

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DE UM  
LATOSSOLO ARGILOSO AFETADAS POR  
DIFERENTES TIPOS E FORMAS DE APLICAÇÃO  
DE CALCÁRIO**

**GUILHERME LUIZ PARIZE**

**Orientador: Prof. Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi**

**Co-orientador: Prof. Dr. Danilo dos Santos Rheinheimer**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Produção Vegetal.

Passo Fundo, março de 2012

**UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO**  
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DE UM  
LATOSSOLO ARGILOSO AFETADAS POR  
DIFERENTES TIPOS E FORMAS DE APLICAÇÃO  
DE CALCÁRIO**

**GUILHERME LUIZ PARIZE**

**Orientador: Prof. Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi**

**Co-orientador: Prof. Dr. Danilo dos Santos Rheinheimer**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – Área de Concentração em Produção Vegetal.

Passo Fundo, março de 2012



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO  
FACULDADE DE AGRONOMIA E MEDICINA VETERINÁRIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL



A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação.

"Propriedades químicas e físicas de um latossolo argiloso  
afetadas por diferentes tipos e formas de aplicação de calcário"


Elaborada por

GUILHERME LUIZ PARIZE

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em  
Agronomia – Área de Produção Vegetal

Aprovada em: 30/03/2012  
Pela Comissão Examinadora

  
Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi  
Presidente da Comissão Examinadora  
Orientador

  
Dra. Simone Meredith Scheffer Basso  
Coord. Prog. Pós-Graduação em Agronomia

  
Dr. João Kaminski  
UFSM

  
Dr. Hélio Carlos Rocha  
Diretor FAMV

  
Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva  
UFSM

## CIP – Catalogação na Publicação

- 
- P234p Parize, Guilherme Luiz  
Propriedades químicas e físicas de um latossolo argiloso  
afetadas por diferentes tipos e formas de aplicação de calcário /  
Guilherme Luiz Parize. – 2012.  
89 f. : il. color. ; 25 cm.
- Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de  
Passo Fundo, 2012.  
Orientador: Prof. Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi.  
Coorientador: Prof. Dr. Danilo dos Santos Rheinheimer.
1. Solo - calcário. 2. Solo – propriedades químicas. 3. Solo  
– propriedades físicas. 4. Plantio direto. I. Bortoluzzi, Edson  
Campanhola, orientador. II. Santos, Danilo Rheinheimer dos,  
coorientador. III. Título.

CDU: 631.4

---

Catalogação: Bibliotecária Fernanda Spindola - CRB 10/2091

*A minha base familiar,  
que são as pessoas que sempre  
me apoiaram nessa árdua caminhada,  
meu pai Miguel, minha mãe Maria,  
minha irmã Grazielle e minha namorada Camilla...*

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

*Primeiramente a DEUS, sem o qual nada disso seria possível.*

*Aos meus pais Miguel e Maria pelo exemplo dado em cada dia de convívio, exemplo de que na vida a luta por nossos sonhos e objetivos e dá todos os dias, e somente se conseguirá alcançá-los com dedicação contínua e trabalho duro.*

*À minha irmã Grazielle pelo incentivo, embora a distância não nos permita um maior convívio.*

*A minha namorada Camilla Weber Langhinotti pelo acolhimento, por todo amor a mim destinado, pelas palavras de incentivo, pela dedicação incondicional em todos aqueles momentos em que mais precisei.*

*À UPF pela acolhida e pela bolsa.*

*À Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária da UPF, por proporcionar as condições de desenvolvimento dessa etapa extremamente importante.*

*Ao Professor Dr. Edson Campanhola Bortoluzzi, pela oportunidade de trabalho, pelo qual demonstro grande admiração por sua capacidade, dedicação e profissionalismo, o meu agradecimento pela oportunidade de ter seus ensinamentos, orientação e amizade.*

*À Professora Dra. Cláudia Petry pelas palavras de incentivo na hora certa, e pela dedicação e amor com que realiza seu trabalho.*

*Ao Professor Dr. João Kaminski pela cessão da área do experimento por ele instalado e Dr. Danilo dos Santos Rheinheimer pela co-orientação.*

*Aos demais professores da FAMV/UPF e do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pelos valiosos ensinamentos.*

*Ao professor e amigo Cristiano Reschke Lajús pelos ensinamentos da graduação e por todo o incentivo em começar essa etapa que se finda hoje. Devo lhe agradecer pelos momentos difíceis em que me ajudou principalmente quando do meu acidente, serei eternamente grato ao nobre irmão.*

*Aos amigos e colegas do PPGagro.*

*Aos amigos e bolsistas de iniciação científica e colegas do Laboratório de Uso e Manejo do Território e de Recursos Naturais/FAMV – UPF:*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>XI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>4</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 Alterações das propriedades químicas do solo decorrentes da calagem</b>	<b>7</b>
<b>2.2 Formas de aplicação de calagem</b>	<b>9</b>
2.2.1 Calagem Superficial .....	9
2.2.2 Calagem Incorporada .....	10
<b>2.3 Tipos de calcário e consequência sobre propriedades do solo</b>	<b>11</b>
<b>2.4 Alterações nas propriedades físicas do solo decorrentes da calagem</b>	<b>13</b>
<b>2.5 Alterações morfológicas de raízes</b>	<b>17</b>
2.5.1 Impedimento físico (camadas compactadas).....	17
2.5.2 Impedimento químico por Al ao crescimento radicular .....	18
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Localização e caracterização do local</b>	<b>21</b>
<b>3.2 Caracterização dos tratamentos: experimento Holzschuh (2007)</b>	<b>22</b>
<b>3.3 Estratégia de coleta de material</b>	<b>23</b>
<b>3.3.1 Estudo 1: estudo geral do experimento</b>	<b>24</b>
<b>3.3.1.1 Coleta das amostras de solos e análises químicas</b>	<b>24</b>
<b>3.3.1.2 Coleta das amostras para análises físicas</b>	<b>25</b>
<b>3.3.1.2.1 Estabilidade de agregados</b>	<b>25</b>
3.3.1.2.2 Resistência mecânica do solo à penetração .....	27
3.3.1.3 Coleta das amostras e análises de rendimento de grãos e palha de aveia.....	27
3.3.1.3.1 Palha de aveia .....	27
3.3.1.3.2 Rendimento soja .....	28
3.3.1.3.3 Coleta das amostras: volume e comprimento da raiz .....	28
3.3.1.4 Análise estatística adotada no estudo 1 .....	28



<b>3.3.2 Estudo 2: estudo da morfologia de raízes e de propriedades físicas e químicas</b>	<b>29</b>
3.3.2.1 Resistência mecânica do solo a penetração .....	29
3.3.2.2 Trincheira e coleta de imagens .....	30
3.3.2.3 Amostragem de solo para análises químicas e físicas .....	31
<b>3.4 Análise estatística: estudo 2</b>	<b>32</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1 ESTUDO 1.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1.1 Formas de aplicação e tipos de calcário e sua relação com as propriedades químicas do solo</b>	<b>33</b>
4.1.1.1 pH em água.....	33
4.1.1.2 Teor de alumínio .....	35
4.1.1.3 Teor de cálcio .....	37
4.1.1.4 Teor de magnésio .....	40
4.1.2 Formas de aplicação e tipos de calcário e sua relação com as propriedades físicas do solo .....	41
4.1.2.1 Distribuição de agregados em água.....	41
4.1.2.1.2 Diâmetro médio ponderado (DMP).....	43
4.1.2.1.3 Diâmetro médio geométrico (DMG).....	45
4.1.2.1.4 Índice de estabilidade de agregados (IEA).....	46
4.1.2.1.5 Resistência mecânica do solo a penetração (RP) .....	47
4.1.3 Formas de aplicação e tipos de calcário e sua relação com as variáveis relacionadas à raiz da soja.....	49
4.1.3.1 Comprimento da raiz principal de soja.....	49
4.1.3.2 Volume de raiz de soja .....	50
4.1.4 Formas de aplicação e tipos de calcário e sua relação com as produtividades de aveia e soja.....	51
4.1.4.1 Massa seca palha aveia.....	51
4.1.4.2 Rendimento de grãos de soja.....	52
<b>4.2 ESTUDO 2.....</b>	<b>54</b>
4.2.1 Discussão geral quanto aos fatores responsáveis pelo impedimento radicial .....	65
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>68</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>69</b>

### LISTA DE TABELAS

<b>Tabela</b>		<b>Página</b>
01	Atributos químicos e físicos do local antes da instalação do experimento/ out. 2004. FAMV, Passo Fundo, RS .....	21
02	Diâmetro médio ponderado (DMP) de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário. FAMV, Passo Fundo, RS.....	45
03	Diâmetro médio geométrico (DMG) de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário. FAMV, Passo Fundo, RS .....	47
04	Índice de estabilidade de agregados (IEA) de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário. FAMV, Passo Fundo, RS .....	48
05	Resistência mecânica do solo a penetração (RP) de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário FAMV, Passo Fundo, RS .....	49
06	Comprimento da raiz principal (cm) de soja em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário em um latossolo argiloso. FAMV, Passo Fundo, RS .....	50
07	Volume da raiz (cm <sup>3</sup> ) de soja em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário em um latossolo argiloso. FAMV, Passo Fundo, RS .....	52
08	Rendimento de massa seca de aveia em função do tipo de calcário e da forma de aplicação. FAMV, Passo, Fundo, RS .....	52
09	Rendimento de grão de soja em função do tipo de calcário e da forma de aplicação. FAMV, Passo Fundo, RS .....	54

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
01	Esquema de coleta de dados da RP de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário. FAMV, Passo Fundo, RS .....	30
02	Trincheira para coleta das imagens em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário	31
03	pH em água em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário.....	35
04	Teor de alumínio ( $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ ) em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário	37
05	Teor de cálcio ( $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário	39
06	Teor de magnésio ( $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário	41
07	Distribuição de agregados em água em função da forma de aplicação, tipo de calcário e profundidade. FAMV, Passo Fundo, RS .....	43
08	Tratamento calcítico de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário. FAMV, Passo Fundo, RS .....	56
09	Tratamento cal. 1:1 dolo. de um Latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário. FAMV, Passo Fundo, RS	60
10	Tratamento dolomítico de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário. FAMV, Passo Fundo, RS ...	62
11	Tratamento testemunha de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário. FAMV, Passo Fundo, RS ..	65

**PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS DE UM  
LATOSSOLO ARGILOSO AFETADAS POR DIFERENTES  
TIPOS E FORMAS DE APLICAÇÃO DE CALCÁRIO**

**GUILHERME LUIS PARIZE<sup>1</sup>**

**RESUMO** – O estudo foi realizado com o intuito de avaliar as propriedades químicas e físicas de solo afetadas por diferentes formas de aplicação de calcário dolomítico e calcítico, bem como avaliar o efeito sobre a produção de plantas. Um experimento sobre Latossolo Vermelho distroférico argiloso foi avaliado 5 anos após sua instalação. Atributos de solo foram medidos: físicos (resistência a penetração, densidade do solo e agregação); químicos (pH, cátions trocáveis, H+Al e capacidade de troca de cátions) e de planta (morfologia do sistema radicial da soja e rendimentos). Após cinco anos da aplicação superficial dos calcários, o solo manteve a acidez corrigida, principalmente na camada de 0-5 cm, enquanto que com a incorporação os efeitos foram até 20 cm de profundidade. A produção de plantas não respondeu a nenhum tratamento, porém o sistema radicial de soja foi mais profundo (chegando a 40 cm) sob os tratamentos onde o calcário foi incorporado. Com a aplicação superficial dos calcários o crescimento radicial limitou-se a 10 cm de profundidade. Pode-se concluir com o trabalho que: após cinco anos

---

<sup>1</sup> Engenheiro Agrônomo, Mestrando do Programa de Pós Graduação em Agronomia (PPGAgro) da FAMV/UPF, Área de Concentração em Produção Vegetal.

da aplicação dos tratamentos, o efeito dos diferentes calcários e sua combinação sobre os parâmetros estudados é marginal; a forma de aplicação dos calcários é fundamental no crescimento radicial da soja, tendo o fator químico como principal mecanismo de impedimento ao crescimento radicial em profundidade.

**Palavras-chave:** tipos de calcários; impedimento químico e físico ao crescimento radicial; resistência mecânica à penetração; plantio direto consolidado

## **CHEMICAL AND PHYSICAL PROPERTIES OF A CLAYEY OXISOL AFFECTED BY DIFFERENT TYPES AND FORMS OF LIMING**

**ABSTRACT** – This study was performed for the purpose of evaluating the chemical and physical properties of soil affected by different forms of application of dolomitic and calcitic lime, as well as evaluate their effect on plant yield. An experiment in respect to clayey Latossolo Vermelho distroférico (Rhodic Hapludox [Oxisol]) was evaluated five years after installation. The following soil attributes were measured: physical attributes (cone index, bulk density and aggregation indexes); chemical attributes (pH, exchangeable cations, H+Al and cation exchange capacity) and plant attributes (soybean root system morphology and crop yields). Five years after surface lime applications (or since 2004), the soil has maintained low acidity,

mainly in the 0-5 cm layer, while with incorporation, effects were observed up to a 20 cm depth. There was no response in plant yield to any treatment; however, the soybean root system was deeper (arriving at a depth of 40 cm) under the treatments where the lime was incorporated. With surface liming, root growth was limited to a 10 cm depth. From this study, it may be concluded that five years after application of the treatments, the effect of different forms of lime and their combination on the parameters studied is marginal; the form of lime application is fundamental to root growth of the soybeans, with the chemical/acidity factor being the main mechanism impeding deep root growth.

**Keywords:** types of lime; chemical and mechanical root impedance; cone index; consolidated no-till system

## 1 INTRODUÇÃO

Em sistemas produtivos nos trópicos e subtropicais, a calagem é uma prática essencial para a agricultura por elevar e manter a produtividade das culturas em solos ácidos ou acidificados. A importância da calagem é decorrente principalmente pelos benefícios nas propriedades químicas do solo, que facilitam o desenvolvimento radicial.

Existem vários tipos de calcário no Brasil. Os localizados no sul do País são oriundos de rochas de origem metamórfica. A composição dos calcários é regulamentada em legislação, porém prevêem-se dois tipos calcários, segundo a composição química entre Cálcio e Magnésio: os calcíticos e os dolomíticos.

A forma de aplicação e a dose de corretivo seguem o recomendado pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (CQFS RS/SC, 2004). A elevação do pH do solo em terras agrícolas, reduzindo os efeitos da acidez e eliminando o alumínio tóxico do solo, aumentando os teores de cálcio e magnésio, a disponibilidade de nutrientes e por consequência a capacidade de troca de cátions do solo são os efeitos diretos melhor conhecidos nos sistemas de culturas.

Normalmente, a calagem em sistema plantio convencional é realizada de modo superficial seguido de incorporação, enquanto no sistema de semeadura direta reacidificado, o calcário é aplicado e mantido em superfície. Os efeitos dessa intervenção sobre as propriedades químicas do solo são bem conhecidos e reportados na literatura. Contudo, as consequências da escolha de formas e tipos de

calagem produzem alterações nas propriedades físicas dos solos e ainda são pouco estudadas.

É compreensível que o modo de aplicação do corretivo afeta as propriedades físicas, pela ação de implementos que movimentam o solo. Entretanto, alguns estudos sugerem que algumas propriedades físicas, tais como retenção de água a potenciais elevados e microagregação são afetadas diretamente por doses crescentes de calcário. Em função do exposto, ainda resta entender como diferentes tipos de calcários, como os dolomíticos e os calcíticos aplicados de diferentes modos interferem em propriedades químicas e físicas do solo. Ademais, a escolha do tipo de calcário assim como a forma de sua aplicação deve estar em acordo com o objetivo que se deseja dentro do sistema de produção adotado. Nesse sentido, se busca em sistemas de produção a longo prazo, como os que usam o sistema plantio direto, um melhor crescimento radicial de modo a explorar maiores volumes de solo, garantindo assim melhor nutrição mineral e água disponível. A calagem nesse contexto, passa a ser uma prática de amplo efeito (BORTOLUZZI & TESSIER, 2002) que deveria hipoteticamente proporcionar ao solo um nulo impedimento químico e físico ao crescimento radicial, permitindo a expressão genética das culturas em produção.

Com isso, o objetivo geral do estudo foi avaliar as alterações de algumas propriedades químicas e físicas de um Latossolo argiloso corrigido com calcário dolomítico e calcítico e em mistura sob duas formas de aplicação, e o resultado sobre a produtividade das culturas.

Como objetivos específicos do estudo:



- a) Avaliar o efeito de diferentes calcários e formas de aplicações sobre algumas propriedades químicas do solo.
- b) Avaliar algumas propriedades físicas do solo em função de diferentes calcários e formas de aplicações.
- c) Avaliar resposta de plantas (morfologia, rendimento de grãos e biomassa) em função de tipos de calcários e formas de aplicação dos corretivos.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Alterações das propriedades químicas do solo decorrentes da calagem**

A acidificação do solo é um processo natural e sua intensidade depende de fatores intrínsecos ao solo e das perturbações a que o sistema é submetido, como salientam (KAMINSKI & RHEINHEIMER, 2000). Dentre os fatores ambientais do solo, os ligados à acidez (pH, saturação por bases, acidez potencial e disponibilidade de nutrientes) são os que mais interferem na produtividade, especialmente nas regiões tropicais (SANCHEZ & SALINAS, 1983).

O pH baixo é limitante à produção vegetal para a maioria das culturas comerciais, em função principalmente da toxidez de alumínio e/ou de manganês e do desbalanço na disponibilidade de nutrientes às plantas, descritos em KAMINSKI, (1989); e RHEINHEIMER et al., (2000).

Nesse sentido, a neutralização da acidez do solo, bem como o aumento de cátions básicos (Ca e Mg) é prática obrigatória em solos ácidos do Brasil. A calagem em profundidade, conseguida em sistema plantio convencional tem excelentes resultados no Brasil desde a década de 1970, como destacam GATIBONI et al., (2003).

A adoção do sistema plantio direto (SPD) apesar de ter diminuído as perdas de solo por erosão, causou dúvidas quanto à eficiência da calagem em profundidade (PAIVA et al., 1996). Isso porque em sistema de plantio convencional, o efeito residual do

calcário, aplicado em profundidade na dose recomendada pelo SMP para pH 6,5, em solo argiloso e com alto teor de matéria orgânica, pode ultrapassar 23 anos, mantendo o pH e os teores de cálcio e magnésio trocáveis elevados e de alumínio trocável baixo (AZEVEDO et al., 1996).

Já a calagem em sistema de plantio direto (SPD) que mantém o corretivo na superfície, concentra o efeito na superfície em detrimento das camadas mais profundas (RHEINHEIMER et al., 2000). Entretanto, em um solo com boa estrutura (poroso), com altos teores de matéria orgânica se espera que haja movimentação descendente de cálcio e magnésio no perfil do solo no SPD influenciada por fatores físicos, biológicos e químicos (AMARAL & ANGHINONI, 2001; LAL & VANDOREN, 1990; RHEINEHIEMER et al., 2000).

Quanto ao fator biológico, a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo favorece o desenvolvimento de fungos e bactérias do solo, responsável pela abertura de canais, pelos quais pode ocorrer o transporte de partículas finas de calcário para a subsuperfície (LAL & VANDOREN, 1990). Contudo, estudos mostram que os efeitos da calagem em profundidade no SPD é lento, cerca de 10 cm em 48 meses (CAIRES et al., 2000; RHEINHEIMER et al., 2000). Isso está ligado ao fato que em solos sob SPD há camadas compactadas causando baixa infiltração de água (SILVA et al., 2009). Rheinheimer et al. (2000) concluíram que somente haverá efeitos da calagem em profundidade em SPD quando quimicamente o solo nas camadas superficiais fora corrigido.

Com relação ao tipo de calcário, dolomítico e calcítico, ambos apresentam capacidade de correções similares, apenas diferindo no cátion acompanhante. Visando estudar o efeito da natureza do íon acompanhante na movimentação do  $\text{Ca}^{2+}$  e sua influencia na acidez do solo em profundidade, foi conduzido um trabalho em colunas de solo, simulando o perfil de um Latossolo Vermelho Escuro, utilizando três fontes de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{CaSO}_4$ ) na quantidade de  $2 \text{ Mg ha}^{-1}$  de cálcio incorporado na camada de 0 a 15 cm. Através das colunas foi percolada água, no equivalente a 1200 mm. A fonte de calcio que proporcionou menor movimentação de  $\text{Ca}^{2+}$  em profundidade foi o  $\text{CaCO}_3$ , com maior acúmulo de 20 a 25 cm, fato compreensível, pois os íons  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  em meio ácido produzem  $\text{CO}_2$ , e conseqüentemente, não havendo um íon acompanhante para o  $\text{Ca}^{2+}$  fica completamente retido no complexo de troca da camada de incorporação. Em relação ao  $\text{CaSO}_4$  houve maior concentração de  $\text{Ca}^{2+}$  na camada entre 45 e 60 cm, evidenciando sua maior solubilidade em relação ao  $\text{CaCO}_3$ . Já, o tratamento com  $\text{CaCl}_2$ , devido a maior solubilidade e baixa reação com o solo, foi o que atingiu maiores profundidades (150 cm) (CAMILO, 2007).

## **2.2 Formas de aplicação de calagem**

### **2.2.1 Calagem Superficial**

Na condução do sistema de plantio direto com calagem superficial no sul do Brasil, temos condições de clima e de solo que

favorecem a ação corretiva no perfil do solo do calcário aplicado em superfície (SÁ, 1996).

Tem sido demonstrado que o SPD apresenta, em relação ao convencional, menor concentração de espécies de alumínio consideradas tóxicas ( $Al^{3+}$  e  $AlOH^{2+}$ ) e maior concentração de alumínio complexado com ligantes orgânicos, que determinam sua menor atividade (SALET et al., 1999).

Na condução do manejo de solo SPD a não incorporação do calcário é um aspecto trabalhado, mesmo sabendo que o calcário tem baixa solubilidade e mobilidade no perfil do solo, sendo assim de lenta reatividade (RAMOS et al., 2006).

Quando da aplicação de corretivos de acidez em superfície sua eficiência é comprovada principalmente nas camadas de até 10 cm (MOREIRA et al., 2001; AMARAL et al., 2004a) e em alguns casos em profundidades maiores que 10 cm (CAIRES et al., 2000; 2006, MELLO et al., 2003).

O deslocamento vertical de partículas finas de calcário através da continuidade porosa do solo, pelos canalículos de raízes de culturas anteriores, de galerias da meso e macrofauna do solo podem favorecer a correção da acidez do solo em profundidade (GASSEN & KOCHANN, 1998; GRIÈVE et al., 2005).

### **2.2.2 Calagem Incorporada**

A incorporação do calcário com a utilização de arado e grade tem como resultado final uma mistura eficiente calcário/solo e em uma camada onde se concentram a maior parte das raízes das culturas.

Segundo Kaminski et al. (2007), é isso que garante a eficácia da calagem anterior a condução do SPD. O início do SPD sem esse requisito deixa dúvidas quanto a qualidade química do solo em profundidades além daquelas alcançadas pela migração do corretivo da superfície, cerca de 10 cm, já discutidos no item anterior.

### **2.3 Tipos de calcário e consequência sobre propriedades do solo**

A correção da acidez, alumínio tóxico, elevação dos teores de cálcio e magnésio apresentam-se como fatores de substancial importância na elevação da produtividade das culturas (LOPES, 1983).

A calagem é adequada quando tem a capacidade no solo de elevar o pH, eliminar os efeitos tóxicos do  $Al^{3+}$ , Mn e Fe e fornecer  $Ca^{+2}$  e  $Mg^{+2}$  como nutrientes; aumentando por consequência da mudança no pH a disponibilidade do N, P, K, Ca, Mg, S e Mo no solo. Também são verificados: aumento na atividade microbiana e liberação de alguns outros nutrientes, tais como N, P, S e B; melhora a aeração do solo e a circulação de água, favorecendo o desenvolvimento das raízes das plantas. Por fim aumenta a produtividade das culturas (LOPES, 1991).

Existem no mercado corretivos da acidez do solo com características químicas e granulométricas bastante variáveis. Corretivos são os produtos que apresentem na sua composição carbonatos, óxidos, hidróxidos ou silicatos de cálcio e/ou magnésio e que tem a capacidade de produzir base ( $OH^-$ ). Os corretivos mais comuns são os calcários (carbonato de cálcio e/ou magnésio),

considerado material natural e de uso mais comum; Óxido de cálcio e de magnésio: material obtido pela calcinação total do calcário, sendo também conhecido como cal virgem; Hidróxido de cálcio e de magnésio: material obtido pela hidratação da cal virgem; Calcário calcinado: material obtido pela calcinação parcial do calcário.

Conforme prevê a legislação brasileira, os calcários agrícolas são classificados como calcíticos, quando o teor de MgO é inferior a 5% e dolomíticos quando o teor de MgO é superior a 5% (Brasil, 2004). O suprimento de Ca e Mg está normalmente vinculado à aplicação de calcário. Os calcários calcíticos contêm, em média, 45% de  $\text{CaCO}_3$  e os dolomíticos, em média, 20 a 40% de MgO (MALAVOLTA, 2006). No Rio Grande do Sul tem predomínio de jazidas de calcário dolomítico, cuja composição varia entre 26 a 28% de CaO e 14 a 18% de MgO.

A eficiência dos materiais corretivos é medida através do Poder de Neutralização e do seu efeito residual. A reação de neutralização promovida pelos óxidos e hidróxidos é muito mais rápida e enérgica que a dos carbonatos e silicatos em laboratório. Outro fator diz respeito à granulometria dos corretivos: quando maior a área de contato, portanto quando mais fino o corretivo, mais rápida é sua reação (ALCARDE, 1985).

No RS produtos de maior reatividade, quer pelo Poder de Neutralização ou pela granulometria, são de custo mais elevados. O efeito residual de um corretivo é o tempo de duração da calagem efetuada. É, portanto, um fator de grande importância na economicidade da calagem (SANCHES & SALINAS, 1983; MIELNICZUK, 1983; VAN RAIJ & QUAGGIO, 1984).

Segundo Tisdale et al. (1985) e Barros et al. (1985), a reatividade e o efeito residual são características antagônicas, ou seja, quanto maior a reatividade, menor o efeito residual e vice-versa. Assim, os calcários calcinados, de alto PRNT (poder relativo de neutralização total) apresentaram alto poder de neutralização e baixo efeito residual, enquanto nos calcários com menor PRNTs, ocorre o inverso.

Quanto a recomendação do corretivo alguns aspectos em relação à sua qualidade devem ser observados, como suas características químicas, como o teor e do tipo de compostos neutralizantes, e pelas suas características físicas, no caso a granulometria (TEDESCO & GIANELLO, 2000; ALCARDE & RODELLA, 2003).

A escolha de calcário calcítico pode justificar-se pelo fato que grande parte dos solos do Rio Grande do Sul possuem elevados teores de magnésio a aplicação sucessiva de calcário dolomítico pode comprometer o desenvolvimento das culturas pela estreitamento da relação Ca:Mg, próximas a 2:1.

#### **2.4 Alterações nas propriedades físicas do solo decorrentes da calagem**

As propriedades físicas estão relacionadas principalmente ao efeito mecânico de sua aplicação do corretivo, entretanto é possível verificar um efeito indireto em propriedades físicas decorrentes da maior atividade biológica em solos calcariados (LESTURGEZ et al., 2004; GRIÈVE et al., 2005). Estudos têm mostrado que a



incorporação de corretivo com implementos como o arado e grade são os grandes responsáveis pela alteração das propriedades físicas (SILVA et al., 2009).

O Sistema de Plantio Convencional (SPC) favorece a decomposição da matéria orgânica (COT) e, em função disso, ocasiona um efeito prejudicial na qualidade estrutural do solo. (BERTOL et al. 2001)

O revolvimento do solo destrói os agregados de maior tamanho (FUCKS et al., 1994). Machado et al. (1981) ao estudarem o efeito do sistema de plantio convencional sobre as alterações de suas propriedades físicas, encontraram reduções no teor de COT a partir do quarto ano de cultivo do solo, aumentando a magnitude desse efeito com o tempo. Nesse sentido, o papel da MO na formação dos agregados do solo faz com que propriedades físicas sejam afetadas indiretamente com a incorporação de calcário.

A matéria orgânica apresenta importância fundamental como um dos fatores determinantes da estabilização dos agregados pela ligação entre as partículas de solo (BAYER & MIELNICZUK, 1999). Alterando-se assim o teor de matéria orgânica do solo, altera-se a capacidade do solo em manter os agregados estáveis no solo. De acordo com Azevedo & Bonumá (2004), agregados são os aglomerados de partículas desde o tamanho argila (iguais ou menores de 2 micrômetros) até maiores que areia (maiores que 2000 micrômetros).

A degradação das características físicas do solo, segundo Bertol et al. (2001), é um dos principais processos responsáveis pela perda da qualidade estrutural e aumento da erosão hídrica, sendo que

essas alterações podem se manifestar de várias maneiras, influenciando o desenvolvimento das plantas. Já para que ocorra a recuperação da estrutura original do solo Cargnelutti et al. (1997) mostraram que são necessários, aproximadamente, três anos de cultivo sem revolvimento. Dessa forma, sistemas agrícolas que adotam menor revolvimento do solo e alta taxa de adição de resíduos podem deter o declínio da qualidade estrutural de solos cultivados, bem como promover a recuperação daqueles já degradados (PALADINI & MIELNICZUK, 1991). Essa situação resultaria em reflexos positivos sobre a produtividade das culturas compensando supostamente os efeitos negativos devido ao baixo pH e presença de  $Al^{3+}$  em profundidade no SPD.

No SPD, devido às melhorias nas características físico-bio-químicas, deseja-se sempre prolongar a residualidade do calcário (GATIBONI et al., 2002), além de alcançar camadas mais profundas (KAMINSKI et al., 2007). A migração dos efeitos da calagem em profundidade está relacionada, principalmente, à dose de corretivo, ao tempo de avaliação, aos atributos do solo, especialmente os teores de colóides, à macroporosidade e ao regime hídrico e, secundariamente, à presença de ânions inorgânicos, como nitratos, sulfatos, cloretos e silicatos e ânions orgânicos (PEARSON et al., 1962; RHEINHEIMER et al., 2000; HAYNES & MOKOLOBATE, 2001; KAMINSKI et al., 2007).

Ademais, alguns estudos observaram que propriedades físicas como retenção de água e estabilidade dos microagregados, estudados por difração laser podem ser alteradas pela prática da calagem (BORTOLUZZI et al., 2008). Isso sugere que a alteração das

propriedades químicas do solo, propriedades eletroquímicas do solo tem efeito sobre algumas propriedades físicas, principalmente relacionadas com a água.

Segundo Reynolds et al. (2002), um solo agrícola com boa qualidade física é aquele que é “forte” para manter uma boa estrutura, resistente à erosão e à compactação, mas também deve ser “fraco” o suficiente para permitir o crescimento radicular e a proliferação da flora e fauna do solo.

Imhoff (2002) propõe indicadores da qualidade física do solo que englobem atributos físicos, influenciadores diretos na produção das culturas, como a magnitude com a qual a matriz do solo resiste à deformação e a capacidade do solo em fornecer adequada aeração e quantidade de água para o crescimento e expansão do sistema radicular.

De acordo com Reichert et al. (2003), a qualidade do solo do ponto de vista físico está associada aquele solo que: i) permite a infiltração, retenção e disponibilização de água as plantas, córregos e subsuperfícies; ii) responde ao manejo e resiste à degradação; iii) permite as trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes de plantas; e iv) possibilita o crescimento das raízes.

Richart et al. (2005) consideram a compactação do solo como um fator limitante da qualidade física do solo, com influência na produtividade e na desagregação dos solos. Além da densidade do solo, da resistência do solo à penetração das raízes, do intervalo hídrico ótimo, do índice de compressão e da pressão de preconsoidação, a porosidade total e a distribuição do tamanho de

poros também são amplamente utilizadas como indicadores de qualidade física (DEXTER et al., 2004).

A resistência do solo à penetração e as características estruturais relacionadas à temperatura, aeração e água no solo são identificadas como as principais propriedades que influenciam a qualidade de um solo após sua compactação (LIPIEC & HATANO, 2003).

Nesse sentido, a calagem por alterar a eletroquímica do solo e por sua vez algumas propriedades físicas, como também propriedades biológicas (fauna do solo e produtividade de culturas), a calagem se constitui como uma prática global de solos (BORTOLUZZI & TESSIER, 2002).

## **2.5 Alterações morfológicas de raízes**

### **2.5.1 Estresse ao crescimento por camadas compactadas**

As raízes são órgãos flexíveis que se desenvolvem no caminho de menor resistência no solo. Por ocasião de seu desenvolvimento no solo secreta uma mucilagem para lubrificação da coifa, ponto importante para a penetração e posterior desenvolvimento do sistema radicial (BENNIE, 1996; VEPRASKAS, 1994; BENGOUGH & MULLINS, 1990).

O crescimento radicial da maioria das plantas se dá pela divisão celular no meristema apical, e o crescimento continua pela expansão dessas células em torno de 1 mm da ponta da raiz (VEPRASKAS, 1994).

Durante o crescimento radicial, se a ponta da raiz encontrar um obstáculo que resiste à sua penetração, torna-se menos pontiaguda e as células superficiais podem formar um tecido necrosado e fraco, alterando a relação hormonal (auxina/citocinina). Devido a baixa divisão celular meristemática e do crescimento da raiz, quando da ocorrência de impedimento físico ocorre o engrossamento das raízes devido aos danos sofridos no córtex, tornando as raízes grossas e achatadas com orientação de crescimento irregular (TORRES & SARAIVA, 1999).

Esse mecanismo permite que a produtividade das culturas, em alguns casos, não seja afetada pelo aumento da densidade do solo em lavouras sob SPD (PEDROTTI & MELLO JÚNIOR, 2009). De maneira geral aumento da densidade do solo reflete diretamente na expansão do sistema radicial das plantas, isso porque afeta diretamente a resistência do solo à penetração (REICHERT et al., 2003; IMHOFF et al., 2000). Dentre estes indicadores, a resistência do solo à penetração tem sido o atributo priorizado em trabalhos que estudam a compactação do solo (IMHOFF et al., 2000), por estar diretamente relacionada ao crescimento radicular das plantas (BENGOUGH & MULLINS, 1990; CAMARGO & ALLEONI, 1997; DE MARIA et al., 1999).

### **2.5.2 Estresse químico por $Al^{3+}$ ao crescimento radicial**

A acidez também afeta a disponibilidade de quase todos os nutrientes essenciais no solo (ERNANI, 2008). Em solos ácidos o principal elemento que tem efeito fitotóxico é o alumínio, na forma

trivalente  $Al^{3+}$  (FOY, 1978). O principal fator que controla a concentração do  $Al^{3+}$  na solução do solo é o pH, quando se tem em solos pH menor que 5,0 a toxidez do alumínio é severa (FAGERIA, 1998).

Devido a toxicidade de alumínio ocorre um menor crescimento de raízes, o que interfere na absorção e no transporte de nutrientes pelas plantas, acarretando assim uma redução no rendimento das culturas (CAMARGO et al., 1998; GUIMARÃES, 2005).

As raízes quando seu desenvolvimento ocorre em ambiente com stress por alumínio as raízes apresentam engrossamento e amarelecimento nas pontas, além de pontas degeneradas e tortas, com ramificações secundárias, ausência de pelos absorventes e escuras pela oxidação de compostos fenólicos. Ocorre também redução no tamanho da coifa e deformação do tecido meristemático, afetando assim o crescimento e desenvolvimento do sistema radical (FOY, 1978; CODOGNOTTO et al., 2002; PEIXOTO et al., 2007).

Os principais mecanismos de ação da toxidez do alumínio caracterizam-se pela diminuição da divisão e expansão celular, interação com proteínas que interferem na atividade enzimática de vários processos metabólicos, interação na formação do esqueleto das células, alteração de sinais bioquímicos nos processos fisiológicos, alteração na parte celular impedindo a expansão, desorganização da membrana plasmática e inibição da absorção de íons (KOCHIAN, 1995). Alguns destes efeitos são bem conhecidos e visualizados pelo menor crescimento e engrossamento do sistema radicular (DELHAIZA & RYAN, 1995; KOCHIAN, 1995).

Nesse sentido, é esperado que o crescimento radicial seja diminuído ou evitado em camadas de solos que ofereçam algum impedimento as raízes seja físico ou químico.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e caracterização do local

O presente trabalho estudou um experimento conduzido em área de pesquisa pertencente ao Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento MAPA e cedida para fins de utilização para a Cooperativa Triticola Santo Ângelo Ltda (COTRISA). As coordenadas geográficas da área são 28° 15' 59"S e 54° 13' 51"O.

O solo é um Latossolo Vermelho distroférico típico, (EMBRAPA, 2006) cultivado sob sistema de plantio direto (SPD) consolidado.

A partir da implantação do experimento as práticas culturais adotadas corresponderam as recomendadas para SPD: a recomendação de adubação foram realizadas com base na análise de solo e seguiram as recomendações da CQFS-RS/SC (2004). Cultivou-se soja em (05/06, 07/08, 08/09 e 09/10), aveia (05,06,07,09) e trigo (08).

Tabela 01. Atributos químicos e físicos do local antes da instalação do experimento/out. 2004 (adaptado de Miotto, 2009)

Prof. (cm)	Arg. (g. kg <sup>-1</sup> )	MO	pH 1:1	P (mg. dm <sup>-3</sup> )	K <sup>+</sup> (mg. dm <sup>-3</sup> )	Ca <sup>+2</sup> (cmol <sub>c</sub> . dm <sup>3</sup> )	Mg <sup>+2</sup> (cmol <sub>c</sub> . dm <sup>3</sup> )	Al <sup>3+</sup>	V (%)	M
0 – 10	880	32	5,1	17,1	276	3,7	1,8	0,7	47	10
10 – 20	620	23	5,0	8,4	124	3,3	1,6	1,9	30	31

Na tabela 1 se encontram os atributos químicos e físicos obtidos segundo metodologia compilada em TEDESCO et al. (1995) do local antes da instalação do experimento, os resultados referenciam as camadas de 0 – 10 e 10 – 20 cm.



### **3.2 Caracterização dos tratamentos: experimento Holzschuh (2004)**

Os tratamentos do experimento foram planejados e implantados por Marquel Jonas Holzschuh em 2004 (HOLZSCHUH, 2007 - Apêndice 01) e consistem em doses de calcário: Testemunha (sem calcário); Calcário calcítico; calcário dolomítico e suas misturas (Calcítico 1:1 Dolomítico, Calcítico 3:1 Dolomítico e Calcítico 1:3 Dolomítico) aplicados de duas formas (mantido na superfície e incorporado com arado).

As doses dos calcários foram estimadas com base no método SMP e calculada para elevar o pH em água do solo a 6,0 (CQFS-RS/SC, 2004). A quantidade aplicada foi de 7,5 Mg ha<sup>-1</sup> já corrigido o PRNT dos calcários para 100%. Os calcários utilizados apresentavam as seguintes composições: calcítico 45% de CaO, 1,5% de MgO, Poder de neutralização (PN) 76% e PRNT de 64%; dolomítico 32% de CaO, apresentando equivalente de 14% de MgO, PN 77% e PRNT de 70%.

Cada bloco foi subdividido em faixa onde uma das metades houve aração e gradagem para incorporação dos calcários e o revolvimento da testemunha e na outra metade manteve-se o corretivo na superfície. Cada unidade experimental tem a dimensão de 6 x 5m.

O presente estudo, realizado em 2009/10, trabalhou em detalhe sobre os seguintes tratamentos: testemunha (sem calcário), calcário 100% dolomítico, 100% calcítico e a mistura de calcítico dolomítico para proporção (1:1), totalizando 4 tratamentos com 4 repetições. Dentro de cada tratamento considerou-se ainda os dois

métodos de aplicação, calcário mantido na superfície do solo e aquele que foi incorporado com aração e gradagem.

Em 2009 a área em SPD estava sob cultivo de aveia preta e na safra 2009/2010 sob cultivo de soja. A população final da semeadura foi de 250.000 plantas ha<sup>-1</sup>, com utilização da cultivar BMX Apolo RR, a adubação foi realizada de acordo com a interpretação de laudo de análise de solo e seguidos os critérios para recomendação da CQFS RS-SC (2004). Os tratos culturais foram realizados de acordo com a necessidade não diferindo no experimento.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com quatro tratamentos e dois métodos de aplicação de calcário analisados em faixas, com quatro repetições.

### **3.3 Estratégia de coleta de material**

As amostras foram coletadas em 2009/2010 dentro da área útil de cada parcela, respeitando um metro de bordadura em todas as direções.

Como estratégia de estudo e apresentação dos resultados na dissertação optou-se por agrupar em duas partes chamadas de: Estudo 1, referente à condição geral do experimento; Estudo 2, estudo da morfologia de raízes e de propriedades físicas e químicas do solo.

### **3.3.1 Estudo 1: estudo geral do experimento**

Nesse estudo realizaram-se as seguintes coletas e análises: Em 2009, coletaram-se amostras de palha de aveia; na mesma data coletaram-se amostras de solo deformado para análise química. Também se coletaram amostras de solo com estrutura preservada para análises físicas.

#### **3.3.1.1 Coleta das amostras de solos e análises químicas**

Em novembro de 2009, antes da semeadura da soja coletaram-se amostras deformadas de solo (20 subamostras por unidade experimental) com auxílio de um trado calador. As profundidades coletadas foram: 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm. As amostras foram acondicionadas em sacos de plásticos e encaminhadas ao Laboratório de Uso e Manejo do Território e de Recursos Naturais da FAMV/UPF - Passo Fundo/RS.

As determinações foram realizadas com base na metodologia apresentada por TEDESCO et al., (1995). O pH em H<sub>2</sub>O foi determinado por potenciometria, utilizando 10 g de solo na relação solo: água de 1:1.

Cálcio, Magnésio e Alumínio trocáveis foram determinados por extração com KCl (1 mol L<sup>-1</sup>). O alumínio foi determinado por titulação ácido-base com NaOH padronizado (0,0133 mol L<sup>-1</sup>). Para determinação do teor de Ca e Mg foi utilizado um espectrofotômetro de absorção atômica (EAA).

### **3.3.1.2 Coleta das amostras para análises físicas**

Amostras de solo com estrutura preservada foram realizadas em março de 2010, antes da colheita da soja.

#### **3.3.1.2.1 Estabilidade de agregados**

Para a determinação da estabilidade dos agregados em água utilizou-se a metodologia descrita por Kemper & Chepil (1965), utilizando-se o aparelho de oscilação descrito por Yoder (1936).

As amostras composta por torrões de solo com estrutura preservada foram coletadas nas profundidades de: 0-5 cm, 5-10 cm e 10-20 cm. Utilizou-se para isso uma pá-de-corte, acondicionando-se as mesmas em sacos de plásticos, onde posteriormente foram encaminhadas ao Laboratório Análises de Solos da Embrapa – Passo Fundo.

Agregados com diâmetro entre 4,76 mm e 8 mm, foram separados por tração manual com o auxílio de peneiras. De cada uma das amostras uma alíquota de 15 g de agregados (torrões) foi colocada sobre um jogo de peneiras com 4,76; 2,0; 1,0 e 0,212 mm, sendo umedecidas lentamente por capilaridade durante 10 minutos.

Após o umedecimento, as amostras foram submetidas durante 10 minutos à oscilação vertical constante (42 oscilações por minuto e 4 cm de imersão por oscilação).

O material retido em cada peneira foi coletado em um béquer, utilizando-se um jato de água dirigido. O material foi seco em estufa a 105 °C. A massa dos agregados após a secagem é feita para os

materiais referentes aos diâmetros médios de 6,36 mm, 3,38 mm, 1,5 mm, e 0,105 mm. A quantificação do material que passou pela peneira 0,212 mm foi determinada pela diferença entre o total da amostra e o retido nas outras peneiras.

Os índices de agregação determinados foram o Diâmetro Médio Ponderal (DMP), o Diâmetro Médio Geométrico (DMG), e o Índice de Estabilidade de Agregados (IEA).

O Diâmetro Médio Ponderado foi calculado da seguinte forma:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (xi \cdot wi)$$

Onde:

Wi= é a proporção de cada classe em relação ao total.

Xi= é o diâmetro médio da classe.

Para o Diâmetro Médio Geométrico utilizou-se:

$$DMG = EXP \frac{\sum_{i=1}^n wp \cdot \log xi}{\sum_{i=1}^n wi}$$

Onde:

Wp= é o peso de cada categoria.

O Índice de Estabilidade de Agregados foi calculado utilizando-se:

$$IEA = \frac{\text{peso da amostra} - wp_{0,21} - \text{areia}}{\text{Peso da amostra} - \text{areia}}$$

Peso da amostra – areia

Onde:

Wp<sub>0,21</sub>= peso do material que passou pela malha 0,212 mm.

### **3.3.1.2.2 Resistência mecânica do solo à penetração geral**

A resistência do solo à penetração foi realizada utilizando-se um penetrógrafo modelo FALKER penetroLOG<sup>®</sup> na camada de 0 a 40 cm, sendo colhida uma leitura por centímetro. Para cada unidade experimental (32 UE) foram realizadas seis repetições, totalizando para cada tratamento 24 leituras.

Os resultados de RP foram calculados com relação as médias de cada centímetro das seguintes camadas de: 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm.

### **3.3.1.3 Coleta das amostras e análises de rendimento de grãos e palha de aveia**

#### **3.3.1.3.1 Palha de aveia**

A coleta de palha de aveia ocorreu com a retirada do material rente ao solo e numa superfície de 2 m<sup>2</sup> de área com auxílio de uma foice manual. A palha foi colocada em saco de papel e identificada para transporte. No laboratório as amostras foram secas em estufa com ar forçado a 65 °C até atingirem peso constante, para determinação da massa de matéria seca.

### **3.3.1.3.2 Rendimento soja**

Coletaram-se plantas de soja em 8 m<sup>2</sup> divididos em quatro pontos de 2 m<sup>2</sup> aleatórios na parcela. As plantas foram colocadas em sacos de papel e identificadas para transporte. As plantas foram trilhadas e os grãos pesados em balança. O rendimento foi estimado em kg ha<sup>-1</sup> a 13% de umidade.

### **3.3.1.3.3 Coleta das amostras: volume e comprimento da raiz**

Dentro da área útil de cada parcela foram coletadas cinco plantas de soja cavando-se uma pequena trincheira a fim de retirar todo o sistema radicial. Em laboratório determinou-se o comprimento máximo da maior raiz, expresso em cm (distância entre a extremidade da raiz até seu ponto de inserção no caule) utilizando-se uma fita métrica.

Para determinar o volume do sistema radicial mergulhou-se as raízes das plantas de soja em proveta graduada contendo água, onde o volume de água deslocada assumiu-se como o volume das raízes, expresso em cm<sup>3</sup>.

### **3.3.1.4 Análise estatística adotada no estudo 1**

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas entre si pelo teste de Tukey, aos níveis de probabilidade de erro de 5%.

### **3.3.2 Estudo 2: estudo da morfologia de raízes e de propriedades físicas e químicas**

Para o estudo 2, realizou-se os seguintes procedimentos em apenas uma repetição (bloco 1 por ser aquele mais representativo do experimento e com menor probabilidade de sofrer interferências externas):

- 1) Escolheu-se dentro de cada tratamento uma planta de soja referência, de modo a representar o tratamento;
- 2) No solo a partir da posição dessa planta determinou-se a resistência a penetração (RP) em várias distâncias da esquerda e direita da linha de semeadura;
- 3) Abriu-se uma trincheira junto a essa planta;
- 4) Para análise morfológica do sistema radicial coletaram-se imagens digitais;
- 5) Nas paredes da trincheira coletaram-se amostras com estrutura preservada de solos (torrão) para análises químicas e físicas.

#### **3.3.2.1 Resistência mecânica do solo a penetração**

No entorno da planta de referência determinou-se a RP conforme descrito no estudo 1 (item 3.3.1.2.2 Resistência mecânica do solo à penetração geral). Entretanto, procedeu-se a estimativa de RP diferente ao estudo 1, no que tange aos locais de medida, sendo esses



demonstrados conforme a Figura 01. Seis distâncias de medida a cada 10 cm, três de cada lado da linha de semeadura. Cada distância foi composta por três repetições paralelas a linha de semeadura, distantes 5 cm de cada medida.

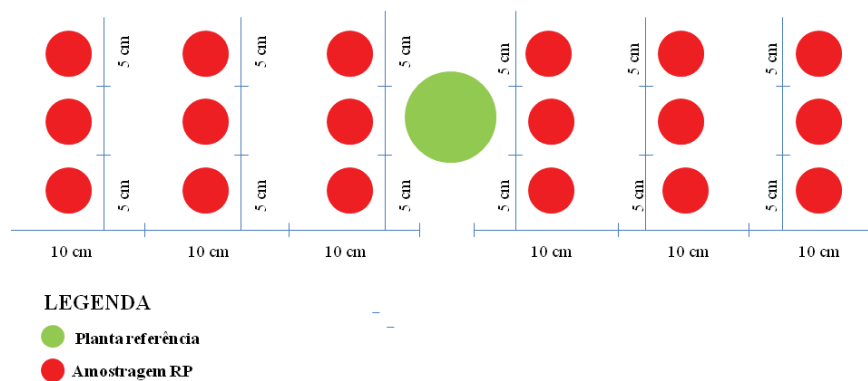


Figura 01. Esquema de coleta de dados da RP em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário.

### 3.3.2.2 Trincheira e coleta de imagens

Abriu-se uma trincheira junto à planta de referência e transversal a linha de semeadura, com auxílio de pá-de-corte com as seguintes dimensões: 90 cm de comprimento e 60 cm de profundidade e 30 de largura. Fez-se um toailete na trincheira com auxílio de uma faca a fim de expor as raízes da planta de referência.

Imagens das raízes expostas na parede da trincheira foram obtidas (câmera Sony, modelo DSC H55) a uma distância de 30 cm da raiz da planta e a uma altura de 30 cm na trincheira. Fez-se o aferimento das distâncias com uma régua. As imagens foram tratadas com o programa de computador CorelDraw® e Adobe Fotoshop®



Figura 02. Trincheira para coleta das imagens em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário.

### 3.3.2.3 Amostragem de solo para análises químicas e físicas

Com a finalidade de confrontar os resultados das análises físicas e químicas com a resposta morfológica do sistema radicial, procedeu-se a coleta de amostras de solo com estrutura indeformada nas seguintes condições:

A partir da planta de referência, foram retiradas amostras para determinação de pH e  $Al^{3+}$  em três repetições, nas profundidade de 0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm e 30-40 cm. A determinação de  $Al^{3+}$  e pH seguiu o descrito no estudo 1.

Nas profundidades estudadas foram coletadas quatro sub-amostras para a determinação da densidade do solo pelo método do

torrão impermeabilizado, onde torrões de solo (diâmetro de 3 a 5 cm) foram impermeabilizados com parafina (temperatura em torno dos 63 °C), sendo mergulhados na água a fim de determinar o seu volume. Utilizaram-se as seguintes equações para determinação da densidade do solo (DS).

$$DS = \frac{MTS}{MTPIA - VP}$$

DS = densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ )  
 MTS = massa do torrão seco (g)  
 MTPIA = massa torrão seco parafinado mergulhado na água ( $\text{g cm}^3$ )  
 VP = densidade da parafina ( $\text{g cm}^{-3}$ )

Para determinar o volume de parafina aderido ao torrão é necessário pesar o torrão com e sem parafina e, então, determinar o volume.

$$VP = \frac{MTSP - MTS}{DP}$$

VP = densidade da parafina (g)  
 MTSP = massa do torrão seco parafinado (g)  
 MTS = massa do torrão seco (g)  
 DP = densidade da parafina ( $\text{g cm}^{-3}$ ) (na média  $0,9 \text{ g cm}^{-3}$ )

### 3.4 Análise estatística: estudo 2

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas entre si pelo teste de Tukey, aos níveis de probabilidade de erro de 5%.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Estudo 1**

Baseado nas coletas de amostras de solos dos tratamentos do experimento, serão apresentadas e discutidas os seguintes resultados: pH em água, teor de alumínio, teor de cálcio, teor de magnésio, diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade de agregados (IEA), resistência mecânica do solo a penetração (RP), comprimento da raiz principal da soja, volume das raízes de soja, massa seca da palha de aveia e rendimento de grãos de soja.

#### **4.1.1 Formas de aplicação e tipos de calcário e sua relação com as propriedades químicas do solo**

##### **4.1.1.1 pH em água**

A avaliação do pH do solo realizada 66 meses após a aplicação de calcário por Holzschuc (2007), resultou que a aplicação de calcário de forma superficial aumentou o pH em água do solo até uma profundidade de 10 cm, enquanto de forma incorporada o aumento no pH deu-se até a profundidade de 15 cm (Tabela 2). Em sistema plantio direto há uma correção efetiva da acidez do solo em uma profundidade menor que 10 cm (MARTINAZZO, 2006; CAÍRES et al., 2000).

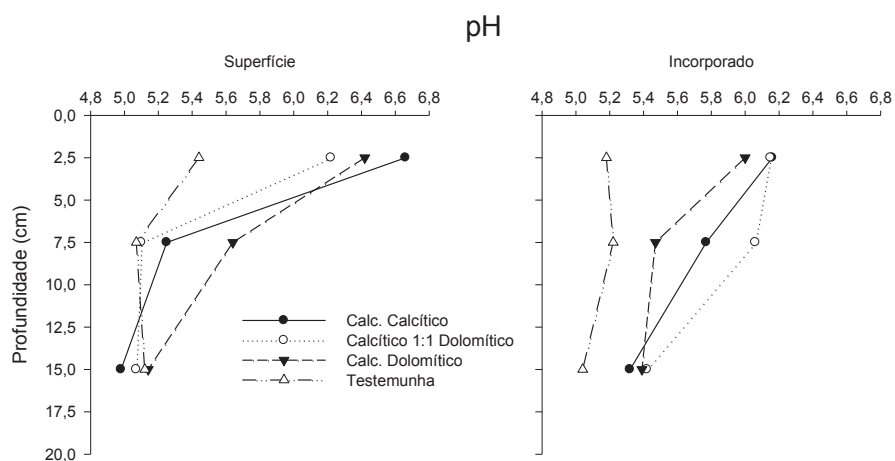


Figura 03. pH em água em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário.

De acordo com a Figura 03 e o Apêndice 01, há diferença entre as formas de aplicação. No método de aplicação superficial, o pH da camada 0-5 cm difere das demais, enquanto no método de aplicação incorporado esta ocorre somente na camada de 10-20 cm. Isso denota que a incorporação do calcário é eficiente para minimizar o gradiente vertical de pH do solo. Contudo a aplicação superficial de corretivo foi eficaz na correção do pH em água, ou seja, acima de 5,5 unidade, somente na camada superficial (0-5 cm).

Quanto a eficácia da incorporação do corretivo, Kaminski et al. (2005), reportam que embora a incorporação seja para 20 cm de profundidade, devido aos problemas nesta prática, a correção é efetiva até 10 cm, (Figura 03).

O pH não variou em relação ao tipo e proporções de calcário utilizado, corroborando os resultados de Gallo et al. (1956) que ao avaliarem diferentes calcários (calcítico e dolomítico) não encontraram diferença apreciável no pH do solo para os diferentes tipos utilizados. Isso concorda com a interpretação de que o importante para essa variável é a capacidade de correção, ou seja, o poder de neutralização não o cátion acompanhante.

Na Figura 03 e no Apêndice 01, percebe-se com a aplicação de calcário em superfície a existência de frente de alcalinização, problema recorrente no sistema plantio direto (RHEINHEIMER et al., 2000; CAIRES et al., 2000). Isso porque a calagem superficial cria uma frente de alcalinização vertical da acidez do solo, sendo proporcional a dose aplicada e ao tempo decorrente dessa aplicação (RHEINHEIMER et al., 2000).

Quanto as profundidades avaliadas, ocorreu interação com o tipo do corretivo e a forma de aplicação. Para todos os tipos de calcário ocorreu diferença significativa da camada de 0 – 5 cm para as demais. Entretanto, não variou o pH de acordo com o material utilizado, conforme discutido anteriormente.

#### **4.1.1.2 Teor de alumínio**

O comportamento do alumínio no solo está ligado aos valores de pH, sendo que na camada de 0 – 20 cm quando o calcário foi incorporado, não apresentou diferenças. Na média geral, o teor de  $Al^{3+}$  para o calcário mantido em superfície foi de  $0,91 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  e  $0,56 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  quando aplicado as mesmas doses e incorporado. A

aplicação em superfície neutraliza totalmente o alumínio trocável nos primeiros 5 cm, mas não consegue uma boa ação em profundidade devido a sua baixa solubilidade. (Lourenzi et al. 2007)

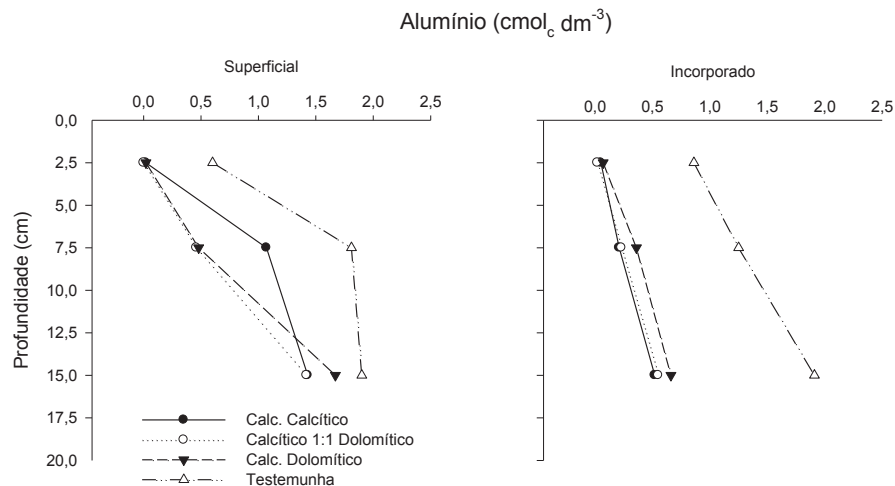


Figura 04. Teor de alumínio (cmol<sub>c</sub>.kg<sup>-1</sup>) em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário

Em relação aos tipos e proporções de calcários utilizados, somente diferiu estatisticamente da testemunha, apresentando uma quantidade maior de Al<sup>3+</sup> (Figura 04 e Apêndice 02). Ainda, não se observou diferenças nos teores de Al<sup>3+</sup> quando se compara somente os tipos de calcários utilizados.

A neutralização de alumínio ocorreu na camada de 0-5 cm com aplicação em superfície, porém com a aplicação em superfície houve uma menor neutralização de alumínio nas camadas mais profundas, quando comparado a forma incorporado que nas camadas de 5 - 10 e 10 - 20 cm, apresentando quase metade do teor de alumínio

nessas últimas camadas. Estes resultados, aos 66 meses após a aplicação, confirmam a tendência já observada por Miotto (2009).

Em estudos realizados por Centurion et al. (1985) e Bayer & Mielniczuk (1997) não encontraram diferenças entre os métodos de preparo do solo no teor de alumínio, mas encontraram maiores teores em profundidade, concordando com o atual estudo. Esses resultados somam-se aos da literatura no que diz respeito ao fato que o problema da existência do  $Al^{3+}$  é que o mesmo está presente em camada definida no solo e seu efeito no crescimento das plantas é ainda pouco conhecido quando no conjunto de outros fatores. Camadas de solos com  $Al^{3+}$  trocável acima de  $0,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$  são segundo Malavolta (1980) prejudiciais ao crescimento das plantas.

#### **4.1.1.3 Teor de cálcio**

Para o método de aplicação de calcário não houve diferença estatística. Já era esperado este resultado, pois as doses de calcário utilizadas foram as mesmas, ambas para elevar o pH em água para 6,0 (Figura 05 e Apêndice 04).



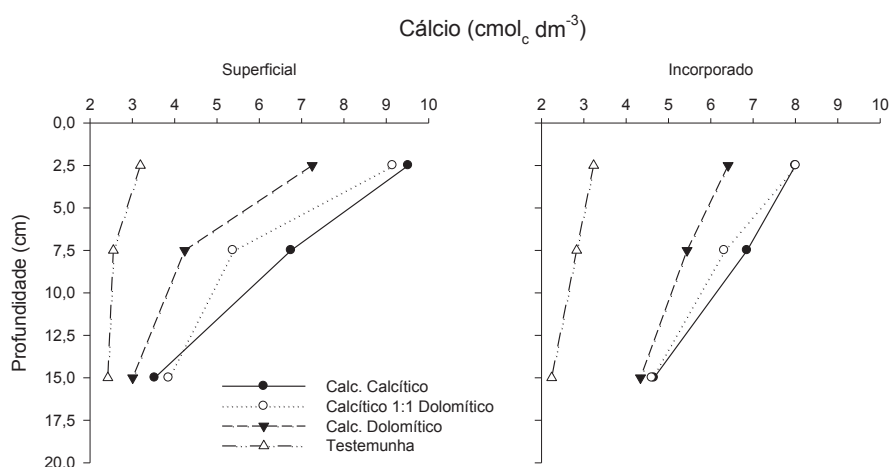


Figura 05. Teor de cálcio ( $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário

O maior acréscimo de cálcio no solo foi observado com a utilização de calcário calcítico ( $6,56 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ), seguido da mistura 1:1 calcítico:dolomítico ( $6,22 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) sem diferença, a diferença ocorre entre o dolomítico ( $5,11 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) entre os demais, e também a testemunha ( $2,77 \text{ cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ). O calcário dolomítico por ter uma quantidade menor de carbonato de cálcio e maior de carbonato de magnésio ocasionou menor acréscimo nos teores de cálcio. Os teores de Ca em relação a testemunha são praticamente o dobro, conforme pode-se observar na Figura 05 e no Apêndice 04.

Os resultados apresentados na figura 05, mostram que mesmo depois de 66 meses após a calagem, os teores de cálcio no solo são altos. Esse efeito tem relação direta ao PRNT do calcário utilizado, que por sua vez interfere no efeito residual. Ainda, minerais

contidos nas rochas metamórficas podem ser recalcitrantes e liberar nutrientes mais lentamente de acordo com sua alteração no solo.

Em relação aos teores de cálcio no solo houve interação entre o método de aplicação e profundidade (Figura 05). Nota-se que a variação nos teores de cálcio em profundidade nos tratamentos calcário incorporado foi menor que quando comparado com a aplicação em superfície. A incorporação do corretivo melhora assim os atributos químicos e a distribuição vertical dos seus teores.

Ocorreu também interação entre os tipos de calcário e a profundidade. Pode-se observar que a testemunha apresentou os menores valores de cálcio em todas as profundidades, o que era esperado já que na testemunha não houve aplicação de corretivo. Os melhores resultados foram obtidos nas camadas superficiais com a utilização de calcário calcítico e a mistura de 1:1.

O cálcio é um macronutriente, sendo sua principal fonte externa ao solo o calcário. Assim é compreensível que haja um acréscimo do elemento com a aplicação de corretivos, indiferente de qual foram às proporções utilizadas. O presente estudo confirma a tendência de Miotto (2009) que encontrou um acréscimo no cálcio do solo com a calagem e a manutenção dos teores no tempo. As plantas extraem o cálcio como nutriente e com o tempo tendem a diminuir no solo seus teores.

Ao trabalhar com diferentes doses de calcário aplicados em superfície Rheinheimer et al. (2000), constataram elevação do pH e dos teores de cálcio e magnésio e diminuição da saturação de Al (%) nos primeiros 5 cm do perfil do solo aos 18 meses após aplicação do corretivo. A ação limitada do calcário em profundidade pode estar

associada mais ao pouco volume de corretivo em contato com as partículas de solo do que com a dose aplicada. Fato observado no presente experimento e não tão evidente quando o corretivo foi incorporado.

#### 4.1.1.4 Teor de magnésio

Para o atributo magnésio, o tipo de calcário utilizado influenciou os teores do elemento. Os maiores valores foram observados no tratamento com calcário dolomítico (Figura 06 e no Apêndice 05). Ocorreu interação entre a profundidade e modo de aplicação de incorporação, mostrando mais uma vez que a incorporação é eficiente para levar o corretivo para as camadas mais profundas (Apêndice 05).

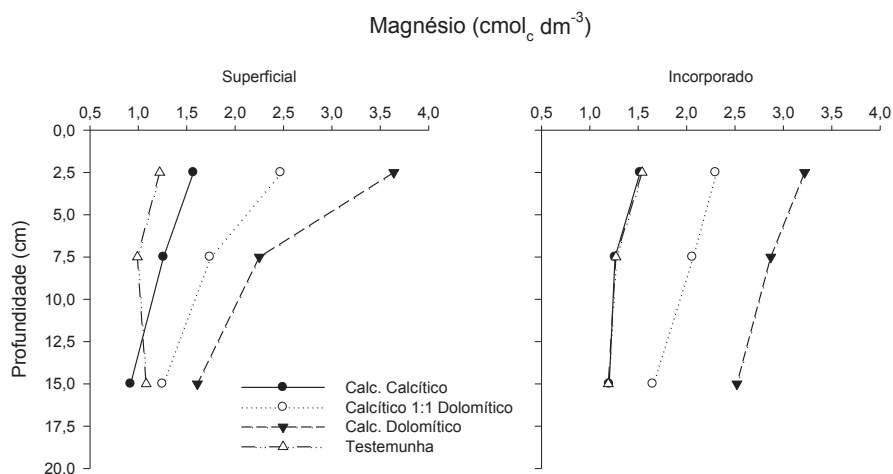


Figura 06. Teor de magnésio ( $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ ) em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário

Observa-se que a calagem, mesmo após 66 meses da sua aplicação, ainda influencia positivamente os atributos mostrados até então, uma vez que os mesmos não tenderam a retornarem aos valores originais, ou seja, o solo não mostrou sinais de reacidificação. Quanto à incorporação, a mesma se mostrou eficiente para melhorar a distribuição vertical das qualidades químicas avaliadas.

Em resumo percebe-se que o comportamento do Ca e do Mg, segundo Almeida et al. (2005), é variável nos sistemas de manejo do solo e parecem depender do tipo de solo, seqüências de culturas, e diferenças na mobilidade de cada elemento no solo.

#### **4.1.2 Formas de aplicação e tipos de calcário e sua relação com as propriedades físicas do solo**

##### **4.1.2.1 Distribuição de agregados em água**

Na Figura 07, estão apresentados os resultados da distribuição dos agregados em água em função dos tratamentos.

Os tratamentos foram confrontados dentro da mesma profundidade, assim a análise estatística se baseou entre os métodos de aplicação da calagem e os tipos de corretivos.

A distribuição de agregados em água não foi influenciada pelos métodos de aplicação do corretivo. Isso pode ter ocorrido devido aos 6 anos transcorrido desde a intervenção mecânica no solo. Isso é discordante das conclusões de Costa Filho (1998) e Longo et al. (2011), em que maiores estabilidades de agregados foram obtidos em solos nunca antes revolvidos.

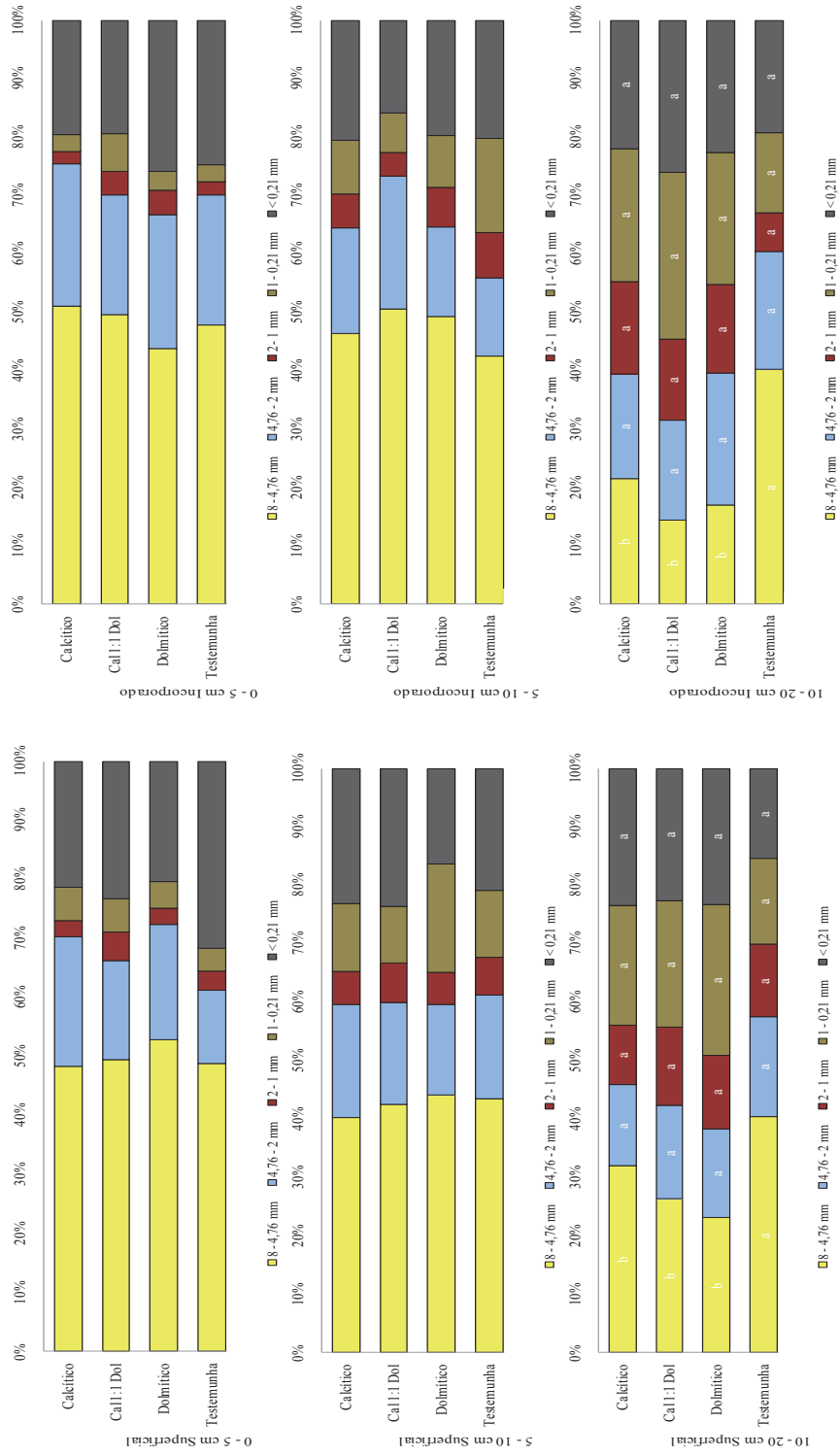


Figura 07 Proporção de agregados em função da forma de aplicação, tipo de calcário e profundidade.

De acordo com a Figura 07, observa-se claramente que nas camadas superiores o número de agregados grandes (4,76 – 8 mm) é superior. Os teores de matéria orgânica maiores nas camadas superficiais pode ser um fator determinante para isso, conforme já descrito por Libardi (2005).

Os tipos de calcário não afetaram a distribuição de agregados na camada de 0 – 10 cm. Entretanto ocorreu diferença significativa na classe de agregados maiores que 4,76 mm na camada de 0 – 20 cm, fato observado em ambos os métodos de aplicação de calcário. Embora não tenha sido observado nesse estudo, Albuquerque et al. (2003) verificaram aumento na estabilidade de agregados com a utilização da calagem, devido ao maior aporte de material orgânico e de cálcio.

#### **4.1.2.1.2 Diâmetro médio ponderado (DMP)**

Em relação ao diâmetro médio ponderado, não apresentou diferenças entre os métodos de aplicação (Tabela 02). Para Moraes et al. (2009), o diâmetro médio está ligado ao manejo de solo, possuindo um valor maior para estabilidade de agregados os sistemas conservacionistas de preparo de solo, em contraponto a essa afirmação, pode-se inferir que transcorrido um tempo após a mobilização do solo a condição de matéria orgânica e agregados volta a ser como na condição inicial (REICHERT et al., 2003).

O tipo de calcário utilizado não tem influencia na DMP após 66 meses da realização da calagem (Tabela 02).

Quanto a profundidade, para os dois modos de aplicação ocorreu um menor valor para DMP na camada de 10 – 20 cm, concordando com Pedroso et al. (2004). Segundo Pedroso et al., (2004) a matéria orgânica do solo é o parâmetro principal para existência de grandes agregado, que por sua vez são encontrados em maior quantidade nas camadas superficiais. Em contrapartida Dalbianco et al. (2007) encontraram valores menores para DMP em maiores profundidades de solo.

Tabela 02. Diâmetro médio ponderado (DMP) de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário. FAMV, Passo Fundo, RS

Formas de Aplicação	Tratamentos (Tipos de Calcário)				Média
	Testemunha	Calcítico	Dolomítico	1:1	
0-5 cm					
Superficial	0,60 Aa	0,59 Aa	0,62 Aa	0,58 Aa	0,60 A
Incorporado	0,59 Aa	0,63 Aa	0,60 Aa	0,50 Aa	0,58 A
Média	0,59 a	0,61 a	0,61 a	0,54 a	
5-10 cm					
Superficial	0,54 Aa	0,52 Aa	0,54 Aa	0,53 Aa	0,53 A
Incorporado	0,51 Aa	0,56 Aa	0,62 Aa	0,58 Aa	0,57 A
Média	0,52 a	0,54 a	0,58 a	0,55 a	
10-20 cm					
Superficial	0,50 Aa	0,43 Aa	0,35 Aa	0,39 Aa	0,42 A
Incorporado	0,55 Aa	0,38 Aa	0,29 Aa	0,34 Aa	0,39 A
Média	0,53 a	0,40 ab	0,32 b	0,36 b	

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

O DMP é um parâmetro de qualidade física do solo, que avalia a estrutura do solo, detectando se houve comprometimento da estrutura após uma intervenção mecânica, logo existe a tendência de uniformidade dentro de cada profundidade em relação aos tratamentos a medida que o período entre a intervenção mecânica e a avaliação é

maior. Isso porque em geral logo em seguida da prática de incorporação, a mesma proporciona menor estabilidade de agregados devido à desestruturação da camada que é revolvida durante a incorporação (WOHLENBERG et al., 2004; STONE & SILVEIRA, 1999).

Nesse sentido o contínuo fornecimento de material orgânico serve de energia para a atividade microbiana, cujos subprodutos, constituídos de moléculas orgânicas, atuam como agentes de formação e estabilização dos agregados (MOREIRA & SIQUEIRA, 2006).

#### **4.1.2.1.3 Diâmetro médio geométrico (DMG)**

Em relação ao DMG, diferenças em profundidade são observadas na camada 10-20 cm em relação às demais camadas dos tratamentos tipos de calcários, exceto na testemunha (Tabela 03). A forma de aplicação de calcário também apresentou diferenças nas profundidades em relação à testemunha. Independentemente do tipo de corretivo e forma de aplicação ocorreu diminuição do DMG em relação à testemunha. Isso pode estar relacionado com a estabilidade da microbiota existente nessa camada alterada pela aplicação de calcário e conseqüente alteração do tamanho dos agregados.

Para Campos et al. (1998) o DMG está ligado ao teor de carbono e a atividade microbiana. Então a atividade microbiana é diminuída na profundidade de 10 – 20 cm, não havendo produção de biomassa e por conseqüência efeito sobre o DMG.



Tabela 03. Diâmetro médio geométrico (DMG) de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário. FAMV, Passo Fundo, RS

Formas de Aplicação	Tratamentos (Tipos de Calcário)				Média
	Testemunha	Calcítico	Dolomítico	1:1	
0-5 cm					
Superficial	1,34 Aa	1,34 Aa	1,39 Aa	1,32 Aa	1,35 A
Incorporado	1,31 Aa	1,42 Aa	1,37 Aa	1,19 Aa	1,32 A
Média	1,33 a	1,38 a	1,38 a	1,26 a	
5-10 cm					
Superficial	1,26 Aa	1,17 Aa	1,28 Aa	1,22 Aa	1,23 A
Incorporado	1,24 Aa	1,30 Aa	1,45 Aa	1,32 Aa	1,33 A
Média	1,25 a	1,24 a	1,37 a	1,27 a	
10-20 cm					
Superficial	1,29 Aa	1,11 Aa	1,01 Aa	1,07 Aa	1,12 A
Incorporado	1,33 Aa	1,06 Aa	0,92 Aa	1,02 Aa	1,08 A
Média	1,31 a	1,09 a	0,97 a	1,05 a	

*Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).*

#### 4.1.2.1.4 Índice de estabilidade de agregados (IEA)

Como observado anteriormente para DMG e DMP, o Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) (Tabela 04), não se apresentou responsável em relação aos tratamentos (formas e tipos de calcário).

Tabela 04. Índice de estabilidade de agregados (IEA) de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário. FAMV, Passo Fundo, RS

Formas de Aplicação	Tratamentos (Tipos de Calcário)				Média
	Testemunha	Calcítico	Dolomítico	1:1	
0-5 cm					
Superficial	76,42 Aa	78,70 Aa	79,63 Aa	76,80Aa	77,89 A
Incorporado	75,22 Aa	80,37 Aa	80,62 Aa	72,19Aa	77,10 A
Média	75,82 a	79,53 a	80,13 a	74,49 a	
5-10 cm					
Superficial	79,20 Aa	74,30 Aa	83,68 Aa	76,35Aa	80,89 A
Incorporado	79,83 Aa	79,39 Aa	84,13 Aa	80,21Aa	78,38 A
Média	79,51 a	76,84 a	83,90 a	78,28 a	
10-20 cm					
Superficial	81,23 Aa	76,63 Aa	76,78 Aa	77,34Aa	77,52 A
Incorporado	80,72 Aa	78,06 Aa	73,99 Aa	77,31Aa	77,99 A
Média	80,97 a	77,34 a	75,39 a	77,32 a	

*Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).*

#### 4.1.2.1.5 Resistência mecânica do solo a penetração (RP)

A RP não diferiu entre as formas de aplicação dos corretivos adotados (Tabela 05), considerando que a calagem ocorreu a 66 meses atrás esse efeito não é mais observado. Esses resultados não concordam com Inoue et al. (2002) e Cavalieri et al. (2003) que já haviam apresentado trabalhos demonstrando os efeitos da mobilização do solo na redução da resistência do solo à penetração.

O solo apresentou distinta resposta quanto a resistência a penetração, conforme a profundidade de leitura. Esse resultado já era esperado devido a variabilidade vertical existente no solo. Essa diferença de RP, no caso mais baixa (795,31 kPa para aplicação superficial e 829,56 kPa para calcário incorporado) em superfície (0 – 10 cm) tem origem em um maior teor de matéria orgânica. Quando

analisamos em maiores profundidades (30 – 40 cm) a RP de 2475,50 para aplicação em superfície e 2439,88 kPa para incorporação tem seu resultado influenciado pela densidade do solo e pelo menor teor de matéria orgânica.

Tabela 05. Resistência mecânica do solo a penetração (RP) de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário FAMV, Passo Fundo, RS

Formas de Aplicação	Tratamentos (Tipos de Calcário)				Média
	Testemunha	Calcítico	Dolomítico	1:1	
0-10 cm					
Superficial	867,25 Aa	774,00Aa	828,50Aa	711,50Aa	795,31A
Incorporado	847,50 Aa	811,00Aa	833,50Aa	826,25Aa	829,56A
Média	857,38 a	792,50 a	830,88 a	768,88 a	
10-20 cm					
Superficial	1413,25 Aa	1416,00Aa	1247,50Aa	1471,50Aa	1387,06A
Incorporado	1245,74 Aa	1286,75Aa	1330,75Aa	1331,75Aa	1298,75A
Média	1329,50 a	1351,38 a	1289,13 a	1401,63 a	
20-30 cm					
Superficial	1745,75 Aa	1754,50Aa	1864,50Aa	1913,75Aa	1819,63A
Incorporado	1826,75 Aa	1862,00Aa	1837,25Aa	1895,00Aa	1855,25A
Média	1786,25 a	1808,25 a	1850,88 a	1904,38 a	
30-40 cm					
Superficial	2200,50 Aa	2644,75Aa	2460,75Aa	2596,00Aa	2475,50A
Incorporado	2519,00 Aa	2412,25Aa	2495,25Aa	2333,00Aa	2439,88A
Média	2359,75 a	2528,50 a	2478,00 a	2464,50 a	

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

O impedimento físico provocado por valores de RP acima de 2 MPa, tem mostrado estreita interação com o crescimento das plantas, uma vez que as raízes parecem dispor de mecanismos de detecção dessas condições, enviando sinais à parte aérea que controlam o crescimento (MASLE & PASSIOURA, 1987), fato esse não observado no presente estudo e no estudo de Carvalho (2006).

Para a cultura da soja, os valores de RP crítica variam entre autores. Cintra & Mielniczuk (1983), trabalhando em Latossolo

argiloso, encontraram restrição às raízes com valores de RP de 1,08 MPa, enquanto Rosolem et al. (1994), trabalhando em Latossolo arenoso, encontraram total impedimento acima de 2,0 MPa. Apesar desta variação, o valor de 2 MPa tem sido aceito como valor crítico, impeditivo ao crescimento radicular, à absorção de água e nutrientes e à produção das culturas (TAYLOR et al., 1966).

#### 4.1.3 Formas de aplicação e tipos de calcário e sua relação com as variáveis relacionadas à raiz da soja

##### 4.1.3.1 Comprimento da raiz principal de soja

O comprimento da raiz principal foi diferenciado em relação as formas e tipos de calcário (Tabela 06).

O calcário aplicado superficial apresentou os menores valores de comprimento da raiz principal (22,82 cm) quando comparado ao método incorporado (32,60 cm) (Tabela 06). Isso é devido as condições químicas melhores quando o calcário foi incorporado.

Tabela 06. Comprimento da raiz principal (cm) de soja em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário em um latossolo argiloso. FAMV, Passo Fundo, RS

Formas de Aplicação	Tratamentos (Tipos de Calcário)				Média
	Testemunha	Calcítico	Dolomítico	1:1	
Superficial	20,78 Aa	23,20 Ba	22,98 Ba	24,33 Ba	22,82 A
Incorporado	22,70 Ab	35,43 Aa	35,88 Aa	36,40 Aa	32,60 A
Média	21,74 a	29,32 a	29,43 a	30,37 a	

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Os tipos de calcário aplicados em superfície não apresentam influencia sobre o comprimento da raiz principal. Dentre os tipos de corretivos, incorporados, todos diferiram da testemunha evidenciando apenas que ocorreu maior crescimento do sistema radicial pela correção do pH e  $Al^{3+}$  e incremento de Ca e Mg, crescendo mais quando da aplicação dos corretivos.

Vale lembrar que o alumínio em altas concentrações acarreta na paralisação do crescimento, causando um engrossamento das raízes, devido ao enrijecimento da parede e à inibição da divisão celular (FOY et al., 1978). Em solos com características químicas ácidas o suprimento de elementos essenciais a produção vegetal das culturas pode não ser adequado, devido a presença de  $Al^{3+}$ , fato esse evidenciado no presente estudo.

#### **4.1.3.2 Volume de raiz de soja**

O volume total de raiz não diferiu entre a forma de aplicação de calcário, nem quanto ao tipo de calcário aplicado (Tabela 07). Isso se deve ao fato que o parâmetro não é sensível as modificações internas na raiz em decorrência da presença de  $AL^{3+}$  em camadas de solos.

Tabela 07. Volume da raiz (cm<sup>3</sup>) de soja em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário em um latossolo argiloso. FAMV, Passo Fundo, RS

Formas de Aplicação	Tratamentos (Tipos de Calcário)				Média
	Testemunha	Calcítico	Dolomítico	1:1	
Superficial	10,60 Aa	12,50 Aa	12,10 Aa	13,44 Aa	12,16 A
Incorporado	12,94 Aa	11,16 Aa	10,50 Aa	14,00 Aa	12,15 A
Média	11,77 a	11,83 a	11,30 a	13,72 a	

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

#### 4.1.4 Formas de aplicação e tipos de calcário e sua relação com as produtividades de aveia e soja

##### 4.1.4.1 Massa seca palha aveia

Conforme a tabela 08 observa-se que não houve diferença para o rendimento de massa seca de aveia entre as formas de aplicação de calcário e os diferentes calcários aplicados.

Tabela 08. Rendimento de massa seca de aveia em função do tipo de calcário e da forma de aplicação. FAMV, Passo, Fundo, RS

Formas de Aplicação	Tratamentos (Tipos de Calcário)				Média
	Testemunha	Calcítico	Dolomítico	1:1	
Superficial	5263 Aa	5119 Aa	5239 Aa	5105 Aa	5182 A
Incorporado	5158 Aa	5015 Aa	5134 Aa	5000 Aa	5077 A
Média	5211 a	5067 a	5187 a	2803 a	

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Em virtude desse resultado, pode-se inferir não haver influência da cultura antecessora (aveia) sobre a cultura subsequente (soja) Tabela 09.

Segundo Miyazawa et al., (1993) a elevada quantidade de resíduos vegetais ao solo é um dos principais requisitos para o sucesso do sistema plantio direto em condições tropicais e subtropicais. Melhorando as condições químicas e físicas desse solo que foi mobilizado a seis anos atrás. Por não haver diferenças entre os tratamentos assume-se que todos eles são eficazes na produção de massa de plantas.

#### **4.1.4.2 Rendimento de grãos de soja**

O rendimento de grãos de soja foi diferente em relação a forma de aplicação do calcário, sendo de 1798 kg ha<sup>-1</sup> quando aplicado superficialmente e 2248 kg ha<sup>-1</sup> quando incorporado (Tabela 09). Os demais tratamentos foram efetivos para variar o rendimento da soja comparados a testemunha, apresentaram maior rendimento com um incremento mínimo na produção de 700 kg ha<sup>-1</sup> em relação aos tratamentos que receberam a calagem.

Vale ressaltar que a adubação realizada foi calculada para um rendimento esperado de 4.000 kg ha<sup>-1</sup>. A diferença entre o esperado e o estimado foi devido a condição de baixa pluviometria na região, haja visto, que não houve limitações nutricionais nem de interferência de plantas daninhas e de doenças.

Também, o rendimento de grãos de soja é altamente afetado pela distribuição de Ca e Mg trocáveis no perfil do solo. (CAÍRES et al., 2003) e (MOREIRA et al 2001). Assim, espera-se que, mesmo com rendimento similar entre os tratamentos, a forma de aplicação afeta o perfil de nutrientes no solo, principalmente para Ca e Mg. Por conseqüência reflete em diferentes produtividades. É

interessante observar que 450 kg ha<sup>-1</sup> a mais no rendimento da cultura da soja por ocasião do calcário incorporado é explicado pelo desenvolvimento radicial ou seu impedimento no tratamento superficial (Tabela 06; Figuras 03, 04, 05 e 06).

Tabela 09. Rendimento de grão de soja em função do tipo de calcário e da forma de aplicação. FAMV, Passo Fundo, RS

Formas de Aplicação	Tratamentos (Tipos de Calcário)				Média
	Testemunha	Calcítico	Dolomítico	1:1	
Superficial	1391 Ab	2021 Aa	1834 Aa	1945 Aa	1798 B
Incorporado	1505 Ab	2427 Aa	2461 Aa	2599 Aa	2248 A
Média	1448 b	2224 a	2148 a	2272 a	

*Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p≤0,05).*

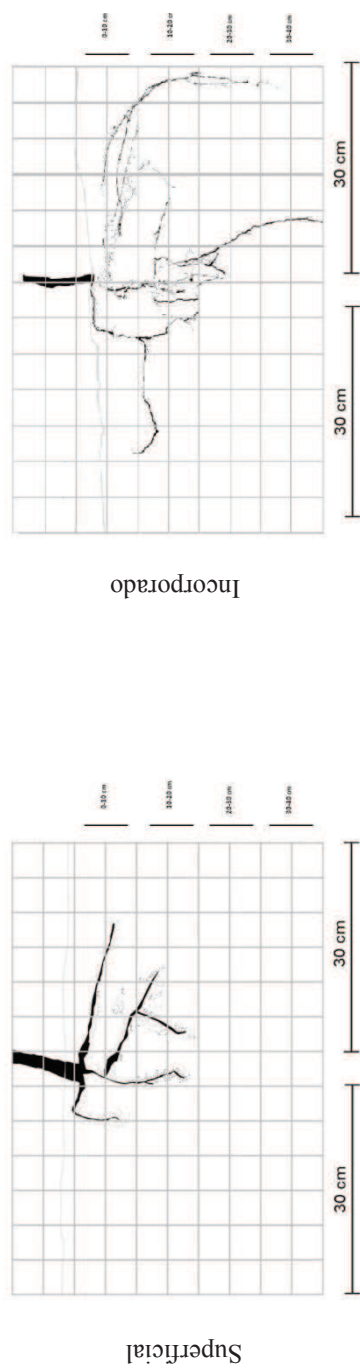


## 4.2 Estudo 2

Esse estudo realizado em condição específica, previstas no material e métodos, tenta elucidar as respostas morfológicas das raízes em seu crescimento em decorrência das variações das propriedades químicas e físicas do solo afetadas pela aplicação de formas e tipos de calcário. Para isso serão apresentados resultados das plantas-referência de cada tratamento para um bloco, assim como os resultados em diferentes profundidades para pH,  $Al^{3+}$ , Ds e RP.

Ressalta-se que cada figura apresentada, representa um tipo de calcário e dentro da figura, a imagem da esquerda é referente ao tratamento calcário superficial e a direita o tratamento incorporado. Faz parte da figura uma tabela com os resultados da análise química e física do solo.

Como estratégia de representação dos dados estatísticos de todas as imagens pertencentes ao estudo 2 utilizou-se o seguinte critério: quando da ocorrência de interação entre a forma de aplicação e a profundidade analisada, essa informação está inserida na imagem representando essa interação, quando da não interação os dados de método de aplicação e de profundidade estão representados separadamente.



Prof. (cm)	pH		Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> )		DS (g.cm <sup>-3</sup> )	Prof. (cm)	DS (g.cm <sup>-3</sup> )	Aplic.	RP (MPa)	Prof. (cm)	RP (MPa)
	Sup.	Inc.	Sup.	Inc.							
00-10	6,25 Aa	5,83 Ba	0,00 Ac	0,00 Ac	1,48 A	00-10	1,39 C	Sup.	1,772 A	00-10	0,382 D
10-20	5,35 Bb	5,85 Aa	0,90 Ab	0,20 Bc	1,41 B	10-20	1,42 B	Sup.	1,746 A	10-20	1,349 C
20-30	5,00 Bc	5,28 Ab	1,18 Aab	0,50 Bb		20-30	1,47 A	Inc.		20-30	2,422 B
30-40	4,80 Ac	4,93 Ac	1,35 Aa	1,03 Ba		30-40	1,49 A			30-40	2,882 A
C.V. (%)	2,40		18,53		1,18		1,14		3,86		4,92

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Figura 08. Sistema radicial do tratamento calcário calcítico em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário (esquerda aplicação superficial e a direita aplicação incorporada).

As imagens da Figura 3 indicam que quando o calcário é aplicado em superfície a distribuição espacial do sistema radicial é verificado até 18 cm de profundidade, enquanto que incorporado observa-se vigoroso crescimento até 40 cm de profundidade.

Paralelamente a Figura 03, tem-se que o pH do solo responde entre a forma de aplicação do corretivo e a profundidade. A média geral dos valores de pH em relação a forma de aplicação diferem mais expressivamente com a profundidade no tratamento superficial. Quando o pH for comparado dentro da forma de aplicação do corretivo, a variação entre o pH das profundidade de 0-10 e 30-40 foram para a aplicação superficial de 1,45 (profundidade de 0-10) contra apenas 0,92 (profundidade 30 - 40 cm) quando incorporado.

O crescimento radicial da soja avaliado por Caires et al. (2002) indicaram que em solo com até 1,5, 1,2 e 0,8  $\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$  de  $\text{Al}^{3+}$ , respectivamente, nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-40 cm não foi suficiente para afetar o desenvolvimento do sistema radical da soja. Entretanto no experimento, observa-se claramente a redução da ocorrência de raízes em profundidade de 15 cm e ausência de raízes em profundidade maior que 20 cm, já no tratamento com incorporação do calcário nota-se que as raízes desenvolveram-se até 40 cm.

O crescimento radicial em profundidade será maior, caso o solo proporcione um ambiente químico e físico favorável (RUSSEL, 1981). Também é verificado nas plantas um efeito compensatório no crescimento radicial em camadas de solo mais adequada.

Dentre os fatores que mais impedem o crescimento radicial pleno, muitos estudos foram implementados de forma isolada.

Aqui tentaremos interpretar o crescimento radicial baseado nas propriedades físicas e químicas conjuntamente.

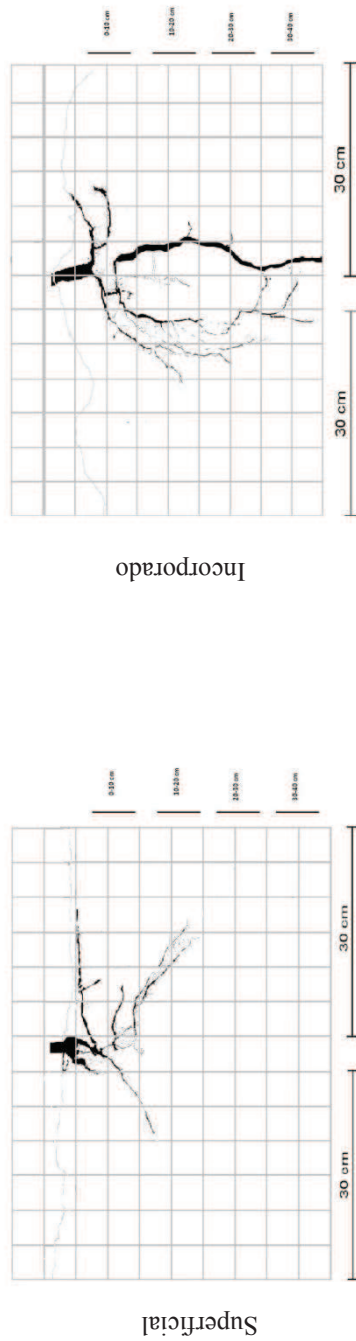
Nesse sentido, de acordo com Roque et al. (2008) a RP é um dos principais fatores limitantes ao rendimento das culturas por limitar o desenvolvimento das raízes. No presente estudo o maior valor de RP foi obtido na camada de 30 – 40 cm, (2882 kPa) não sendo considerado por Carvalho et al., (2006) como limitante para o desenvolvimento normal das plantas.

Embora existam diferenças nos valores de densidade do solo para as profundidades, esta informação não pode ser avaliada de forma isolada, pois se trata de uma característica de solo influenciada pela mineralogia e teor de matéria orgânica que por sua vez são variáveis em profundidade.

O impedimento ao crescimento radicial observado no tratamento calcário superficial pode ser explicado pelos teores de  $Al^{3+}$  em relação ao calcário incorporado que são superiores na ordem de 350% para a camada de 10 – 20 cm; 136%, camada de 20-30 cm e 31 % na camada de 30 – 40 cm (Figura 3). Isso denota que o efeito químico, teor elevado de  $Al^{3+}$ , é responsável pela ausência de raízes abaixo de 20 cm. Isso está de acordo com a premissa que as raízes não procuram camadas que não sejam adequadas ao crescimento na presença de camadas adequadas em superfície.

O pH respalda os resultados encontrados como também as inferências realizadas para o alumínio, haja visto que são relacionados os dois parâmetros. O bom desenvolvimento da raiz, considerando o pH, de acordo com CQFS RS/SC (2004) é quando o mesmo está na faixa de 5,5 a 6,0.

Com essa premissa, a aplicação de calcário em superfície proporciona uma única faixa adequada de pH, de 10 – 20 cm, pois a camada de 0-10 está acima de pH 6 e a camada de 20-40 está abaixo de 5,5. Enquanto que, para o método incorporado o pH ideal está numa camada maior de 0 – 30 cm. Observam-se as imagens percebe-se que estes intervalos considerados ideais concentram a maior quantidade de raízes.



Aplic.	pH	pH		Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> )		Al <sup>3+</sup> (cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> )		DS (g.cm <sup>-3</sup> )		DS (g.cm <sup>-3</sup> )		RP (MPa)		RP (MPa)	
		Prof. (cm)		Aplic.	Prof. (cm)	Aplic.	Prof. (cm)		Aplic.	Prof. (cm)		Aplic.	Prof. (cm)		
Sup.	5,26 B	00-10	6,11 A	Sup.	0,84 A	Sup.	1,45 A	00-10	1,41 A	Sup.	1,588 A	00-10	0,392 A		
		10-20	5,53 B		0,33 C		1,43 A	10-20	1,43 A			10-20	1,228 C		
Inc.	5,56 A	20-30	5,13 BC	Inc.	0,60 B	Inc.	1,45 A	20-30	1,47 A	Inc.	1,614 A	20-30	2,199 B		
		30-40	4,89 C		1,65 A		1,48 A	30-40	1,48 A			30-40	2,585 A		
C.V. (%)	4,23		5,60		32,49		6,63		5,14		15,24		10,94		

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

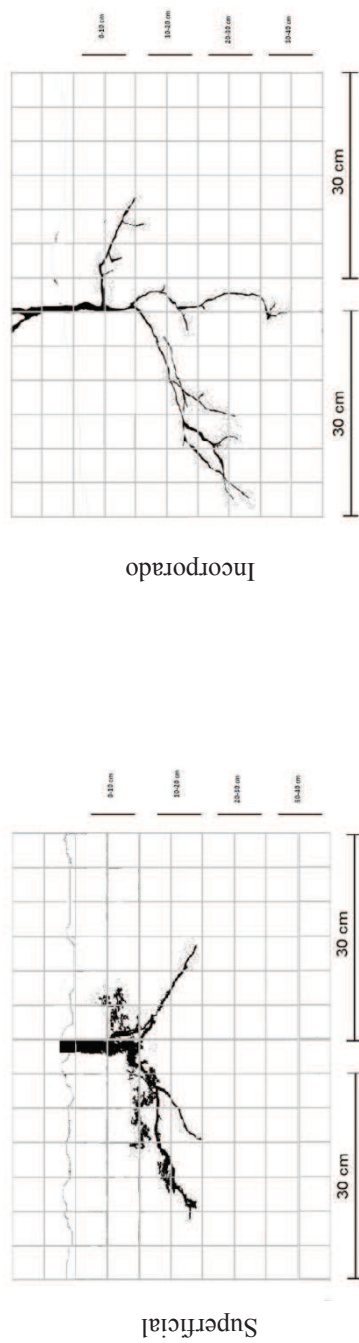
Figura 09. Sistema radicial do tratamento calcário calcítico 1:1 dolomítico em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário (esquerda aplicação superficial e a direita aplicação incorporada).

Na Figura 4, observa-se a diferença visual do desenvolvimento das raízes no tratamento mistura 1:1 de calcário calcítico: dolomítico. As raízes no tratamento superficial apresentam-se confinadas nos primeiros 15 cm, tendo indícios de crescimento até 20 cm. Enquanto que para o calcário incorporado o crescimento foi além de 40 cm.

Na lógica de ser um fator físico ou químico principal observa-se a presença de  $Al^{3+}$  com baixo pH como fator provável de limitação ao crescimento. Isso porque a aplicação de calcário em superfície o pH do solo apresentou valores menores de 5,3 que de acordo com Malavolta (1980) apresentam teores de  $Al^{3+}$ .

No parâmetro  $Al^{3+}$ , o método de aplicação de calcário incorporado com teor de  $0,60 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$  neutralizou uma maior quantidade de  $Al^{3+}$ , que diferiu estatisticamente da aplicação em superfície com teor de  $0,84 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$ , provavelmente também devido ao maior contato do calcário com o solo proporcionado pela mobilização do solo (figura 04).

O fator físico de impedimento ao crescimento radicial, vê-se que a densidade do solo não diferiu ( $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ ) entre as formas de aplicação de calcário, conforme observado no tratamento calcítico (Figura 3). Também, a resistência mecânica do solo a penetração não diferiu entre as duas formas de aplicação de corretivo. Entretanto entre as profundidades a RP não ultrapassou de 3 MPa.



Aplic.	pH	Prof. (cm)		pH	Prof. (cm)		DS (g.cm <sup>-3</sup> )		Prof. (cm)		RP (MPa)
		Sup.	Inc.		Sup.	Inc.	Aplic.	RP (MPa)			
Sup.	5,21 B	00-10	0,10 Aa	5,95 A	00-10	1,47 A	00-10	1,42 B	00-10	0,442 D	
		10-20	0,80 Ab	5,40 B	10-20	1,46 AB	10-20	1,46 AB	10-20	1,253 C	
		20-30	1,50 Aa	5,07 BC	20-30	1,46 A	20-30	1,50 A	20-30	2,254 B	
Inc.	5,38 A	30-40	1,60 Aa	4,76 C	30-40	1,46 A	30-40	1,50 A	30-40	2,709 A	
			28,62	5,60		6,73		2,90		14,80	
	C.V. (%)	4,23									13,76

*Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p≤0,05)*

Figura 10. Sistema radicial do tratamento calcário dolomítico em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário (esquerda aplicação superficial e a direita aplicação incorporada).



Na figura 5, observa-se novamente como para os tratamentos anteriores diferença visual do desenvolvimento das raízes no tratamento dolomítico. As raízes no tratamento superficial apresentam-se confinadas nos primeiros 20 cm, enquanto que para o calcário incorporado o crescimento foi até 35 cm.

Como fator físico, a densidade do solo que foi de  $1,47 \text{ Mg m}^{-3}$  para a aplicação em superfície e  $1,46 \text{ g cm}^{-3}$  quando incorporado não diferiu (Figura 05), entre formas de aplicação do calcário, provavelmente devido ao longo período sem revolvimento. Isso concorda com Warrick e Nielsen (1980) que afirmam que a taxa de variação de densidade do solo é baixa.

Já a resistência mecânica do solo a penetração diferiu somente em relação a profundidade (Figura 05), não tendo interação entre as formas de aplicação de calcário. Mesmo assim, na maior profundidade o valor de RP não ultrapassou 2709 kPa na média de ambas as formas, não chegando então a um valor limitante para o crescimento radicial.

Quanto ao fator químico, o pH diferiu entre os métodos de aplicação (Figura 05), sendo mais eficiente quando incorporado, pelo maior contato das partículas com o solo, conforme discutido anteriormente. Os valores de  $\text{Al}^{3+}$ , na camada de 0 – 10 cm são baixos ( $0,10 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$  quando aplicado superficialmente e  $0,15 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$  quando incorporado) e não diferem entre os métodos de aplicação, porém nas camadas de 10 – 20 cm e 20 – 30 cm há diferença. Na camada de 10 – 20 e 20-30 cm o teor de alumínio na forma de aplicação incorporada é, respectivamente, de  $0,55 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$  e  $0,60 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$  menor que quando o calcário foi aplicado em superfície. A

interação mostra que a incorporação é mais eficiente para neutralizar o alumínio nestas profundidades. Na camada de 30 – 40 cm há um teor de  $Al^{3+}$  menor no método incorporado, porém sem diferença estatística.

Esta informação leva a conclusão que o desenvolvimento maior das raízes no método incorporado (Figura 05) é devido a maior eficiência da correção do solo em maior profundidade e a minimização da frente de alcalinização

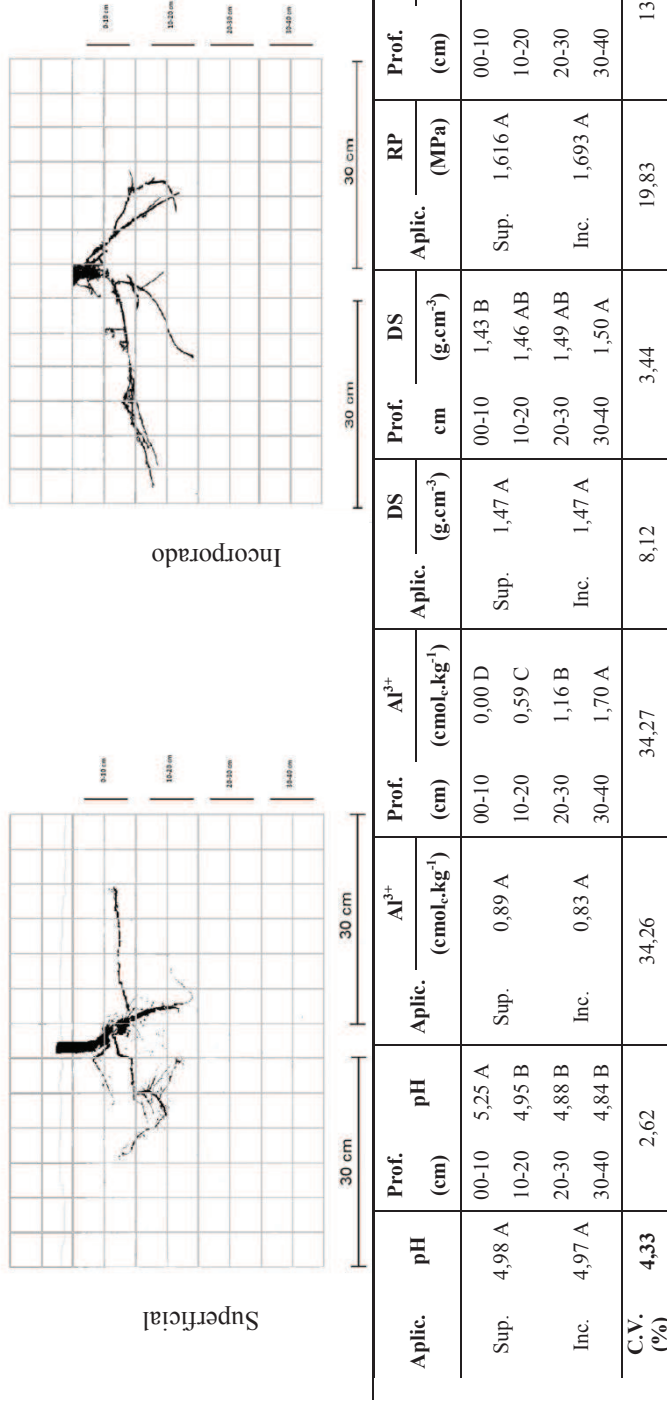


Figura 11. Sistema radicial do tratamento testemunha em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário (esquerda aplicação superficial e a direita aplicação incorporada).

No tratamento testemunha (Figura 6), devido a não utilização de corretivos, apenas a influência da ação mecânica para simular a incorporação do calcário, percebe-se que em ambas as situações há o impedimento ao crescimento radicial. Isso sugere que após 66 meses os problemas ao crescimento radicial são decorrentes não mais do efeito da forma de aplicação mas da carência de camadas de solo adequadas do ponto de vista químico para o crescimento, principalmente representada pelo parâmetro  $Al^{3+}$ , que apresentou valor de  $1,70 \text{ cmol}_c.\text{kg}^{-1}$  na profundidade de 30 – 40 cm diferindo entre as formas de aplicação.

Já que a DS não apresentou diferença, com média de  $1,47 \text{ g.cm}^{-3}$  para ambas as formas de aplicação e a RP máxima (2793 kPa) também não apresentou valores limitantes (figura 06), assevera-se que o comportamento do crescimento radicial da soja na safra 2009/2010 está ligado ao teor de  $Al^{3+}$  no solo, que aumenta conforme o aumento da profundidade em aplicações de corretivo superficiais.

Através da compilação das informações apresentadas e discutidas, pode-se afirmar que a calagem de forma incorporada é eficiente para melhorar o desenvolvimento das raízes em profundidade contrariando as conclusões de Miotto (2009).

#### **4.2.1 Discussão geral quanto aos fatores responsáveis pelo impedimento radicial**

Na Figura 4, entre as profundidades (0-40 cm) houve diferença entre os valores de pH, apesar da quantidade de calcário ser similar. Este fato ocorre devido ao contato entre o calcário e o solo ser

facilitada com a incorporação, fazendo com que a reação de dissolução do calcário seja maior.

Na média do valor de pH, percebe-se que mesmo com a incorporação do calcário existe uma grande variação do pH em profundidade. De acordo com Teixeira et al. (2003), os sistemas onde o revolvimento de solo é maior, a distribuição dos teores de carbono orgânico e dos micronutrientes ao longo do perfil do solo é mais homogênea. Como consequência as raízes apresentam um desenvolvimento satisfatório em uma espessa camada de solo.

Embora não tenha ocorrido interação entre o modo de aplicação e as profundidades para pH e  $Al^{3+}$ , percebe-se que o pH do solo com aplicação em superfície é 5,26, pouco abaixo do preconizado pelo CQFS RS/SC (2004) que é de 5,5 e difere do incorporado que é 5,56 (Figura 04). Pode-se inferir que se na camada superficial com o calcário aplicado em superfície a condição está abaixo do adequado, a situação em profundidade é de valores de pH ainda menores, como comprovado pelos dados químicos. Isso se consistiria em um impedimento ao crescimento radicular como observado por inúmeros autores. Em contrapartida Letey (1985), verificou que o aumento da resistência mecânica do solo a penetração afetou o desenvolvimento radicular, consequentemente afetou a produtividade.

De acordo com Torres e Saraiva (1999) a quantidade total de raízes no perfil do solo, algumas vezes, pode ser semelhante, independentemente das condições de solo verificadas nas diferentes profundidades, evidenciando assim a característica das raízes de compensar as restrições de impedimento mecânico, tentando suprir as necessidades fisiológicas da planta.

Assim, nesse estudo as condições, principalmente químicas do solo, não foram satisfatórias ao crescimento e desenvolvimento do sistema radicular da soja, mesmo a planta tendo esse efeito compensatório da condição local.

## 5 CONCLUSÕES

Pode-se concluir com o trabalho que: i) após cinco anos da aplicação dos tratamentos a acidez do solo manteve-se controlada, principalmente em superfície quando o calcário foi aplicado superficialmente, enquanto esse efeito foi observado em profundidade quando o calcário foi incorporado no momento de sua aplicação; ii) após cinco anos da aplicação dos tratamentos, o efeito dos diferentes calcários e sua combinação sobre os parâmetros estudados é marginal; iii) a forma de aplicação dos calcários é fundamental no crescimento radicial da soja, tendo o fator químico, principalmente concernindo o teor de  $Al^{3+}$ , como principal mecanismo de impedimento ao crescimento radicial em profundidade.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; MAFRA, A.L.; FONTANA, E.C. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, p. 799-806, 2003.

ALCARDE, J.C. Corretivos da acidez dos solos: características de qualidade dos corretivos da acidez do solo. In: SIMPÓSIO SOBRE ACIDEZ E CALAGEM, REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO. 15, 1983, Campinas. *Anais...* Campinas: USP, 1983. p.10-31.

ALCARDE, J. C.; RODELLA, A. A. Qualidade e Legislação de fertilizantes e corretivos. In: Tópicos em Ciência do Solo. vol.3. (2003) - Viçosa - MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. p.292-331.

ALMEIDA, J.M.; BERTOL, I.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JR., W.A. Propriedades químicas de um cambissolo húmico sob preparo convencional e semeadura direta após seis anos de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.29, n.1, p.437-445, 2005.

AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I. Alterações de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, v. 36, n. 4, p. 695-702, 2001.

AMARAL, A.S.; ANGHIONI, I.; HINRICHIS, R.; BERTOL, I. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.359-367, 2004.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedade físicas de um latossolo vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, n.2, p.337-345, 2009.



AZEVEDO, A.C., KÄMPF, N., BOHNEN, H. Alterações na dinâmica evolutiva de Latossolo Bruno pela calagem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.20, n.2., p.191- 198, 1996.

AZEVEDO, A.C.; BONUMÁ, A.S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em Latossolos. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 34, n. 2, p. 609-617, mar./abr. 2004.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 21, p. 105-112, 1997.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (ed.). Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 9-26.

BENGOUGH, A. G.; MULLINS, C. E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *Journal of Soil Science*, v. 41, p. 341-358, 1990.

BENNIE, A.T.P. Growth and mechanical impedance. In: ESHEL, Y.W.A.; KAFKAFI, U. Plant roots the hidden half. New York: M. Dekker, p.453-470. 1996.

BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. *Scientia Agrícola*, Lavras, v. 58, p. 555-60, 2001.

BORTOLUZZI, E.C. & TESSIER, D. La pratique du chaulage en système de semis direct: une 349 expérience au Sud du Brésil (Rio Grande do Sul). *Étude de Gestion de Sol*, Orléans, 9:187-196, 2002.

BORTOLUZZI, E. C.; RHEINHEIMER, D. S.; PELLEGRINI, J.B.R.; GONÇALVES, C.S.; MARONEZE, A. M.; KURZ, M. H. S.; BACAR, N.; ZANELLA R. Investigation of the occurrence of pesticide residues in rural wells and surface water following application to tobacco. *Química nova*, vol. 30, no. 8, 1872-1876, 2008.

BRASIL. Instituição Normativa nº 004 de 02/08/2004. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. (Aprova as definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos corretivos de acidez, corretivos de alcalinidade, corretivos de sodicidade e dos condicionadores de solo, destinados à agricultura). Diário Oficial da União. Brasília, 2004.

CAIRES, E.F., BANZATTO, D.A., FONSECA, A.F. Calagem na superfície em sistema de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, p.161-169, 2000.

CAIRES, E.F.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J. & KUSMAN, M.T. Correção da acidez do solo, crescimento radicular e nutrição do milho de acordo com a calagem na superfície em sistema plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:1011-1022, 2002.

CAIRES, E.F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J.; KUSMAN, M.T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.275-286, 2003.

CAIRES, E.F.; CORRÊA, J.C.L.; CHURKA, S.; BARTH, G.; GARBUIO, F.J. Surface application of lime ameliorates subsoil acidity and improves root growth and yield of wheat in an acid soil under no-till system. *Scientia Agrícola*, v.63, p.502- 509, 2006.

CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. *Compactação do solo e desenvolvimento de plantas*. Piracicaba: USP/ESALQ, 1997. 132p.

CAMARGO, C.E.O.; FERREIRA FILHO, A.W.P.; FREITAS, J.G. Avaliação de genótipos de centeio, triticale, trigo comum e trigo duro quanto à tolerância ao alumínio em solução nutritiva. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v.55, n.2, 1998.

CAMILO, N. de F.P. *Produtividade do cafeeiro em resposta ao manejo da calagem e gessagem em latossolo de Cerrado*. 2007. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas/Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

CAMPOS B.C. de.; REINERT, D. J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRESE, C. Estabilidade estrutural de um latossolo vermelho-escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. *Revista Brasileira do Solo*, Campinas, v.19 p.121-126, 1998.

CARGNELUTTI, A.F., REINERT, D.J., BORGES, D.F. Recuperação da estabilidade estrutural induzida pelo plantio direto, de solo que recebeu preparo convencional por dois anos. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13, Águas de Lindóia, 1996. *Trabalhos...* Campinas: *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 1997. (CD Rom, comissão 6, trabalho 81).

CARVALHO, G.J.; CARVALHO, M.P.; FREDDI, O.S. & MARTINS, M.V. Correlação da produtividade do feijão com a resistência à penetração do solo sob plantio direto. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 10:765-771, 2006.

CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C. S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho eutroférico sob dois sistemas de manejo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, Ribeirão Preto, 2003. *Resumo expandido*. Ribeirão Preto: SBCS, 2003. CD-ROM.

CENTURION, J. F.; DEMATTÊ, J. L. I.; FERNANDES, F. M. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades químicas de um solo sob cerrado cultivado com soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 9, n. 3, p. 267-270, 1985.

CINTRA, F. L. D.; MIELNICZUK, J.; SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 7, p. 323-7, 1983.

CODOGNOTTO, L. M.; SANTOS, D. M. M.; LEITE, I. C.; MARIN, A.; MADALENO, L. L.; KOBORI, N. N.; BANZATTO, D. A. Efeito do alumínio nos teores de clorofilas de plântulas de feijão-mungo e labe-labe. *Revista Ecosistema, Espírito Santo do Pinhal*, v. 27, n. 2, p. 27-39, 2002.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 10.ed. Porto Alegre: *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*. Núcleo Regional Sul. 2004. 400p.

COSTA, C.N.; CASTILHOS, R.M.V; LEDEMAR, C.; KONRAD, E.E.; PASSIANOTO, C.C. Efeitos do alumínio na morfologia de raízes e na cinética de absorção de potássio em milho. *Revista Brasileira de Agrociência*, Pelotas, v.6, n.3, p. 251-253, 2000.

DALBIANCO, L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; LIMA, C.L.R.E. GUBIANI, P.I. Estabilidade de agregados após calagem superficial em um latossolo vermelho sob plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, Gramado, 2007. *Resumos...* Gramado, 2007.

DE MARIA. I. C.; CASTRO. O. M.; SOUZA DIAS. H. Atributos físicos do solo e crescimento radicular de soja em Latossolo Roxo sob diferentes métodos de preparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 23. p. 703-709. 1999.

DELHAIZA, E.;RYAN, P.R *Aluminium toxicity and tolerance in plants*. Plant ohysiology, Camberra, v. 107, p315-321, 1995

DEXTER, A.R.; CZYZ, E.A.; GATE, O.P. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. *Soil Tillage*, v.79, p.185-189, 2004.

ERNANI, P.B. Química do solo e disponibilidade de nutrientes. Lages: O Autor, 2008. 230 p. : il.

FAGERIA, N.K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. *R. Bras. Eng. Agric. Amb.* , 2:6-16, 1998.

FOY. C.D.; CHANEY. R.L.; WHITE. M.C. The physiology of metal toxicity [Plant Stress Lab. and Biological Waste Management and Soil Nitrogen Lab.]. USDA. ARS. Beltsville. MDAttnu. *Review Plant Physiology*. 29:511-66. 1978.

FUCKS, L.F.; REINERT, D.J.; CAMPOS, B.C.; BORGES, D.F. & SCAPINI, C. Degradação da estabilidade estrutural pela aração e gradagem de solo sob plantio direto por quatro anos. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 10., Florianópolis, 1994. Anais. Florianópolis, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1994. p.196-197

GALLO, R.J.; CATANI, R.A.; CARGANTINI, H. Efeito de três tipos de calcários na reação do solo e no desenvolvimento da soja. *Instituto Agrônomo do Estado de São Paulo*, v.15, n.12, p.121-130, 1956.

GASSEN, D.N.; KOCHHANN, R.A. Benefícios da fauna do solo de plantio direto. In: NUERNBERG, N.J. Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto. Lages: SBCS-Núcleo Regional Sul, 1998. p.151-160.

GATIBONI, L.C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; FLORES, J.P.C, RHEINHEIMER, D.S, KAMINSKI, J. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no SPD consolidado. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 33, n. 2, p.282-290, 2003.

GRIÈVE, I.C.; DAVIDSON, D.A.; BRUNEA, P.M.C. Effects of liming on void space and aggregation in an upland grassland soil. *Geoderma*, London, v.125, p. 39–48, 2005.

GUIMARÃES, C.T. Caracterização da variabilidade genética e alélica da tolerância ao alumínio em gramíneas para sua utilização em programas de melhoramento. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, p.41, 2005.

HAYNES, R.J.; MOKOLOBATE, M.S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, Dordrecht, v.59, p.47-63, 2001.

HOLZSCHUH, M. J. Eficiência de calcário calcítico e dolomítico na correção da acidez de solos sob plantio direto. 2007. 85 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 35. n.7, p. 1493-1500, 2000.

IMHOFF, C.S. Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de latossolos e argissolos vermelhos. Piracicaba, 2002. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas)-Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba-SP, 2002.

INOUE, T. T. Influência da escarificação em propriedades físicas de um Latossolo vermelho distroférico após 13 anos de plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., Cuiabá, 2002. *Resumos Expandidos*. Cuiabá: SBCS, 2002., CD-ROM.

KAMINSKI J. Acidez do solo e fisiologia de plantas In... KAMINSKI, J., VOLKWEISS, S. J., BECKER, F. C. (Coord.) II Seminário sobre corretivos da acidez do solo. Santa Maria, p.39-61. 1989.

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, 2000. Cap.2, p.21-39.

KAMINSKI, J.; SANTO, 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. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 573-580, 2005.

KAMINSKI, J.; SILVA, L. S. da; CERETTA, C. A.; RHEINHEIMER, D.S. Acidez e Calagem em Solos do Sul do Brasil: Aspectos Históricos e Perspectivas Futuras. *Tópicos em Ciência do Solo*, v. V, p. 307-332, 2007.

KEMPER, W.D. & CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A.; EVANS, D.D.; WHITE, J.L.; ENSMINGER, L.E. & CLARCK, F.E., eds. *Methods of soil analysis*. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.499-510. (Agronomy Monograph, 9).

KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. *Annual Revision plant physiology molecular biology*, Bristol, v46, p237-260, 1995.

LAL, R.; VANDOREN, D. Influence of 25 years of continuous corn production by three tillage methods on water infiltration of two soils in Ohio. *Soil Till.*, v.16, p.71-74, 1990.

LESTURGEZ, G.; POSS, R.; HARTMANN, C.; BOURDON, E.; NOBLE, A. & RATANA-ANUPAP S. Roots of *Stylosanthes hamata* create macropores in the compact layer of a sandy soil G. *Plant and Soil* 260:101–109, 2004.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. *Soil Science*, v.1, p.277-294, 1985.

LIBARDI, P.L. *Dinâmica da água no solo*. São Paulo: EDUSP, 2005. 335p.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, v.16, p. 107-136, 2003.

LONGO, R.M.; ESPÍNDOLA, C.R.; RIBEIRO, A.I. Modificações na estabilidade de agregados no solo decorrentes da introdução de pastagens em áreas de cerrado e floresta amazônica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.3, n.3, p.276-280, 2011.

LOPES, A.S. *Solos sob cerrado: características, propriedades e manejo*. Piracicaba: Potafos, 1983. 162p.

LOPES, A. S.; SILVA, M. C.; GUILHERME, L. R. G. Acidez do solo e calagem. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas. 1991.15 p. Boletim Técnico; n.1.

LOURENZI, C.R.; BRUNETTO, G.; GIROTTO, E.; VIEIRA, R.C.B.; LOURENSINI, F.; RHEINHEIMER, D.S.; CERETTA, C.A.; KAMINSKI, J. SILVA, L.S.; CASALI, C.A.; MORTELLE, D.F. Alterações na saturação por alumínio e por bases em profundidade decorrentes da aplicação de calcário superficial e incorporada a partir de pastagem natural. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO. 31, 2007. *Resumo expandido*. SBCS, 2007.

MACHADO, J. A., PAULA SOUZA, D. M., BRUM, A. C. R. Efeito de anos de cultivo convencional em propriedades físicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.5, n.3, p.187-189, 1981.

MALAVOLTA, E. Elementos de nutrição mineral de plantas. São Paulo, Agronômica Ceres, 1980. 251p.

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

MASLE, J.; PASSIOURA. Science. *Journal Agronomy*. v. 88, p.640-644, 1987.

MELLO, J.C.A.; VILLAS-BOAS, R.L.; LIMA, E.V.; CRUSCIOL, C.A.C.; BÜLL, L.T. Alterações nos atributos químicos de um Latossolo Distroférico decorrentes da granulometria e doses de calcário em sistemas plantio direto e convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.27, p.553-561, 2003.

MIELNICZUK, J. Potencial de algumas espécies vegetais para a recuperação de solos com propriedades físicas degradadas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas,, v.7, p.197-201, 1983.

MIOTTO, A. *Calcários calcítico e dolomítico e alterações nos atributos de solos e plantas sob sistema de plantio direto*. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2009.



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

MORAES, J.M.; SCHULER, A.E.; GUANDIQUE, M.E.G.; MILDE, L.C.; GROppo, J.D.; MARTILELLI, A.L.; VICTORIA, R.L. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.8, n.1, p.61-70, 2009.

MOREIRA, S.G.; KIEHL, J.C. PROCHNOW, L.I. & PAULETTI, V. Calagem em sistema de semeadura direta e efeitos sobre a acidez do solo, disponibilidade de nutrientes e produtividade do milho e soja. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.71-81, 2001

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. Ed. UFLA: Lavras, 2006. 729p.

PAIVA, P.J.R; VALE, F.R.; FURTINI NETO, A.E.; FAQUIN, V. Acidificação de um Latossolo Roxo do estado do Paraná sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.20, p.71-75, 1996

PALADINI, F. L. S.; MIELNICZUK, J. Distribuição de tamanho de agregados de um solo Podzólico Vermelho-Escuro afetado por sistema de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 15, p. 135-140, 1991.

PEARSON, R.W.; ABRUNA, F. & VICENTE-CHANDLER, J. Effect of lime and nitrogen applications on downward movement of calcium and magnesium in two humid tropical soils of Puerto Rico. *Soil Sci.*, 93:77-82, 1962.

PEDROSO, M.T.; AMADO, T.J.C.; SANTI, A.L.; LEMAINSKI, C.; SCHNATO, R.; MEDEIROS, P.; BILIBIO, R. Níveis de agregação em diferentes zonas de manejo do solo e a sua influência na produtividade. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E ÁGUA, 15, São Paulo. *Anais...* São Paulo: USP, 2004.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; CRESTANA, S. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 25, p. 521-529, 2001.

PEIXOTO, P. H. P.; PIMENTA, D. S.; CAMBRAIA, J. *Alterações morfológicas e acúmulo de compostos fenólicos em plantas de sorgo sob estresse de alumínio*. *Bragantia*, Campinas, v. 66, n.1, p.17-25, 2007.

RAIJ, B. Van.; QUAGGIO, J.A. Uso eficiente de calcário e gesso na agricultura. In.: Espinoza, W. & Oliveira, A.J. de (Eds). *Anais do Simpósio sobre Fertilizantes na Agricultura Brasileira*. Brasília, 1984 EMBRAPA - DEP. 641p

RAMOS, L.A.; NOLLA, A.; KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; CAMARGO, M.S. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 30, p. 849-857, 2006.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ciência e Ambiente*, Santa Maria, v. 27, n.2, p. 29-48, jul./dez. 2003.

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: Density and storage parameters. *Geoderma*, v.10, p.131-146, 2002.

RHEINHEIMER, D.S.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; ROBAINA, A.D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J.P.C.; HORN, D. Aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto consolidado em solo arenoso. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.30, p.263-268, 2000.

RHEINHEIMER, D.S. GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; ROBAINA, A.D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J.P.C.; HORN, D. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.24, p.797-805, 2000.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. *Compactação do solo: Causas e efeitos*. Semina, v.26, p.321-344, 2005.

ROQUE, M,W; MATSURA, E.E; SOUZA, Z.M; BIZARI, D.R; SOUZA, A.L; Correlação linear e espacial entre a resistência do solo ao penetrômetro e a produtividade do feijoeiro irrigado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 32, p.1827-1835, 2008.

ROSOLEM, C.A.; ALMEIDA, A.C.S.; SACRAMENTO, L. V. S. do. Sistema radicular e nutrição da soja em função da compactação do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.53, p.259-266, 1994.

RUSSEL, R.S. Plant root systems - their function and interaction with the soil. In: RUSSEL, R.S.; IGUE,K.; MEHTA, Y.R. The soil/root system in relation to brazilian agriculture. Londrina: IAPAR, 1981. p.3-19.

SÁ, J.C.M. Calagem em solos sob plantio direto na região dos Campos Gerais, Centro-Sul do Paraná. In: SÁ, J.M. Curso sobre manejo do solo no sistema plantio direto. Ponta Grossa: Fundação ABC, 1996. p.73-107

SALET, R.L.; ANGHINONI, I.; KOCHHANN, R.A. Atividade de alumínio na solução de um solo no sistema plantio direto. *Revista Científica Unicruz*, v.1, p.9-13, 1999.

SANCHEZ, P.A.; SALINAS, J.G. Suelos ácidos: Estratégias para su manejo con bajos insumos en America Tropical. Bogotá, *La Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo*, 1983. 93p.

SILVA, V. R. ; REICHERT, José Miguel ; REINERT, Dalvan José ; Bortoluzzi, E.C. . SOIL WATER DYNAMICS RELATED TO STATE OF COMPACTION OF TWO BRAZILIAN OXISOLS UNDER NO-TILL SYSTEM. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* (Impresso), v. 33, p. 1097-1104, 2009.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. da. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.34, n.1, p.83-91, 1999.

TAYLOR, H.M., ROBERTSON, G.M., PARKER, J.J. Soil strength root penetration relations for medium to coarse textured soil materials. *Soil Science*, New York, v.102, p.18-22, 1966.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHEN, H.; VOLKWEISS, S.J. *Análise de solo, plantas e outros minerais*. Departamento de solos – Faculdade de Agronomia. UFRGS. Porto Alegre. 1995. 174 p.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C. Escolha do corretivo da acidez do solo. In: KAMINSKI, J. Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto. Pelotas: SBCS - Núcleo Regional Sul, 2000. p.95-113.

TEIXEIRA, I.R.; SOUZA, C.M.; BORÉM, A.; SILVA, G.F. Variação dos valores de pH e dos teores de carbono orgânico, cobre, manganês, zinco e ferro em profundidade em argissolo vermelho-amarelo, sob diferentes sistemas de preparo de solo. *Bragantia*, v. 62, n. 1, p. 119-126, 2003.

TISDALE, S. L., NELSON, W. L., BEATON, J. D. *Soil fertility and fertilizers*. New York: Macmillan Publishing Company, 4 ed, p. 378-382. 1985.

TORRES, E. & SARAIVA, O. F. Camadas de impedimento mecânico do solo em sistemas agrícolas com a soja. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p. (Circular Técnica, 23)

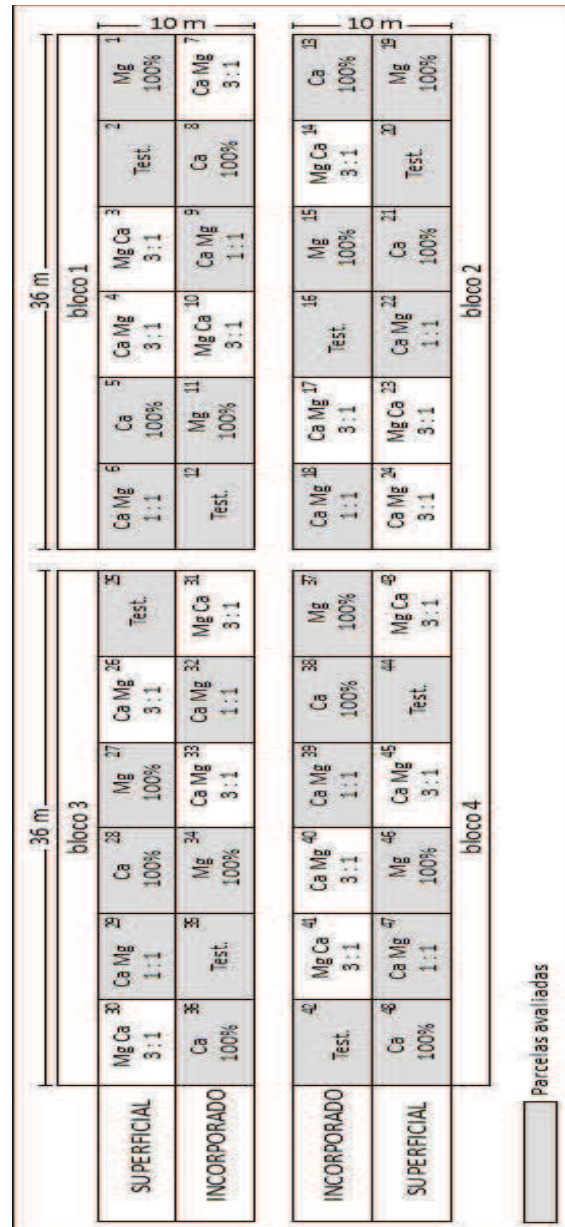
VEPRASKAS, M.J. Plant response mechanisms to soil compaction. In: WILKINSON, R.E. *Plant-environment interactions*. New York: M. Dekker, p.263-287, 1994.

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J.Am. Soc. Agr.* , 28:337-351, 1936.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, *Academic Press*, p.319-344. 1980.

WOHLENBERG, E.V.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BLUME, E. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação e em sucessão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 5, p. 891-900, 2004.

## **Apêndices**



Apêndice 01. Croqui do experimento desenvolvido por Holzschuh (2004)

Apêndice 02. pH de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário FAMV, Passo Fundo, RS

Formas de Aplicação	Tratamentos (Tipos de Calcário)				Média
	Testemunha	Calcítico	Dolomítico	1:1	
0-5 cm					
Superficial	5,44 Aa	6,65 Aa	6,42 Aa	6,22 Aa	6,18 A
Incorporado	5,18 Aa	6,16 Aa	6,00 Aa	6,15 Aa	5,87 B
Média	5,31 b	6,41 a	6,21 a	6,19 a	
5-10 cm					
Superficial	5,06 Aa	5,25 Aa	5,63 Aa	5,10 Aa	5,26 B
Incorporado	5,21 Aa	5,77 Aa	5,47 Aa	6,06 Aa	5,63 A
Média	5,14 a	5,51 a	5,55 a	5,58 a	
10-20 cm					
Superficial	5,12 Aa	4,98 Aa	5,14 Aa	5,07 Aa	5,08 A
Incorporado	5,04 Aa	5,33 Aa	5,39 Aa	5,42 Aa	5,30 A
Média	5,08 a	5,16 a	5,27 a	5,25 a	

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).



Apêndice 03. Alumínio ( $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário. FAMV, Passo Fundo, RS

Formas de Aplicação	Tratamentos (Tipos de Calcário)				Média
	Testemunha	Calcítico	Dolomítico	1:1	
0-5 cm					
Superficial	0,60 Aa	0,03 Aa	0,03 Aa	0,00 Aa	0,16 A
Incorporado	0,86 Aa	0,05 Aa	0,08 Aa	0,03 Aa	0,25 A
Média	0,73 a	0,04 a	0,05 a	0,01 a	
5-10 cm					
Superficial	1,82 Aa	1,08 Aa	0,49 Aa	0,46 Aa	0,96 A
Incorporado	1,25 Aa	0,21 Aa	0,36 Aa	0,24 Aa	0,52 B
Média	1,53 a	0,43 a	0,64 a	0,35 a	
10-20 cm					
Superficial	1,90 Aa	1,44 Aa	1,68 Aa	1,43 Aa	1,61 A
Incorporado	1,91 Aa	0,53 Aa	0,66 Aa	0,55 Aa	0,92 B
Média	1,91 a	0,98 a	1,17 a	0,98 a	1,27

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Apêndice 04. Cálcio ( $\text{cmol}_c \cdot \text{dm}^{-3}$ ) de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário. FAMV, Passo Fundo, RS

Formas de Aplicação	Tratamentos (Tipos de Calcário)				Média
	Testemunha	Calcítico	Dolomítico	1:1	
0-5 cm					
Superficial	3,19 Aa	9,53 Aa	7,26 Aa	9,15 Aa	7,29 A
Incorporado	3,24 Aa	8,00 Aa	6,41 Aa	8,02 Aa	6,42 B
Média	3,21 c	8,77 a	6,84 b	8,58 a	
5-10 cm					
Superficial	2,56 Aa	6,76 Aa	4,25 Aa	5,39 Aa	4,74 A
Incorporado	2,84 Aa	6,87 Aa	5,45 Aa	6,33 Aa	5,37 A
Média	2,70 c	6,81 a	4,85 b	5,86 ab	
10-20 cm					
Superficial	2,42 Aa	3,53 Aa	3,02 Aa	3,87 Aa	3,21 B
Incorporado	2,42 Aa	4,66 Aa	4,34 Aa	4,61 Aa	4,01 A
Média	2,42 a	4,10 a	3,68 ab	4,24 a	

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).

Apêndice 05. Magnésio ( $\text{cmol}_c.\text{dm}^{-3}$ ) de um latossolo argiloso em função de diferentes tipos e formas de aplicação de calcário. FAMV, Passo Fundo, RS

Formas de Aplicação	Tratamentos (Tipos de Calcário)				Média
	Testemunha	Calcítico	Dolomítico	1:1	
0-5 cm					
Superficial	1,22 Aa	1,57 Aa	3,64 Aa	2,47 Aa	2,23 A
Incorporado	1,54 Aa	1,52 Aa	3,22 Aa	2,30 Aa	2,15 A
Média	1,38 c	1,55 c	3,43 a	2,39 b	
5-10 cm					
Superficial	0,99 Aa	1,26 Aa	2,25 Aa	1,74 Aa	1,87 A
Incorporado	1,27 Aa	1,26 Aa	2,87 Aa	2,06 Aa	1,56 B
Média	1,13 c	1,26 c	2,57 a	1,90 b	
10-20 cm					
Superficial	1,08 Aa	0,92 Aa	1,61 Aa	1,25 Aa	1,22 B
Incorporado	1,19 Aa	1,20 Aa	2,52 Aa	1,65 Aa	1,65 A
Média	1,14 b	1,07 b	2,07 a	1,46 b	

Médias seguidas de mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ).