os resultados práticos sempre apontavam para a necessidade de se misturar o calcário com o solo para que houvesse a maximização de sua reação na solução do solo. Por outro lado, era e, para muitos ainda é, inaceitável que se voltasse a revolver o solo unicamente para a reaplicação do corretivo da acidez. Dessa discussão, vários experimentos foram instalados nos estados do sul do Brasil. Outra preocupação era a expansão da agricultura nas regiões cobertas pelo Bioma Pampa. Uma das dúvidas era se havia necessidade de revolver o campo nativo para implantar as culturas produtoras de grãos ou foragem, uma vez que se tinha em mente o desastre da erosão hídrica. Confundia-se o revolvimento semestral do solo com arações e gradagens em uma única operação para corrigir a alta acidez potencial e a grave deficiência de fósforo desses solos.

Duas décadas depois as áreas que foram incorporadas ao SPD a partir de campo nativo ou de sistema de cultivo convencional não foram mais revolvidas e passaram a receber aplicações de calcário na superfície. A adoção do SPD tem se destacado como uma das estratégias mais eficazes para redução a ação dos processos erosivos e para melhorar a biociclagem de nutrientes, em relação ao sistema de cultivo convencional (SCC). No SPD, o corretivo é aplicado superficialmente e para neutralizar a acidez do solo deve haver frente de neutralização que avança ao longo do perfil (Rheinheimer et al., 2000). Como a reação do calcário é limitada ao local de sua aplicação no solo, a permanência de elevados teores de Al

trocável ou a deficiência de Ca no solo das camadas subsuperficiais pode comprometer a penetração de raízes e a nutrição das plantas, deixando as culturas, inclusive, mais suscetíveis ao estresse hídrico (Caires et al., 2008).

A incorporação do calcário com a utilização de arado e grade tem como resultado final uma mistura eficiente calcário/solo numa camada de solo onde se concentram a maior parte das raízes das culturas. Segundo Kaminski et al. (2007), é isso que garante a eficácia da calagem anterior à condução e/ou introdução do SPD. O início desse sistema sem a correção, no mínimo, do Al trocável, deixa dúvidas quanto à qualidade química do solo situado em profundidades além daquelas alcançadas pela migração do corretivo da superfície (cerca de 10 cm). A questão que se levanta é que não se pode continuar acreditando na possibilidade de, a partir de aplicações superficiais, neutralizar totalmente o Al trocável do solo de camadas profundas. Isso se torna muito mais improvável num solo com presença de camadas compactadas e, conseqüentemente, baixa macroporosidade, inclusive biológica, e com produtividades das culturas comerciais e das plantas de cobertura abaixo da média local (Kaminski et al, 2007). Assim, existirão situações nas quais será possível conduzir o SPD com reaplicações de calcário em superfície; enquanto que em outras situações seria recomendada a incorporação do corretivo da acidez e o reinício do sistema para que, quando da reacidificação do solo, seja possível a reaplicação superficial

Deste modo, a compreensão dos efeitos antagônicos do processo de acidificação do solo e a residualidade da calagem por diferentes métodos de aplicação em longo prazo é fundamental para que se estabeleçam ajustes nas recomendações de correção da acidez do solo. O presente trabalho objetivou estudar a migração e o efeito residual de métodos de aplicação de calcário precedendo a implantação do sistema plantio direto a partir de campo nativo em solo com elevada acidez potencial.

4.2 Material e métodos

4.2.1 Histórico da área experimental

O trabalho foi realizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (Latitude S 29° 43' 03,5''; Longitude W 53° 42' 05,6''), região fisiográfica da Depressão Central do Estado do RS. O clima da região é classificado

como Cfa, segundo classificação de Koeppen, com precipitação média anual de 1.769 mm e temperatura média anual de 19,2°C.

Em outubro de 1994, na logo após a realização da reunião do NRS/SBCS, o presente experimento foi instalado. O solo da área é um Argissolo Acinzentado distrófico plúntico (Embrapa, 1999), textura média, relevo suave ondulado, substrato de sedimentos aluviais recentes. A área era mantida com pastagem natural. O solo da área foi amostrado na camada de 0–20 cm e os resultados das análises da amostra foram: 190 g kg⁻¹ de argila, 260 g kg⁻¹ de silte e 550 g kg⁻¹ de areia; 37 g kg⁻¹ de matéria orgânica, pH em água 4,4, Índice SMP 4,5, Al trocável 3,3 cmol_ckg⁻¹, Ca + Mg trocáveis 3,7 cmol_ckg⁻¹, P disponível 2,3 mg kg⁻¹ e K trocável 54 kg dm⁻¹.

A vegetação natural foi dessecada com glifosato, na dose de 5,0 l ha⁻¹. Em outubro de 1994 instalou-se o experimento, cujas doses de calcário usadas nos tratamentos foram baseadas na estimativa da correção da acidez para pH 6,0. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com parcela subdividida e com quatro repetições. As parcelas principais, que mediram 12 x 12 m, constituíram-se no modo de aplicação superficial (6 x 12 m) e incorporado (6 x 12 m), onde após a aplicação do calcário, metade das subparcelas foi lavrada com arado de disco até 20 cm de profundidade, seguido de dois passes de grade niveladora. A partir dessa operação adotou-se o sistema plantio direto na área do experimento. As subparcelas mediram 6 x 12 m e consistiram numa testemunha sem calcário, na aplicação de 2,0 t ha⁻¹ reaplicada três vezes, de dois em dois anos sempre em superfície, totalizando 8,0 t ha⁻¹, e na aplicação de 8,5 e 17,0 t ha⁻¹, sendo a metade (1/2 SMP) e o total (1 SMP) da dose recomendada pela CQFS-RS/SC (1994), respectivamente.

Cultivou-se milho (safras 94/95; 96/97; 99/00; 00/01; 01/02; 02/03), soja (95/96; 97/98; 98/99; 03/04; 13/14), azevém (*Lolium multiflorum*) + trevo vesiculoso (*Trifolium vesiculosum*) (95; 96; 97; 98; 99; 00; 01; 02; 03; 04; 05; 07) e milheto (07/08; 08/09). Nas safras de inverno (05; 06; 08; 09; 10; 11; 12) a área permaneceu vegetada por azevém + trevo vesiculoso de ressemeadura natural e em pousio nas safras de primavera/verão (04/05, 05/06; 09/10; 10/11; 11/12; 12/13). Os resultados da produtividade das safras de 94/95 a 97/98 foram discutidos por Kaminski et al. (2000). As adubações com macronutrientes para os cultivos foram efetuadas com base na análise de solo e nas doses estabelecidas pela CQFS-RS/SC (1994).

4.2.2 Coleta e análises das amostras de solo

Em outubro de 2006 e 2012, aos 144 e 216 após a aplicação dos tratamentos, uma trincheira por parcela foi aberta para coleta de amostras de solo. As amostras foram coletadas em camadas de 1 cm até 10 cm de profundidade, de 2,5 cm até 25 cm e de 5 cm até 60 cm, sendo compostas por duas sub amostras retiradas de duas faces previamente limpas do perfil do solo. O solo das amostras foi seco em estufa a 55°C, destorroado e passado em peneira com malha de 2 mm. Foram determinados o pH em água, índice SMP e os teores de Ca, Mg e Al trocáveis (Tedesco et al., 1995). Com esses resultados calculou-se a saturação por alumínio e saturação por bases.

4.2.3 Análises estatísticas

Para a análise estatística dos dados deste estudo foi utilizado um modelo de quatro fatores com blocos casualizados e três repetições. O modo de aplicação foi considerado como a parcela principal, as doses como subparcelas e as épocas de avaliação do solo as subsubparcelas, com restrição ao fator da camada amostrada. Quando os efeitos dos tratamentos foram significativos a 5% de probabilidade de erro, as diferenças entre as médias foram comparadas pelo teste de Tukey.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Efeito do cultivo do solo sem correção da alta acidez potencial

Anteriormente a instalação do experimento a área era mantida em seu estado natural com vegetação campestre do bioma pampa e o solo não recebera a adição de fertilizantes e corretivos de acidez. As análises de solo da camada 0-20 cm realizadas em outubro de 1994 indicaram que este era extremamente pobre em termos de fertilidade química. Os teores de P e de bases trocáveis eram muito baixos e a acidez potencial muito elevada, cuja necessidade de calcário para que o pH do solo fosse elevado a 6,0 era de 17 Mg ha⁻¹ (CQFS-RS/SC, 1994).

O cultivo do solo por 216 meses sem a correção da acidez do solo para o nível exigido pelas culturas anuais produtoras de grãos de sequeiro (pH 6,0, em sua maioria), mesmo que tenham sido adotadas todas as demais práticas agrônômicas, não alterou o status natural da toxidez de Al no perfil do solo. Naturalmente, o solo da camada extremamente superficial tem menor saturação por Al e maior saturação por bases. Isso se deve a alta capacidade de complexação de Al pelos grupos funcionais da matéria orgânica (Alleoni et al., 2010). No entanto, é impossível adsorver com alta energia todo o alumínio liberado pelo intemperismo; por isso é que a saturação por Al ainda é de $\pm 30\%$ e a por bases é de $\pm 25\%$ no solo de 0-1 cm. A saturação por Al do solo aumenta bruscamente no perfil, sendo que no solo de 9-10 cm, por exemplo, já se tem 60% de Al trocável e menos do que 10% de bases trocáveis (Figura 1).

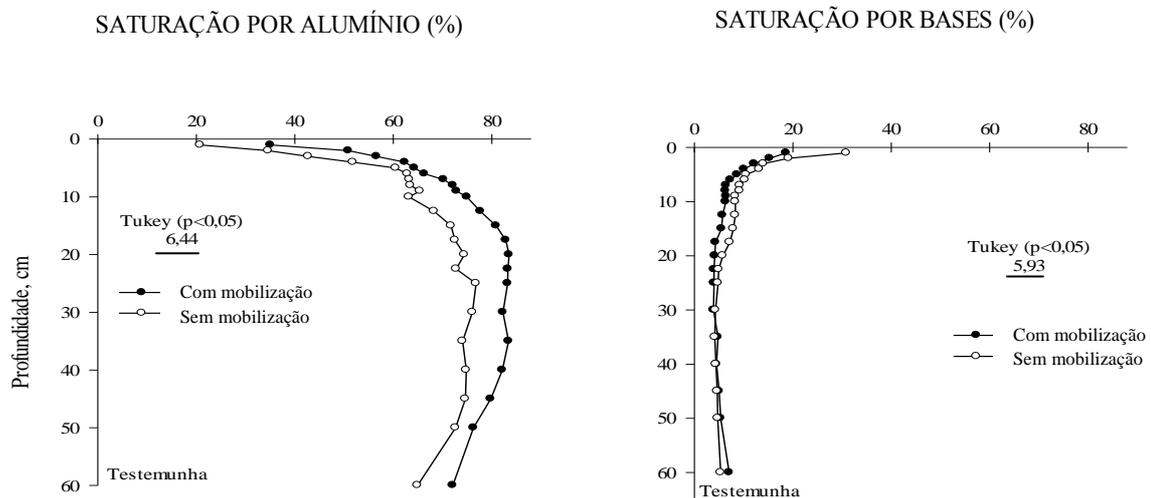


Figura 1. Valores de saturação por alumínio, saturação por bases do solo de diferentes camadas com e sem mobilização sem adição de calcário após 216 meses.

Na ausência de calagem, quando se realizou a operação de mobilização do solo até 10 cm de profundidade com aração e gradagens, os atributos químicos do solo foram ligeiramente alterados em relação ao solo sem mobilização (Figura 1). A mobilização do solo, mesmo que uma única vez como é o caso do presente trabalho, promove uma homogeneização dos materiais no perfil do solo. A incorporação de resíduos vegetais e a diluição do gradiente de acidez formado naturalmente a partir da superfície promovendo elevações nos valores de pH e teores de bases trocáveis e diminui os teores de Al. Em camadas mais profundas, abaixo da camada arável (0-20cm) esse efeito é inexpressivo (Ciotta

et al., 2002). Neste estudo nas parcelas em que o solo foi revolvido os valores de saturação por Al do solo das camadas subsuperficiais (20-60 cm) tiveram uma redução de aproximadamente 10% em relação ao solo em que não foi realizado o revolvimento (Figura 1).

4.3.2 Efeito da correção da acidez potencial em nível recomendado

A aplicação da dose de calcário recomendada para elevar o pH do solo a 6,0 (CQFS-RS/SC, 1994) manteve os atributos químicos relativos à acidez do solo inferiores aos da condição original, mesmo após 216 meses de cultivo de um solo anteriormente mantido sob campo nativo. Independentemente do modo em que o calcário foi aplicado, os efeitos deletérios da acidez foram amenizados até 50 cm de profundidade (Figura 2). Todavia, muitas das alterações observadas não foram suficientes para manter níveis dos atributos químicos do solo adequados para o bom desenvolvimento do sistema radicular das plantas (CQFS-RS/SC, 2004).

A aplicação superficial e sem incorporação da dose de calcário recomendada (17 Mg ha^{-1}) promoveu a migração significativa da frente alcalinizante a partir da superfície do solo. Houve diminuição substancial nos valores de Al trocável e elevação no pH e nos teores de Ca e Mg trocáveis em relação à condição original do solo, sem aplicação de calcário (Figura 2). Nesse mesmo experimento, o avanço da frente de neutralização já havia sido constatado para o solo de até 5 cm aos 48 meses (Rheinheimer et al., 2000) e até 10 cm aos 84 meses (Kaminski et al., 2005) da aplicação de calcário.

Após 216 meses da aplicação do corretivo na superfície do solo, sem incorporação, os valores de saturação por Al que era de apenas 4% no solo da camada 0-1 cm, atingiram 25% aos 10 cm de profundidade. No solo das camadas de 10-20 cm, de 20-40 cm e de 40-60 cm, a saturação por Al foi aumentando rapidamente de 26 para 43%, de 48 para 63% e de 60 para 61%, mas nunca se aproximando da condição natural (Figura 2a). Como consequência da migração dos subprodutos da dissolução e/ou dissociação do calcário, a saturação por bases diminuiu indo de valores superiores a 70% na primeira camada (0-1 cm), passando por valores próximos a 50% aos 10 cm, 30% aos 20 cm e 20% aos 30 cm e permanecendo em torno de 13% no solo das camadas mais profundas, mas sempre sendo superior ao solo natural (Figura 2b). O pH em água do solo da primeira camada amostrada (0-1 cm) foi de 5,3;

observou-se diminuição de 0,4 unidades de pH no solo dos primeiros 10 cm de profundidade. O solo de todo o perfil manteve seu pH em água superior àquele da condição natural (Figura 2c). Os teores de Ca trocável que são extremamente elevados no solo dos primeiros centímetros de solo (0-4 cm) diminuem quase que linearmente até os 30 cm, a partir do qual se estabilizam em torno de $2,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, mantendo-se sempre superiores à condição natural (Figura 2d).

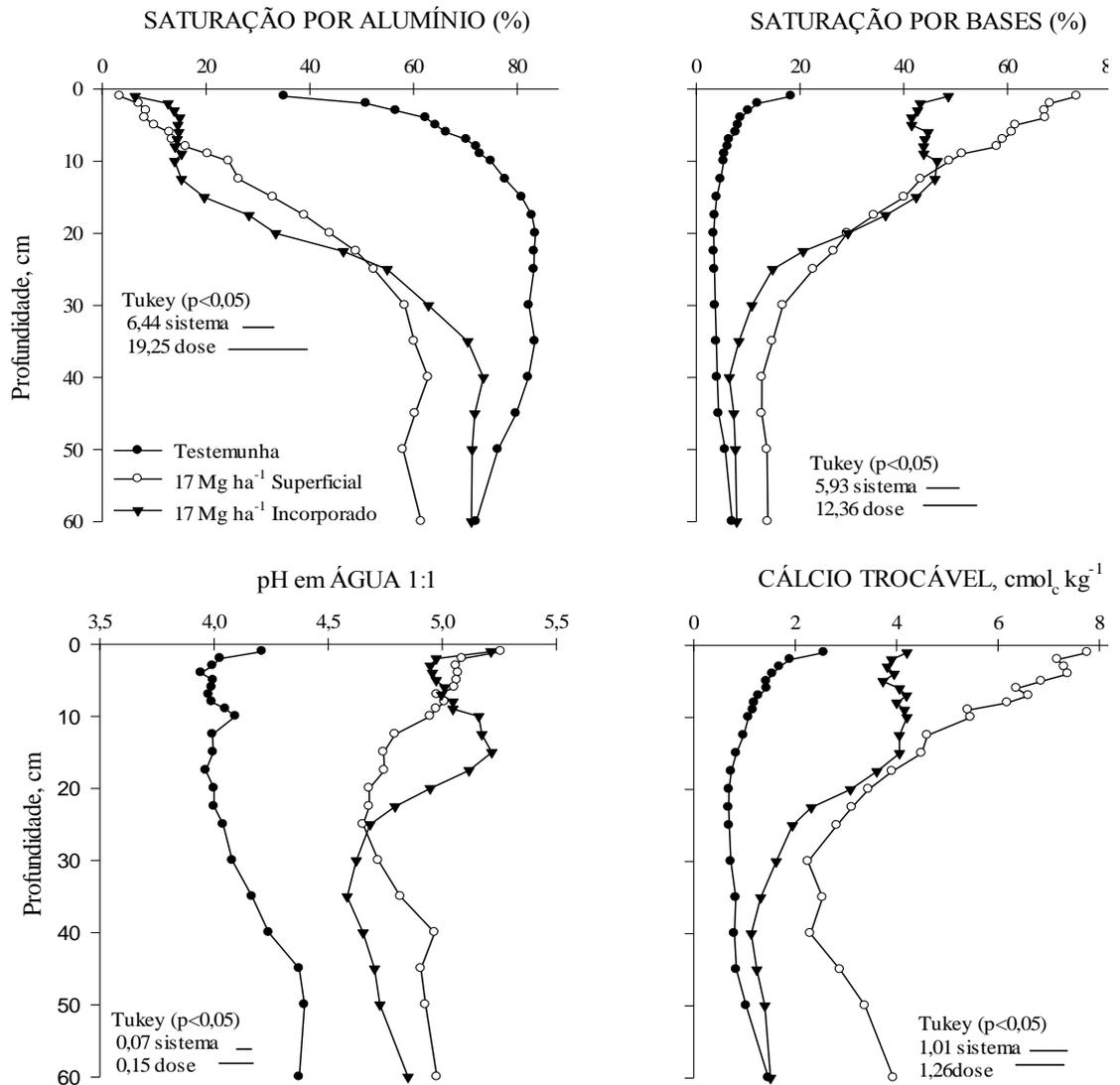


Figura 2. Valores de saturação por alumínio, saturação por bases, pH em água e cálcio trocável no solo de diferentes camadas após 216 meses da aplicação de 17 Mg ha^{-1} de calcário superficial e incorporado.

Quando o calcário, na dose recomendada para elevar o pH do solo a 6,0, foi incorporado ao solo com aração e gradagens no início do SPD e cultivado por 216 meses sem nenhuma mobilização do solo *a posteriori*, o comportamento dos diferentes atributos

relacionados a acidez do solo no perfil foi diferente em relação àquele observado na aplicação superficial (Figura 2).

Os valores de saturação por Al partiram de 6% na superfície e atingiram 14% aos 10 cm de profundidade. No solo das camadas de 10-20; 20-40 e 40-60 cm de profundidade observou-se a variação na saturação por Al de 15 para 33%; 46 para 74% e de 74 para 71%. A saturação por bases apresentou valores de 49% no solo da primeira camada (0-1 cm), diminuindo para 46% aos 10 cm. Até os 40 cm de profundidade os valores diminuíram de 21 para 6% mantendo valores próximos a este até 60 cm. O pH em água do solo da primeira camada amostrada foi de 5,2 e manteve-se próximo a 5,0 nos primeiros 10 cm. Na camada de 10 a 20 cm verificou-se uma elevação de 0,2 unidades aproximadamente e reduziu linearmente para 4,7 até 40 cm de profundidade. No solo da camada de 40-60 cm houve uma pequena elevação na ordem de 0,2 unidades. Os teores de Ca trocável mantiveram-se próximos a $4,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ até os 15 cm de profundidade quando passaram a diminuir linearmente até os 40 cm, atingindo valores inferiores a $1,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, que se mantiveram até os 60 cm.

A progressão da frente de neutralização avançou a partir dos 10 cm de profundidade, o que coincide com a espessura do perfil do solo mobilizado pela ação mecânica (Rheinheimer et al., 2000). Comparativamente ao tratamento em que se realizou a aplicação superficial da dose recomendada, os valores de saturação por Al; saturação por bases; pH e Ca trocável foram inferiores nas camadas superficiais, mas mantiveram-se constantes até os 12,5 cm aproximadamente (Figura 2). A incorporação dilui a dose nos primeiros centímetros e com isso há uma diminuição da pressão dos fatores que promovem a migração em profundidade (Kaminski et al., 2005).

4.3.3 Efeito da correção parcial da acidez potencial em nível recomendado

Nos dois métodos de aplicação (superficial e incorporado), a metade da dose recomendada para elevar o pH a 6,0 alterou os atributos químicos relacionados à acidez do solo, tornando o solo mais propício ao crescimento radicular, mesmo após 216 meses, em relação ao tratamento que não recebera calcário (Figura 3). As alterações promovidas pela adição de $8,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ no perfil do solo seguiram o modelo observado para a aplicação da dose recomendada (100%). Entretanto, os valores de saturação por Al, saturação por bases, pH e

Ca evidenciam que o efeito da calagem foi proporcional à fração da acidez potencial neutralizada; os valores de pH e Ca trocável foram superiores à testemunha no solo de todas as camadas avaliadas, independente do modo de aplicação. Por consequência, houve a diminuição da saturação por Al e aumento da saturação por bases em relação ao tratamento controle.

Comparativamente à aplicação superficial, a incorporação do calcário com a metade da dose recomendada resultou em menor acidez ativa e menor saturação por Al na camada de 10 a 20 cm. Isso demonstra que a calagem incorporada foi mais eficiente em amenizar a acidez na zona onde há maior crescimento radical em curto prazo e que este efeito se mantém por longo período após a sua aplicação. Contudo, já é possível verificar um pequeno incremento na saturação por Al no solo da camada superficial (<4 cm) no tratamento com incorporação do calcário.

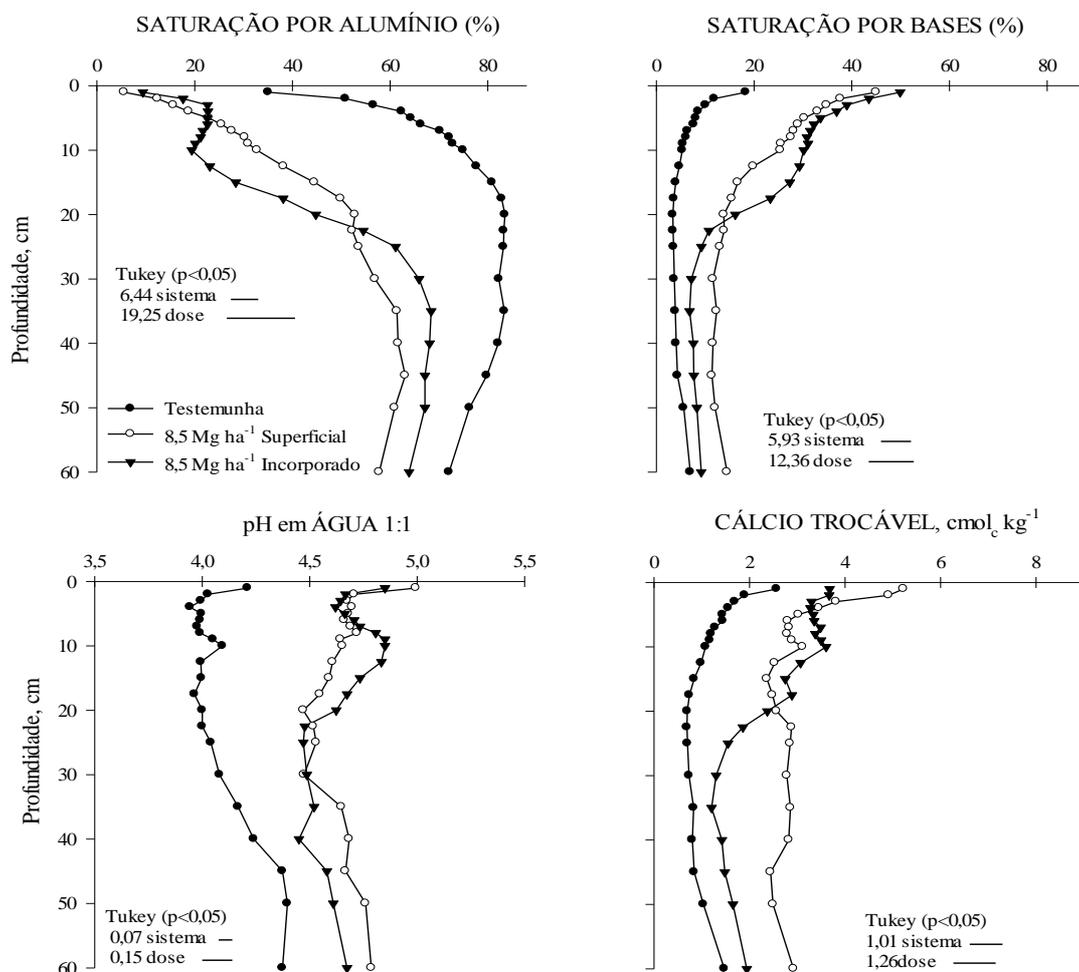


Figura 3. Valores de saturação por alumínio, saturação por bases, pH em água e cálcio trocável no solo de diferentes camadas após 216 meses da aplicação de 8,5 Mg ha⁻¹ de calcário superficial e incorporado.

Esses resultados reforçam a idéia de que a calagem do solo antes da implantação do SPD deve ser feita seguida de incorporação do solo para proporcionar uma camada mais profunda de solo livre dos efeitos tóxicos do Al. O paradigma de que o solo não deve ser mobilizado para preservar as características estruturais, porosidade e capacidade de armazenamento de água tem sido frequentemente questionado por alguns autores (Santin et al., 1994; Marcolan&Aghinoni 2006; Bortoluzzi et al., 2008 e 2014). Esses trabalhos demonstram que a estrutura do solo apresenta elevada capacidade de resiliência, e que o revolvimento do solo seguido de poucos anos de cultivo sem perturbação é suficiente para que este apresente características físicas semelhantes às do cultivo sem revolvimento.

Os efeitos benéficos do cultivo do solo sob SPD com adequada cobertura do solo e rotação de culturas, como a conservação do solo, biociclagem de nutrientes e sustentabilidade da produção dos cultivos agrícolas, são inegáveis. Contudo, no Brasil criou-se um conceito irreduzível, compartilhado pela maioria dos técnicos e pesquisadores, de que o solo sob SPD não deve ser revolvido sob a hipótese alguma. Normalmente os solos das áreas cultivadas sob SPD apresentam elevada fertilidade química no solo dos primeiros 7-10 cm e, abaixo desta camada encontram-se elevados teores de Al e baixa disponibilidade de nutrientes essenciais como o fósforo (Martinazo et al., 2006; Rheinheimer et al., 2008). Além disso, o solo abaixo de 7-10 cm apresenta problemas de compactação devido ao intenso tráfego de máquinas, como pode ser verificado em 46% da área total de solos cultivados sob SPD (Collares et al., 2008; Silva et al., 2010). Dessa forma, o crescimento radicular das plantas restringe-se às camadas superficiais, limitando assim o acesso às reservas de água e nutrientes de camadas mais profundas. Em anos em que o regime pluviométrico permite o adequado fornecimento da água e a concentração de nutrientes em equilíbrio entre fase sólida e a solução do solo é capaz de suprir as demandas das plantas, estas podem expressar seu potencial genético e atingir tetos produtivos elevados, mesmo explorando somente a camada superficial do solo. Por outro lado, nos anos em que ocorrem estiagens, a água armazenada na camada superficial do solo é consumida rapidamente e mesmo que em camadas mais profundas ainda apresente água suficiente para atender as demandas das plantas, as raízes ficam limitadas à camada superficial devido ao impedimento químico (toxidez de Al), prejudicando assim a produtividade das culturas (Caires et al., 2010).

4.3.4 Efeito da aplicação de baixas doses de calcário fracionadas no tempo

O fracionamento da aplicação da dose recomendada de calcário é sugerido por alguns pesquisadores e comumente utilizado em lavouras de produção de grãos sob SPD. Esta recomendação baseia-se na hipótese de que com a divisão da dose em pequenas frações aplicadas periodicamente diminui-se a perda de partículas de calcário por escoamento superficial, e devido ao pH da camada superficial estar mais elevado, a solubilidade e a reatividade são diminuídas permitindo a sua migração na sua forma particulado no perfil do solo.

Neste estudo foram aplicados $2,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário na instalação do experimento o qual foi reaplicado posteriormente três vezes, de dois em dois anos, totalizando $8,0 \text{ Mg ha}^{-1}$, que representa, aproximadamente, 50% ($8,5 \text{ Mg ha}^{-1}$) da necessidade de calcário (CQFS-RS/SC 1994). Ambos os sistemas de aplicação de calcário foram efetivos em diminuir os teores de Al trocável, elevar o pH; e os teores de Ca e Mg trocáveis e por consequência diminuir a saturação por Al e aumentar a saturação por bases até os 30 cm de profundidade em relação ao tratamento controle (Figura 4 e 5). Entretanto, os valores observados para saturação por Al e saturação por bases indicam que aos 216 meses, os efeitos da calagem não foram suficientes para manter um ambiente quimicamente favorável ao crescimento radicular de acordo com os padrões estabelecidos pela CQFS-RS/SC (2004).

A aplicação da metade da dose recomendada de calcário fracionada no tempo não resultou em maior alteração nos atributos do solo nas camadas mais profundas comparativamente à aplicação da dose cheia numa única vez (Figuras 4 e 5). No tratamento em que se aplicou superficialmente a dose integral recomendada de $8,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, o solo da camada superficial apresentou valores de saturação por Al superiores a 20% já nos primeiros 5 cm e aos 10 cm de profundidade foram maiores que 40%. Aos 20 cm de profundidade estes valores foram próximos a 60% mantendo-se em torno disso até os 60 cm. A saturação por bases apresentou uma redução linear com valores de 45% no solo da camada de 0-1 cm e atingiram valores inferiores a 20% a partir dos 10 cm de profundidade mantendo-se menores que 15% até os 60 cm (Figura 4). Este comportamento foi condizente com o que se observou para os valores de bases trocáveis (Figura 5).

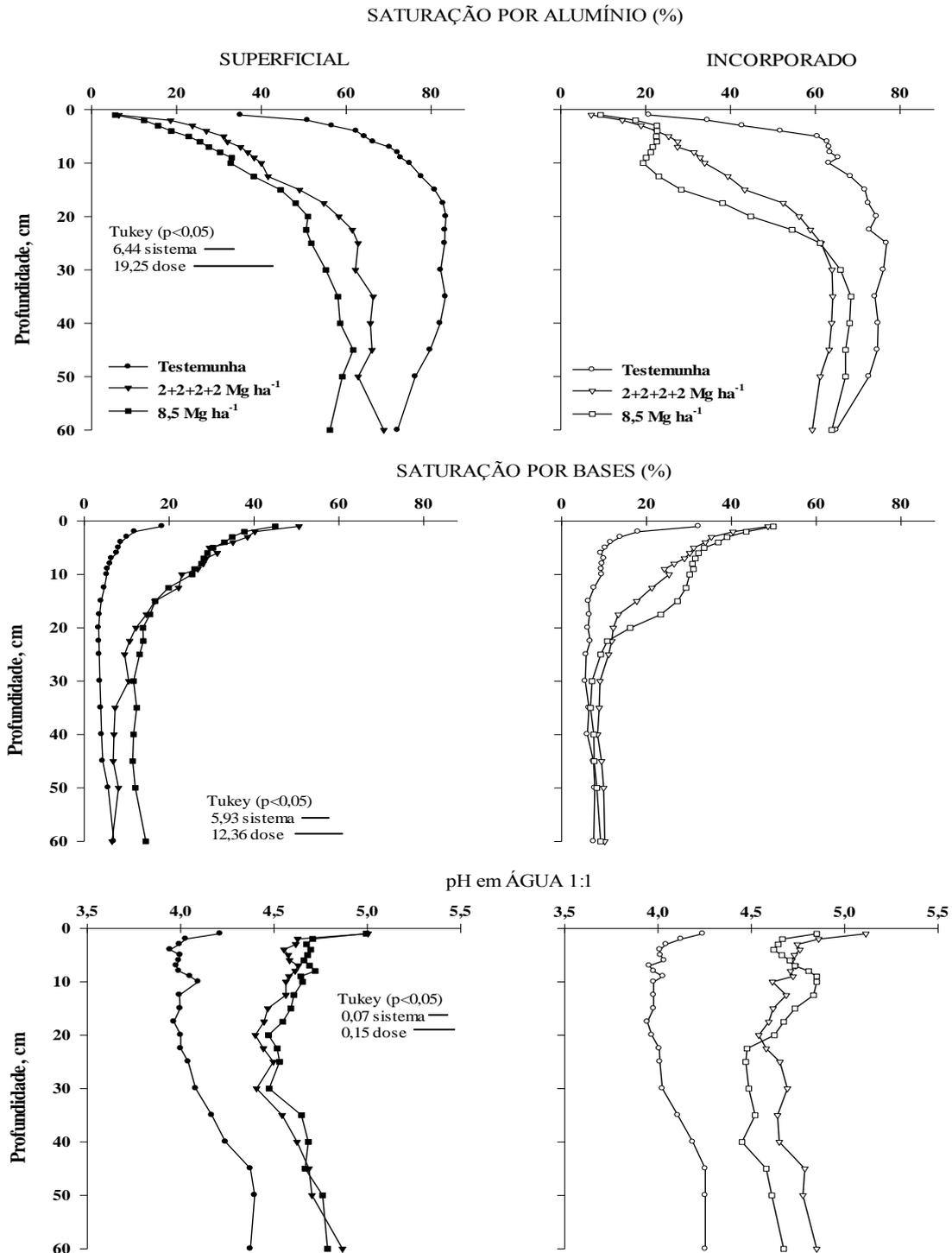
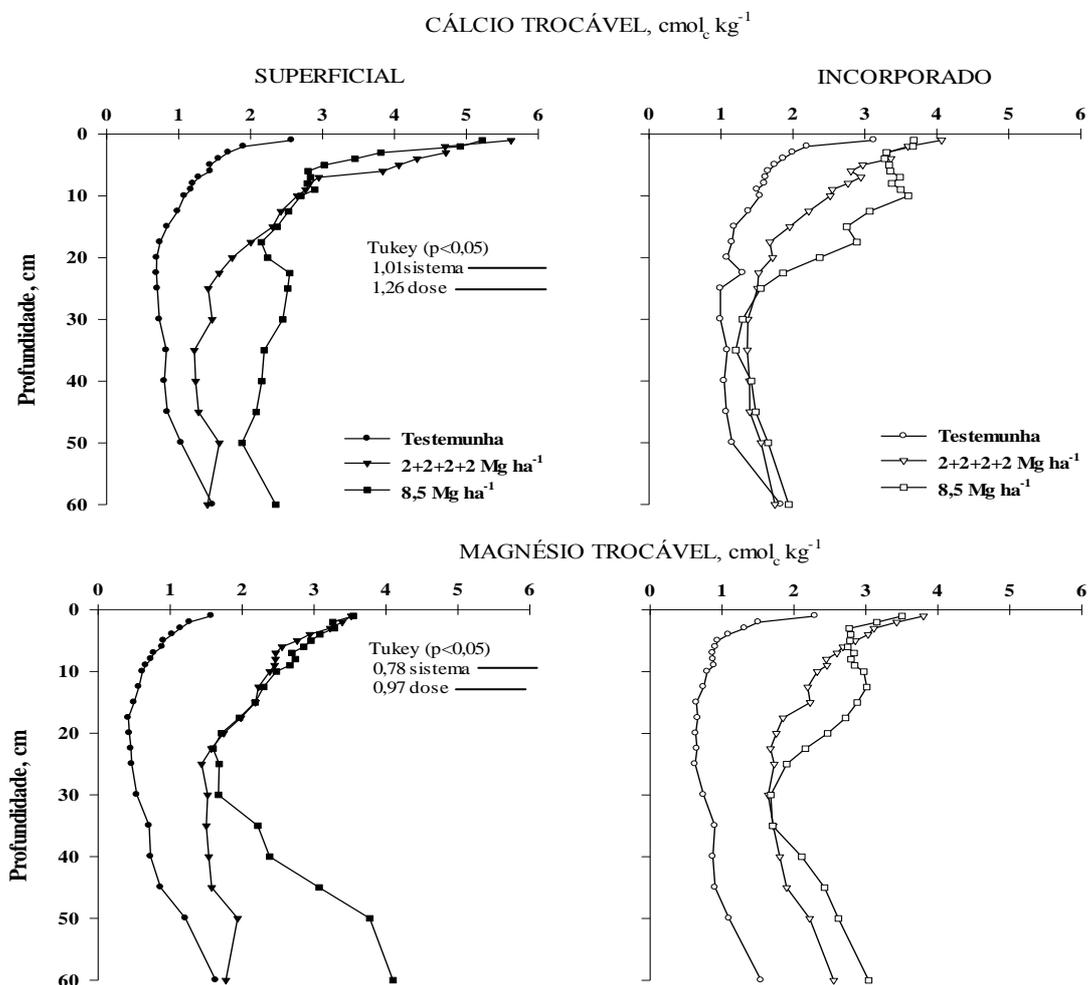


Figura 4. Valores de saturação por alumínio, saturação por bases e pH em água no solo após 216 meses da aplicação de calcário superficial e incorporado.

Comparando-se os sistemas de aplicação de calcário, verifica-se que não houve diferenças substanciais entre a aplicação única ou fracionada da dose correspondente a 50% da necessidade de calcário. Contudo, no tratamento com a aplicação única de 8,5 Mg ha⁻¹ os valores de saturação por Al e os teores de Ca e Mg trocáveis foram ligeiramente diferentes do

tratamento que recebeu a dose fracionada, e isso pode ser resultado da maior dose de calcário aplicada ($0,5 \text{ Mg ha}^{-1}$).

A incorporação do calcário aplicado antes do início do SPD resultou em efeitos da calagem por um período mais longo numa frente de neutralização mais profunda, que se iniciou a partir da profundidade de aplicação do calcário. Quando a dose foi fracionada, a eficiência foi substancialmente menor, pois apenas a primeira fração (2 Mg ha^{-1}) foi incorporada sendo as demais doses aplicadas superficialmente a cada dois anos. O comportamento da frente de alcalinização nesse caso foi muito semelhante ao observado para o tratamento com aplicação fracionada superficial. (Figuras 4 e 5).



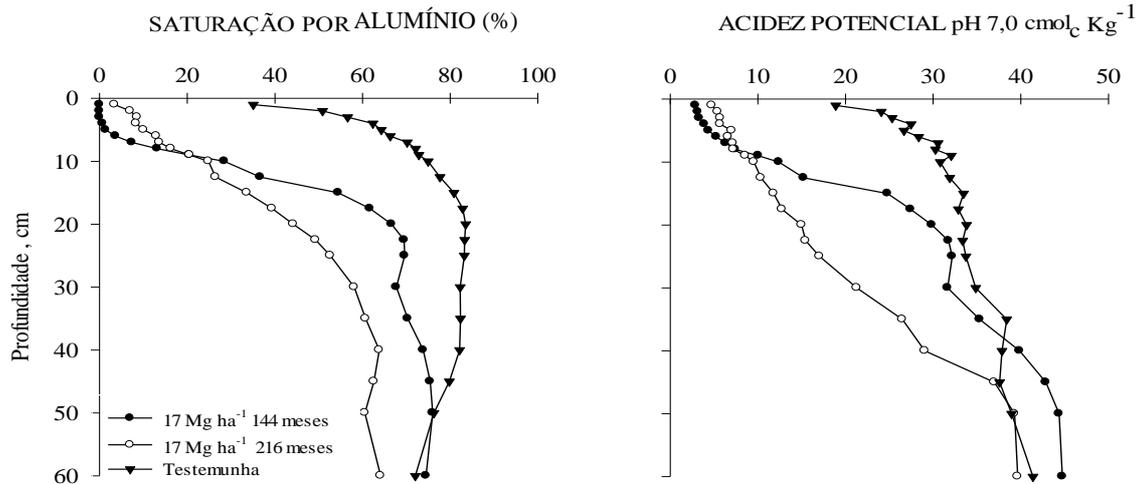
4.3.5 Análise da reacidificação do solo em relação à progressão da frente de neutralização

O processo de acidificação do solo acontece naturalmente e sua intensidade é dependente das características intrínsecas ao solo, do ambiente e das perturbações a que o sistema é submetido (Kaminski & Rheinheimer, 2000). Em condições naturais, a acidez dos solos pode ser ocasionada pela ocorrência de material de origem com baixos teores de cátions de caráter básico e pela remoção de cátions básicos do complexo de troca e consequente acúmulo de cátions de natureza ácida, especialmente em regiões com elevadas taxas de precipitação pluvial (Sousa et al., 2007). Quando a remoção dos cátions é maior que a taxa de liberação pelo intemperismo, o pH do solo diminui e o solo se acidifica. Independentemente do tipo de manejo utilizado, a utilização do solo para a produção agrícola faz com que o processo seja acelerado.

A reacidificação do solo no tratamento testemunha (sem revolvimento do solo) não foi verificada no intervalo de 6 anos entre as duas amostragens (Dados não mostrados). Os valores de saturação por Al e de acidez potencial mantiveram-se praticamente idênticos, sendo maiores que 70% e 27 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ já nos primeiros 10 cm de profundidade. Quando se aplicou a dose recomenda de 17 Mg ha^{-1} , estes valores foram significativamente reduzidos e se mantiveram inferiores aos observados no tratamento testemunha, mesmo após longo período da aplicação (18 anos) independentemente do modo de aplicação (Figura 6).

O monitoramento dos atributos do solo por longo período em experimentos com a temática da calagem é escasso no Rio Grande do Sul, no Brasil e no mundo. O processo de acidificação do solo, a partir da aplicação da dose de calcário recomendada, causado pela ação dos agentes do intemperismo não foi suficiente em liberar quantidades de Al trocável e de H+Al para que a acidez do solo retornasse a valores próximos da condição inicial do solo, mesmo 216 meses decorridos da última aplicação de corretivo. Mesmo após longo período subsequente à adição de calcário, o solo não retorna ao seu estado natural. Azevedo et al. (1996) observaram que os efeitos da calagem se mantiveram após 23 anos da sua aplicação num Latossolo Bruno, cujos valores de pH, Ca e Mg trocáveis foram superiores ao tratamento controle, enquanto que os teores de Al trocável continuaram mais baixos do que os do solo na condição natural. Estes autores verificaram que a magnitude dos efeitos da calagem provocou inclusive alterações mineralógicas.

SUPERFICIAL



INCORPORADO

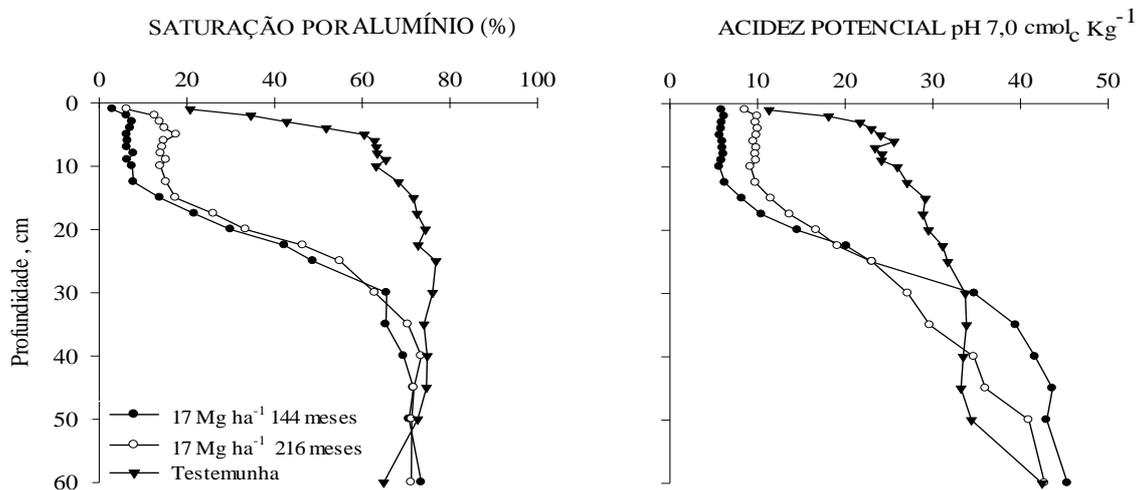


Figura 6. Valores de saturação por alumínio e acidez potencial a pH 7,0 no solo de diferentes camadas após 144 e 216 meses após a aplicação de 17 Mg ha⁻¹ de calcário superficial e incorporado.

Quando o calcário foi aplicado na superfície do solo sem incorporação, aos 144 meses da aplicação foram observados valores de saturação por Al inferiores a 10% até os 5 cm de solo. A partir desta camada, o solo apresentou valores superiores a 60% aos 20 cm aproximando-se dos observados para o tratamento testemunha nas camadas mais profundas. Após 216 meses da aplicação de calcário verificou-se um aumento nos valores de saturação por Al e H+Al nas camadas superficiais (0-5 cm) cruzando-se com os valores observados aos 144 meses aos 10 cm e diminuindo em todas as camadas amostradas. No solo das camadas subsuperficiais a redução foi bastante pronunciada, com diminuição de até 20% de saturação por Al na camada de 20 a 30 cm. Estas verificações são um indicativo que está ocorrendo

reacidificação lenta a partir da superfície e, assim, para que se mantenham condições favoráveis ao desenvolvimento das plantas dever-se-ia realizar a reaplicação de calcário na superfície. Também é possível afirmar que os produtos da calagem superficial ainda mantêm efeitos na correção das camadas mais profundas. Contudo, a progressão da frente de neutralização é extremamente lenta, pois mesmo que o solo destas camadas ainda esteja sendo modificado, a aplicação da dose integral recomendada não foi suficiente para corrigir o solo de forma significativa quando considerados as faixas de disponibilidade preconizadas pela CQFS-RS/SC (2004).

A incorporação do calcário foi mais eficiente em amenizar a acidez do solo até camadas mais profundas do perfil do solo e os efeitos da correção mantiveram-se persistentes após 216 meses em relação a calagem superficial (Figura 6). Não foram observadas diferenças entre os valores de saturação por Al entre as duas épocas de avaliação abaixo dos 20 cm. Todavia, na camada superficial a saturação por Al praticamente dobrou até 12,5 cm aos 216 meses, passando de valores de 8 para 17%, indicando que o processo de reacidificação ocorreu de forma mais expressiva apenas nos primeiros centímetros do perfil do solo. A incorporação de calcário antes da instalação do SPD promove a correção da acidez do solo em camadas mais profundas e esta é a garantia de que por longo tempo não haverá restrições químicas ao crescimento radicular (Kaminski et al., 2007). Com o passar do tempo, o solo das camadas superficiais começa a se reacidificar pelo processo natural de intemperismo e pelos processos induzidos pelo manejo e cultivo das plantas, apresentando necessidade de correção. Nesta situação, a calagem superficial é uma boa estratégia de aplicação de calcário, pois as modificações efetivas na eliminação dos efeitos deletérios da acidez são restritas aos primeiros centímetros do solo (Caires et al., Rheinheimer et., 2000; Gatiboni et., 2003; Kaminski et al., 2005; Costa & Rosolem 2007).

4.3.6 Problemática da interpretação estatística de até onde se propaga o efeito da calagem superficial em profundidade

A forma mais usual de interpretação dos resultados nos trabalhos relacionados ao tema é a mensuração através de métodos estatísticos. Quando se utiliza tal forma de análise, assume-se que as diferenças significativas encontradas entre o parâmetro observado nos tratamentos em relação ao tratamento controle representam os efeitos da calagem no solo.

Neste caso, pequenas alterações, como variações de 0,1 unidades de pH ou $\pm 5\%$ na saturação por Al e saturação por bases, podem ser significativas, mas sob ponto de vista agrônomo não representam relevância alguma (Kamiski et al., 2005).

A outra forma que pode ser utilizada para avaliar os efeitos da calagem é quando se observam aspectos agrônomo relativos ao desenvolvimento das plantas. Nesta condição, não são consideradas faixas ideais preestabelecidas para os atributos químicos associados à acidez do solo e à possível resposta das plantas quando o ambiente de crescimento radicular apresentar teores enquadrados nestas faixas. Neste trabalho a eficiência efetiva da correção da acidez foi avaliada de acordo com os critérios adotados pela CQFS RS/SC (2004) para a tomada de decisão para reaplicação de calcário em solos manejados sob o SPD, que são valores de pH iguais ou maiores que 5,5, saturação por bases iguais ou superiores a 65% e saturação por Al inferiores a 10% (Tabela 1). Para Ca e Mg trocáveis utilizou-se a faixa de boa disponibilidade com teores superiores a 4,0 e 1,0 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1. Faixas de interpretação preconizadas pela CQFS-RS/SC (2004) como critério para a tomada de decisão de reaplicação de calcário em sistema plantio direto.

Atributo	Baixo	Médio	Bom
pH em água			> 5,5
Cálcio trocável, $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$	≤ 2	2,1 – 4	> 4
Magnésio trocável, $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$	$\leq 0,5$	0,6 -1	> 1
Saturação por Al, %			< 10
Saturação por bases, %			> 65

Na literatura vários autores têm estudado a eficiência da calagem superficial sobre os atributos químicos do solo relacionados à acidez utilizando comparações estatísticas (Potter & Bem, 1998; Petere & Anghinoni, 2001; Gatiboni et al., 2003; Kaminski et al., 2005; Caires et al., 2005; Caires et al., 2008). Todos esses trabalhos relatam alterações significativas dos atributos químicos da camada superficial do solo em comparação à condição original quando aplicadas as doses integrais recomendadas para a elevação do pH do solo para 6,0. A magnitude dos efeitos em profundidade é variável de acordo com as características do solo, como textura e estrutura; dose aplicada; tempo de aplicação e atributo considerado. Em relação às camadas subsuperficiais, em alguns casos são observadas efeitos significativos na elevação do pH e da saturação por bases e redução na saturação por Al até a profundidade de 60 cm com aplicação de doses de 2 a 5,5 Mg ha^{-1} , em solos de textura média e argilosa num

espaço de tempo de 12 a 72 meses (Oliveira & Pavan, 1996; Silva et al., 2007; SoratTo et al., 2008).

No presente trabalho, aos 216 meses da aplicação dos tratamentos foram observados efeitos significativos estatisticamente em profundidades de 7 a 60 cm, dependendo da dose aplicada, modo de aplicação e do atributo considerado (Tabela 2). Para o tratamento onde foi aplicada superficialmente a dose de 17 Mg ha⁻¹ recomendada para elevar o pH a 6,0 na instalação do experimento, observou-se alteração significativa do pH; saturação por Al e saturação por bases até os 60; 45 e 30 cm de profundidade, respectivamente. Já no tratamento onde se aplicou a mesma dose incorporada, observou-se diferenças significativas até 60 cm de profundidade para o pH, e até 25 e 22,5 cm para saturação por Al e saturação por bases, respectivamente. Este comportamento é justificado pelo fato que com a incorporação a dose de calcário é diluída na camada onde é realizada a mobilização do solo e com isso há uma mistura mais eficiente entre o corretivo e o solo, aumentando a velocidade com que o calcário é consumido e com que seus produtos atuam na neutralização da acidez. Os valores dos atributos químicos nesta camada mostraram que a acidez foi amenizada com maior intensidade e o solo das camadas subsuperficiais (>10 cm) sofreu alterações após a correção da camada mobilizada, com a formação de um gradiente de neutralização.

Ao avaliar os valores dos atributos químicos de acordo com os limites estabelecidos como adequados para um bom desenvolvimento das plantas, observamos que as profundidades modificadas pela calagem superficial e incorporada foram menores que às observadas pela comparação estatística (Tabela 2). Os valores de pH e saturação por bases e saturação por Al foram insuficientes para manter um ambiente quimicamente favorável ao desenvolvimento radicular, em todo o perfil do solo, de acordo com os padrões adotados pela CQFS RS/SC (2004) para a recomendação da calagem. Os teores de Ca trocável mantiveram valores adequados até 15 cm somente na maior dose aplicada independente do modo de aplicação. Já os teores de Mg trocáveis mantiveram-se dentro da faixa de valores estabelecida até os 60 cm de profundidade em todos os tratamentos.

Os resultados obtidos sugerem que na interpretação dos efeitos significativos da calagem por comparação estatística entre os tratamentos e a condição natural, há uma superestimação da profundidade alterada em relação à significância agrônômica. A discrepância entre os métodos de interpretação utilizados pode ser atribuída ao erro experimental. O número adequado de repetições pode aumentar a precisão do experimento, ou seja, melhorar a capacidade de um teste estatístico em detectar diferenças menores entre as estimativas das médias dos tratamentos (Velini et al., 2006). Assim, pode-se afirmar que o

solo fora corrigido até determinada profundidade; no entanto a melhoria dos atributos da acidez do solo não é adequada para garantir uma boa produtividade das plantas cultivadas de acordo com os padrões agronômicos estabelecidos.

Tabela 2. Profundidade do solo modificada pela aplicação de calcário aplicado na superfície, avaliada pela análise estatística convencional ($p < 0,05$), pelas faixas de disponibilidade da CQFS-RS/SC (2004) e considerando recomendações de Almeida et al. (1999).

Atributo	Superficial (Mg ha ⁻¹)			Incorporado (Mg ha ⁻¹)		
	2+2+2+2	8,5	17	2+2+2+2	8,5	17
<i>Interpretação estatística</i>			cm			
Saturação por Al	30	40	45	17,5	20	25
pH em água	60	60	60	60	60	60
Ca trocável	15	40	60	7	20	20
Mg trocável	25	60	60	25	25	30
Saturação por bases	15	15	30	12,5	17,5	22,5
<i>Interpretação CQFS-RS/SC</i>						
Saturação por Al	1	1	4	1	1	1
pH em água	n	N	n	n	N	n
Ca trocável	5	2	15	1	N	15
Mg trocável	22,5	60	60	60	60	60
Saturação por bases	n	N	4	n	N	n
<i>Interpretação Almeida et al. (1999)</i>						
Saturação por Al	1	1	1	1	1	5
pH em água	n	N	1	1	n	17,5
Ca trocável	22,5	60	60	25	25	30
Mg trocável	22,5	60	60	69	60	60
Saturação por bases	n	N	n	1	n	9

A interpretação agronômica dos parâmetros de acidez do solo também foi realizada segundo as faixas estabelecidas por Almeida et al. (1999), onde assume-se que a toxidez de Al é praticamente ausente em solos com pH superior a 5,1, a fim de verificar se existe coerência dos resultados (Tabela 2). Foram considerados como valores críticos pH maior que 5,1; saturação por Al menor que 12% e saturação por bases maior que 50%. (Tabela 2). Além disso, foram considerados valores de 1 cmol_ckg⁻¹ para Mg trocável e a faixa de 1,5 a 3 cmol_ckg⁻¹ para valores de Ca trocável. Mesmo com a redução dos limites estabelecidos os valores de saturação por Al mantiveram-se adequados somente até os 5 cm na maior dose aplicada superficialmente. Nos demais tratamentos a camada de solo de 0-1 cm apresentou

valores adequados, provavelmente por ocorrer uma maior complexação de Al trocável por compostos orgânicos produzidos a partir da decomposição vegetal (Alleoni et al., 2010).

Os valores de pH e saturação por bases foram suficientes para manter um ambiente quimicamente favorável ao desenvolvimento radicular apenas no tratamento com aplicação da dose integral recomendada com incorporação até os 17,5 e 9 cm de profundidade, respectivamente, em todo o perfil do solo, de acordo com os padrões adotados pela CQFS RS/SC (2004) para a recomendação da calagem. Já os teores de Ca trocável mantiveram valores adequados até os 60 cm para a maior dose e até os 22,5 e 25 cm para os tratamentos em que se aplicou 8 (2+2+2+2) e 8,5 Mg ha⁻¹. Já os teores de Mg trocáveis mantiveram-se dentro da faixa de valores estabelecida até 60 cm de profundidade em todos os tratamentos.

4.4 Conclusões

- 1- Após 18 anos da aplicação de calcário, o processo de reacidificação não liberou sequer a metade da quantidade de Al trocável e menos de um terço da quantidade de acidez potencial originais do solo.
- 2- A aplicação de calcário promoveu a formação de gradiente de alcalinização no perfil do solo a partir da profundidade de aplicação, o que manteve alterados os atributos associados à acidez do solo até 60 cm de profundidade após 18 anos.
- 3- A progressão da frente de neutralização ocorreu de forma lenta quando o calcário foi aplicado superficialmente e manteve longo efeito residual.
- 4- A calagem incorporada apresentou maior eficiência na amenização da acidez do solo e manutenção dos efeitos corretivos na camada de 8 – 12 cm de profundidade do solo.

4.5 Referências

ALLEONI, L.R.F., CAMBRI, M.A., CAIRES, E.F., GARBUIO, F.J. Acidity and aluminum speciation as affected by surface liming in tropical no-till soils. *Soil Science Society of America Journal*. 74, 1010-1017, 2010.

ALMEIDA, J.A.; ERNANI, P.R. & MAÇANEIRO, K.C. Recomendação alternativa de calcário para solos altamente tamponados do extremo Sul do Brasil. *Ci. Rural*, 29:651-656, 1999.

AZEVEDO, A.C.; KÄMPF, N. & BOHNEN, H. Alterações na dinâmica evolutiva de Latossolo Bruno pela calagem. *R.Bras. Ci. Solo*, 20:191-198, 1996.

BORTOLUZZI, E.C.; GARBOZZA, L.; GUARESCHI, C. & RHEINHEIMER, D.S. Efeito da calagem na relação entre solo e água. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:2621-2628, 2008.

BORTOLUZZI, Edson Campanhola et al. Soybean root growth and crop yield in response to liming at the beginning of a no-tillage system. *Rev. Bras. Ciênc. Solo* .vol.38, n.1, pp. 262-271, 2014.

CIOTTA, M.N.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; FONTOURA, S.M.V.; ALBUQUERQUE, J.A. & WOBETO, C. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:1055-1064, 2002.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & KAISER, D.R. Compactação de um latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:933-942, 2008.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 3.ed. Passo Fundo SBCS - Núcleo Regional Sul/Embrapa/CNPT, 224p, 1994.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Porto Alegre, SBCS - Núcleo Regional Sul,. 394p, 2004.

COSTA, A.; ROSOLEM, C.A. Liming in the transition to no-till under a wheat-soybean rotation. *Soil and Tillage Research*, v.97, p.207-217, 2007.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Serviço de Produção de Informação, 412p, 1999.

GATIBONI, L.C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; FLORES, J.P.C.; KAMINSKI, J. & RHEINHEIMER, D.S. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. *Ci. Rural*, 33:282-290, 2003.

KAMINSKI, J. Fatores de Acidez e Necessidade de Calcário em Solos do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, UFRGS, Faculdade de Agronomia, (Tese M.S.). 94p, 1974.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S. A acidez do solo e a nutrição mineral de plantas. In: KAMINSKI, J. (Ed.). *Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto*. Pelotas : SBCS/NRS. Cap.2, p.21-39, 2000.

KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; SANTOS, E.J.S.; GATIBONI, L.C.; BORTOLUZZI, E.C. & XAVIER, F.M. Resposta de culturas à aplicação de calcário em superfície ou incorporado ao solo a partir da pastagem natural. *Ci. Rural*, 30:605-609, 2000.

KAMINSKI, J.; SANTOS, D.R.; GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G. & SILVA, L.S. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um Argissolo sob pastagem natural. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:573- 580, 2005.

KAMINSKI, J.; SILVA, L. S.; CERETTA, C. A.; RHEINHEIMER, D. S. Acidez e calagem em solos do sul do Brasil: aspectos históricos e perspectivas futuras. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Eds.). *Tópicos em ciência do solo*. Vicosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 307-332 p, 2007.

MARCOLAN, Alaerto Luiz & ANGHINONI, Ibanor. Atributos físicos de um argissolo e rendimento de culturas de acordo com o revolvimento do solo em plantio direto. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*, vol.30, n.1, pp. 163-170, 2006.

MARTINAZZO, R. Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob sistema plantio direto consolidado. 2006. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)– Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

MIELNICZUK, J.; LUDWICK, A. & BOHNEN, H. Recomendações de adubo e calcário para as principais culturas do Estado do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 36p. (Boletim Técnico, 2) , 1969.

MOHR, W. A influencia da acidez sobre a fertilidade dos solos. In: Congresso Nacional de Conservação do solo. Anais. Campinas, Soc. Bras. Ci. Solo. Campinas, 1960.

MOHR, W. Análise de solos para fins de assistência aos agricultores. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 1., , Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1950. p.185-215, 1947.

RHEINHEIMER, D. S.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade de fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, v. 38, p. 576-586 , 2008.

RHEINHEIMER, D.S.; SANTOS, E.J.S.; KAMINSKI, J.; GATIBONI, L.C. & BORTOLUZZI, E.C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:797-805, 2000.

SANTIN, C.; REINERT, D.J.; CAMPOS, B.C. & GENEZINI, F. Ação do preparo convencional sobre a agregação do solo em área anteriormente cultivada sob plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 10., Florianópolis. Anais. Florianópolis, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.270-271, 1994.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; DIAS JÚNIOR, M.S.; IMHOFF, S. & KLEIN, V.A. Indicadores da qualidade física do solo. In: JONG van LIER, Q., ed. Física do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.241-281, 2010.

SILVA, M. A. C.; NATALE, W.; PRADO, R. DE M; CORREA, M. C. M.; STUCHI, E. S.; ANDRIOLI. Aplicação superficial de calcário em pomar de laranjeira pêra em produção. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v.29, p.606-612, 2007

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N. & OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. Fertilidade do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.205-274, 2007.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.; BOHNEN, H.& VOLKWEISS, S.J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 174p. (Boletim Técnico, 5) , 1995.

VELINI, E.D.; PALMA, V.; SOUZA, L.S.; MARTINS, D. Interferência de plantas daninhas na cultura do milho. I – Efeito do número de repetições sobre a precisão dos resultados obtidos. *Planta Daninha*, Viçosa, MG, v.24, n.3, p.435-442, 2006.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

1. A calagem tem longo efeito residual no solo. Mesmo após 24 anos sem reaplicar calcário, a liberação de Al trocável e o aumento da acidez potencial não foi suficiente para atingir patamares de acidez próximos dos observados para o solo em sua condição natural.
2. A aplicação superficial de calcário promove a formação de uma frente alcalinizante a partir da superfície do solo que avança lentamente às camadas mais profundas do perfil do solo. A amenização da acidez do solo pela migração dos agentes neutralizantes aumenta o pH e a concentração de bases trocáveis e reduz os teores de alumínio tóxico até os 60 cm de profundidade, no entanto não foi capaz de manter um ambiente adequado ao crescimento radicular abaixo dos 10 cm de profundidade.
3. A incorporação do calcário acelera a sua reação no solo e neutralização da acidez ocorre rapidamente na camada em que o solo foi mobilizado. O restante dos produtos da dissolução do calcário que não reagiram e as partículas finas de calcário migram lentamente para camadas mais profundas do perfil do solo similarmente ao que ocorre quando o calcário é aplicado na superfície, sem incorporação.
4. A aplicação de calcário com incorporação antes de se iniciar o sistema plantio direto é a garantia que o solo, especialmente nas camadas subsuperficiais não apresentará restrições ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas. A reacidificação do solo é facilmente controlada pela reaplicação superficial de calcário de acordo com o monitoramento da acidez do solo por meio de amostragens periódicas do solo.