

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

**ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM ARGISSOLO E RENDIMENTO  
DE CULTURAS EM FUNÇÃO DO SEU REVOLVIMENTO NA REAPLICAÇÃO  
DE CALCÁRIO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Alaerto Luiz Marcolan  
(Dissertação de Mestrado)

Porto Alegre (RS), Brasil  
Março de 2002

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

**ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM ARGISSOLO E RENDIMENTO  
DE CULTURAS EM FUNÇÃO DO SEU REVOLVIMENTO NA REAPLICAÇÃO  
DE CALCÁRIO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

ALAERTO LUIZ MARCOLAN  
Engenheiro Agrônomo - UFSM

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

Porto Alegre (RS), Brasil  
Março de 2002



Dedicado aos meus pais, Luiz e Lourdes,  
e aos meus irmãos, Geisebel e Aluisio,  
pelo apoio, carinho e compreensão...

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter tornado tudo possível.

Ao professor Ibanor Anghinoni, pela orientação, pela amizade e pelo incentivo durante todo o curso.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e ao Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), pela oportunidade.

Ao professor Carlos Alberto Ceretta, do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, pela amizade e orientação durante a graduação e pelo estímulo inicial em realizar o curso.

Aos professores e funcionários do Departamento de Solos-UFRGS que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

Ao projeto CNPq-PRONEX-SOLOS, pelos recursos financeiros e aos seus funcionários, Eng<sup>o</sup> Agr<sup>o</sup> Arcangelo Mondardo e Tec. Agr<sup>a</sup> Agostinho de Oliveira, pela amizade e pelo auxílio na condução do experimento.

Aos colegas de turma, Carla, Juliana, Leandro, Maria Helena e Pedrinho, pelo convívio, amizade e colaboração nos momentos necessários.

Aos Eng<sup>o</sup> Agr<sup>o</sup> Antônio Nolla e Antônio S. Amaral e aos bolsistas Cristiano, Fabrício e Raquel pelo auxílio na condução do experimento.

Aos amigos do futebol, pelos momentos de descontração, pela amizade e pela contribuição e incentivo na realização deste trabalho.

Ao amigo Jeferson Diekow, pelo auxílio prestado durante o curso.

À minha família, pelo exemplo de garra, honestidade e responsabilidade e pela compreensão e estímulo durante toda a trajetória de meus estudos.

Ao Liduino Largo (*in memorian*), meu tio, e ao Argentino Marcolan (*in memorian*), meu avô, pela amizade, bondade e simplicidade. Exemplos de personalidades a serem seguidas.

À todos aqueles que contribuíram para que este sonho se tornasse realidade.

# ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS DE UM ARGISSOLO E RENDIMENTO DE CULTURAS EM FUNÇÃO DO SEU REVOLVIMENTO NA REAPLICAÇÃO DE CALCÁRIO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO<sup>1/</sup>

Autor: Alaerto Luiz Marcolan

Orientador: Prof. Ibanor Anghinoni

## RESUMO

As alterações da qualidade estrutural do solo pelo uso continuado do sistema plantio direto ocorre junto com o processo de sua (re)acidificação. Em algumas circunstâncias, ocorre também compactação superficial devido ao tráfego de máquinas, que necessita ser corrigida pela mobilização do solo. Assim, avaliou-se os efeitos acumulados e a curto prazo de mobilizar ou não o solo por ocasião das reaplicações de calcário sobre os atributos físicos e químicos no perfil do solo e o rendimento de culturas em diferentes preparos de solo. Foi utilizado um experimento de 12 anos no sistema plantio direto (SPD) e preparo convencional (PC) instalado em Argissolo Vermelho Distrófico típico na EEA-UFRGS. Determinou-se os atributos físicos (densidade, porosidade e estabilidade de agregados) e químicos (pH em água, índice SMP, teor de matéria orgânica, cálcio, magnésio e alumínio trocáveis e CTC efetiva) em três camadas (0,0-2,5; 2,5-7,5 e 7,5-15,0 cm) do solo e a produtividade das culturas de milho e aveia + ervilhaca. O SPD por quatro anos após o revolvimento recuperou os atributos físicos do solo à condição original. O revolvimento propiciou condições mais favoráveis de densidade e porosidade do solo, mas diminuiu a estabilidade de agregados, que não retornou à condição original após doze meses. Os atributos físicos do solo foram mais uniformes no PC, mas com menor estabilidade de agregados na camada superficial. O PC propiciou a situação menos desejável para os atributos químicos do solo. O efeito da aplicação superficial de calcário no SPD consolidado (oito e doze anos) atingiu a profundidade de 15 cm em doze meses, nos atributos químicos. As diferenças nos atributos físicos e químicos do solo decorrentes dos sistemas de manejo não foram suficientes para afetar a produtividade das culturas.

---

<sup>1/</sup> Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, (76p.) - Março, 2002.

# PHYSICAL AND CHEMICAL ATTRIBUTES OF AN ULTISOL AND CROP YIELD AS AFFECTED BY SOIL TILLAGE AT LIME APPLICATION TIME IN NO-TILLAGE SYSTEM<sup>1/</sup>

Author: Alaerto Luiz Marcolan  
Adviser: Prof. Ibanor Anghinoni

## SUMMARY

The modifications of the structural soil quality by no-tilling the soil occurs simultaneously with the soil (re)acidification process. In some situations, surface compaction also occurs due to the machinery traffic, that need to be corrected by tilling the soil. In this way, long and short term effects of tilling or not tilling the soil at the lime application time on physical and chemical attributes in the soil profile and crop yield in different soil tillage systems were evaluated. A long-term experiment, installed in a Rhodic Paleudult soil at the Agronomical Experimental Station-UFRGS, in Eldorado do Sul, with 12 years under conventional and 4, 8 and 12 years under no-tillage systems, was used. The soil physical (bulk density, porosity and aggregates stability) and chemical attributes (water pH, SMP index, organic matter content, exchangeable calcium, magnesium and aluminum and effective CEC) were evaluated in three (0-2.5; 2.5-7.5 and 7.5-15.0 cm) soil layers, as well as the corn and oat + vetch yields. The use of the soil by four years in the no-tillage systems resulted in returning the physical attributes to the original condition. By tilling the soil, bulk density and porosity were improved, but the aggregates stability decreased and did not return to the original condition after 12 months. The soil physical attributes were more uniform in the conventional tillage, but with lower aggregates stability in the surface layer. The conventional tillage resulted in less favorable condition for the soil chemical attributes. The effects of the surface lime application in the long-term no-tillage systems (8 and 12 years) reached 15 cm depth after 12 months, in the chemical attributes. The observed differences in the soil physical and chemical attributes were not large enough to affect crop yields.

---

<sup>1/</sup> Master of Science Dissertation in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, (76p.) - March, 2002.

## SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1. O sistema plantio direto e a melhoria da qualidade estrutural do solo .....	3
2.2. O sistema plantio direto e a compactação do solo .....	9
2.3. Calagem no sistema plantio direto .....	11
2.4. Revolvimento do solo no sistema plantio direto e seus efeitos sobre os atributos físicos e químicos do solo e o rendimento de culturas .....	13
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	18
3.1. Histórico, localização e caracterização da área experimental .....	18
3.2. Etapa experimental referente ao presente trabalho .....	21
3.2.1. Tratamentos .....	22
3.2.2. Implantação e manejo da cultura do milho .....	23
3.2.3. Implantação e manejo do consórcio aveia + ervilhaca .....	23
3.2.4. Amostragens e determinações .....	23
3.2.4.1. Caracterização física do solo .....	24
3.2.4.2. Caracterização química do solo .....	25
3.2.5. Rendimento de grãos e de matéria seca.....	26
3.2.5.1. Milho .....	26
3.2.5.2. Aveia preta + ervilhaca comum .....	26
3.2.6. Análise estatística .....	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	28
4.1. Atributos físicos do solo em função do seu manejo na reaplicação do calcário .....	28
4.1.1. Quatro anos após a segunda reaplicação de calcário .....	28
4.1.2. Após a terceira reaplicação de calcário .....	36
4.2. Atributos químicos do solo em função do seu manejo na reaplicação do calcário .....	45
4.2.1. Quatro anos após a segunda reaplicação de calcário .....	45
4.2.2. Após a terceira reaplicação de calcário .....	51
4.3. Rendimento de culturas pelo manejo do solo em reaplicações sucessivas de calcário .....	59
5. CONCLUSÕES .....	62
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63
7. APÊNDICES .....	72
8. RESUMO BIOGRÁFICO .....	76

## RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
1. Rendimento de milho e de uma mistura forrageira quatro anos após a segunda reaplicação de calcário em diferentes sistemas de manejo. EEA/UFRGS – safra 1999/2000.....	60
2. Rendimento de milho e de uma mistura forrageira após a terceira reaplicação de calcário em diferentes sistemas de manejo. EEA/UFRGS – safra 2000/2001.....	60

## RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
1. Disposição dos tratamentos na área experimental, após a primeira reaplicação de calcário (outubro de 1992).....	20
2. Densidade do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário..	29
3. Porosidade total do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário..	30
4. Macroporosidade do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário..	31
5. Microporosidade do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário..	32
6. Índice de estabilidade de agregados em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.....	33
7. Carbono orgânico total do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário..	34
8. Densidade do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo.....	37
9. Porosidade total do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo.....	38
10. Macroporosidade do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo.....	39
11. Microporosidade do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo.....	40
12. Índice de estabilidade de agregados em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo.....	42
13. Carbono orgânico total do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo.....	43
14. pH em H <sub>2</sub> O em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.....	47
15. Alumínio trocável do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário..	47

16. Necessidade de calcário (para elevar o pH em H <sub>2</sub> O a 6,0) em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.....	48
17. CTC efetiva do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário..	48
18. Cálcio trocável do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário..	49
19. Magnésio trocável do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário..	49
20. pH em H <sub>2</sub> O em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo.....	52
21. Alumínio trocável do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo.....	53
22. Necessidade de calcário (para elevar o pH H <sub>2</sub> O a 6,0) em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo.....	54
23. CTC efetiva do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo.....	55
24. Cálcio trocável do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo.....	56
25. Magnésio trocável do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo.....	57

## 1. INTRODUÇÃO

A adoção do sistema plantio direto vem apresentando rápida expansão no Rio Grande do Sul e no país. É benéfico ao ambiente e à economia do produtor e proporciona alterações positivas nas características do solo. O não revolvimento do solo possibilita a manutenção da estrutura de poros formada ao longo do tempo, devido aos canalículos de raízes de culturas anteriores, galerias de organismos do solo e planos de fraqueza no solo, melhorando o ambiente radicular. É senso comum que esses benefícios são interrompidos pela mobilização do solo para a incorporação do calcário.

A aplicação superficial de calcário, sem mobilizar o solo, está sendo eficiente na correção da acidez no perfil do solo em lavouras com plantio direto consolidado. As informações obtidas até o momento mostram que esses efeitos ocorrem rapidamente em subsuperfície e produzem efeitos positivos no crescimento vegetal e no rendimento de grãos. Diante dessa realidade, os técnicos e produtores não admitem mais mobilizar o solo, aplicando o calcário na superfície para efetuar a correção da acidez.

Por outro lado, o uso continuado do sistema plantio direto pode levar à consolidação natural do solo, advinda da ausência de preparo, ou à compactação superficial do solo, devido a pressão exercida pelo tráfego de máquinas durante as operações necessárias ao cultivo. Quando isso influenciar negativamente no rendimento das culturas, o revolvimento do solo seria importante para a redução de sua densidade, aumento da macroporosidade e incorporação do material orgânico, o que disponibilizaria nutrientes para as culturas e proporcionaria um ambiente mais propício ao desenvolvimento radicular.

A busca de informações mais precisas a respeito das conseqüências da mobilização do solo no sistema plantio direto tornou-se importante neste momento. A dúvida estaria em manter o calcário na superfície dando

continuidade ao sistema e preservando aqueles atributos físicos positivos do solo obtidos ao longo do tempo de cultivo, ou incorporá-lo na camada arável, o que resolveria o problema de compactação superficial e aumentaria o espaço poroso. O que se questiona, então, é se, realmente, a mobilização do solo a cada reaplicação de calcário (4-6 anos), não poderia ser utilizada sem prejuízo à qualidade do solo.

Sendo assim, utilizou-se um experimento conduzido há doze anos sob diferentes preparos do solo, onde avaliou-se os efeitos acumulados e a curto prazo de mobilizar ou não o solo por ocasião das reaplicações de calcário sobre os atributos físicos e químicos no perfil do solo e o rendimento das culturas de milho e aveia + ervilhaca.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O sistema plantio direto caracteriza-se pelo não revolvimento do solo e pela manutenção dos resíduos culturais sobre a superfície. Com a adoção desse sistema, em substituição ao convencional, ocorrem mudanças nas características físicas, químicas e biológicas do solo, que são dinâmicas no tempo. A discussão sobre o revolvimento ou não do solo, por ocasião da reaplicação de corretivos para a neutralização da acidez ou para descompactar a camada superficial do solo, desenvolvida após o manejo contínuo do solo por longo tempo nesse sistema, necessita de um maior aprofundamento.

Nesta revisão, são abordados os atributos do solo, principalmente os atributos físicos em função da mobilização ou não do solo, com ênfase no sistema plantio direto, e seu efeito no rendimento de culturas.

### **2.1. O sistema plantio direto e a melhoria da qualidade estrutural do solo**

No sistema plantio direto, a movimentação do solo somente na linha de semeadura, proporciona um ambiente diferente em relação ao preparo convencional. O não revolvimento do solo e o aumento de carbono orgânico total criam um ambiente propício para o aparecimento de minhocas, larvas e outros animais do solo. Além disso, a adição contínua de resíduos orgânicos das culturas favorece o aumento da atividade microbiana. Tudo isso atua positivamente na melhoria da qualidade do solo.

A ação dos microrganismos, decompondo os resíduos vegetais na superfície, resulta na produção de ligantes orgânicos e no aumento da população de fungos (Prasad & Power, 1991). Estes, através de suas hifas, contribuem para o aumento da estabilidade estrutural (Roth et al., 1991),

principalmente na camada superficial, por estar em contato com os resíduos vegetais.

A estabilidade estrutural do solo depende da estabilidade dos agregados, e essa, conforme Wilson et al. (1947), está sujeita a variações temporais, sendo dependente da atividade biológica dos microrganismos do solo que, a curto prazo, provoca uma melhoria na estabilidade dos agregados (Molope et al., 1987). Em curto espaço de tempo, a estabilidade dos agregados de um solo está mais relacionada a mudanças nos constituintes orgânicos do que a mudanças no conteúdo total de matéria orgânica e, sendo assim, muda sob influência de diferentes tratamentos de cultivo (Haynes & Swift, 1990). Em longo período, a estabilidade do agregado relaciona-se com o conteúdo total de matéria orgânica.

O material orgânico serve como fonte de energia aos microrganismos, que sintetizam moléculas orgânicas que atuam na formação de agregados estáveis. A estabilização dos agregados ocorre devido à síntese microbiana das substâncias cimentantes e não somente à presença física de bactérias e de fungos no solo. Assim, os produtos do metabolismo microbiano são a causa principal da estabilização dos agregados, além do efeito mecânico do micélio dos fungos no início da decomposição da matéria orgânica. Esses processos contribuem para a formação e estabilização dos agregados do solo.

A manutenção de um bom estado de agregação e de estabilidade dos agregados e, conseqüentemente, uma boa estrutura, é condição primordial para garantir alta produtividade agrícola (Silva & Mielniczuk, 1997a, b). Solos desestruturados e adensados dificultam o desenvolvimento radicular e a difusão do oxigênio, devido ao menor espaço poroso.

A estrutura de um solo é o arranjo das partículas que o compõem, decorrente de processos pedogenéticos e/ou de ações antrópicas relativas ao manejo (Denardin et al., 2001). A mesma é considerada como um dos atributos mais importantes do ponto de vista agrícola, pois está relacionada com o suprimento de água e ar às raízes das plantas, com a disponibilidade de nutrientes, com a resistência mecânica do solo à penetração e com o próprio crescimento do sistema radicular (Tisdall & Oades, 1979; Reid & Goss, 1981). A estrutura do solo pode ser quantificada indiretamente através de

determinados atributos do solo, chamados de índices de estrutura, como por exemplo, a estabilidade dos agregados.

Há dois tipos de estabilidade: um diz respeito à capacidade do solo conservar sua estrutura sob ação da água e o outro está ligado à capacidade do solo conservar essa estrutura quando submetido a pressões mecânicas (Dexter, 1988). Para este pesquisador, a estabilidade do agregado é definida como a capacidade de uma estrutura persistir, sendo fortemente influenciada pela aproximação das partículas do solo e por sua cimentação, que pode ser produzida por partículas pequenas, pelos materiais coloidais, que no solo são representados pelas próprias partículas de argila, pelos colóides inorgânicos (óxidos de ferro e alumínio) e pelos colóides orgânicos.

A estabilidade estrutural está, também, associada ao tamanho dos agregados (Tisdall & Oades, 1982). Quanto menor o agregado, maior é a sua estabilidade. Essa maior estabilidade dos agregados pequenos associa-se, também, aos vários tipos de agentes ligantes, cujos efeitos são aditivos. Neste sentido, vários constituintes, orgânicos e inorgânicos, do solo participam na ligação das partículas para a formação de agregados estáveis em água. Por outro lado, a formação de humatos de cálcio, pela ligação do cálcio com o material orgânico, resulta em maior estabilidade nos agregados com diâmetro superior a 2 mm (Muneeer & Oades, 1989), indicando uma interação dos produtos de decomposição da matéria orgânica com o cálcio.

A estabilidade dos agregados é influenciada pelo método de preparo do solo, uma vez que, ao longo do tempo, influencia a dinâmica da matéria orgânica no solo. Segundo Allison (1968), os fatores que promovem a agregação são distintos daqueles que afetam a sua estabilidade. As práticas agrícolas agem diretamente em ambos, na formação e na estabilização dos agregados, principalmente pelo seu efeito sobre a matéria orgânica. A qualidade dos agregados associa-se basicamente ao tipo de utilização que é dada ao solo, pois a distribuição do tamanho dos agregados e sua estabilidade são fundamentais para a determinação da quantidade e distribuição do espaço poroso do solo. Neste, os poros de transmissão entre agregados são importantes e apresentam grande susceptibilidade a modificações pelo método de preparo do solo.

Conforme Silva (1993), a relação entre agregados e espaço poroso em função das diferenças morfológicas dos agregados e, conseqüentemente, das unidades estruturais apresentadas pelo solo submetido a usos extremos, é que define a qualidade dos agregados do solo. A manutenção de uma boa porosidade, com boa relação entre macro e microporos, é importante para uma exploração agrícola eficiente.

A estabilidade diferenciada dos agregados de diferentes tratamentos frente a ação de forças disruptivas e da água, é outro aspecto relevante na avaliação da qualidade estrutural do solo. Esta propriedade condiciona aos agregados maior resistência à desagregação pela ação da água, como, também, oferece ao solo maior resistência à deformação por meio de pressão mecânica, características fundamentais para a manutenção das boas propriedades físicas do solo, quando submetido ao uso agrícola (Silva, 1993).

A resistência dos agregados à dispersão através de forças físicas, relaciona-se com a coesão total existente entre as partículas que compõe os agregados que, estando secos, têm manifestação máxima e refere-se à estabilidade em seco (Skidmore & Powers, 1982). Na determinação por via úmida, as forças de coesão e de adesão estão no seu grau mínimo, permanecendo estáveis somente aqueles agrupamentos de partículas ligadas entre si por compostos organo-metálicos, argilas e óxidos (Muneer & Oades, 1989).

Através do índice de estabilidade dos agregados, obtido pela razão  $DMPu/DMPs$  (diâmetro médio ponderado obtido pela agitação úmida dividido pelo diâmetro médio ponderado obtido pela agitação a seco), é possível diferenciar os agregados que passaram pelo processo de estabilização daqueles que se formaram pelo efeito da compactação, sem ocorrência do processo de estabilização. Em solos que sofrem a compactação, o índice de estabilidade dos agregados ( $DMPu/DMPs$ ) diminui, sendo as reduções menores naqueles manejos que promovem a estabilidade dos agregados (Mendez, 1996).

O índice  $DMPu/DMPs$  reflete o grau de estabilidade, onde os valores que se aproximam da unidade representam alta resistência à desagregação e aqueles com valores mais próximos a zero representam agregados altamente susceptíveis à destruição em presença de água. Para Silva (1993), o índice

expressa a tendência do comportamento da agregação do solo, pelo fato de englobar todas as variáveis que têm ou exercem influência na formação e estabilização dos agregados, servindo, inclusive, como parâmetro de avaliação se um solo apresenta estrutura estável quando submetido a diferentes tipos de utilização. De certa forma, esse índice pode representar a estabilidade estrutural de um solo frente a ação da chuva, pois um solo bem estruturado após o preparo quando seco, com índice baixo, pode tornar-se compacto e maciço após uma chuva.

Além do carbono orgânico, cátions atuam como fatores importantes da estabilidade dos agregados frente à compactação. À medida que aumenta o teor de carbono orgânico junto com o de cátions trocáveis, aumenta a resistência dos agregados à ruptura, evidenciado pelo maior diâmetro médio ponderado após a compactação. Esta resistência é influenciada pelo tipo de solo e manejo utilizado (Mendez, 1996).

As substâncias orgânicas e os cátions polivalentes trocáveis são essenciais na formação e estabilização dos agregados, pois se ligam a mais de uma partícula simultaneamente (Albuquerque, 1998). O aumento na capacidade de troca de cátions está relacionada, em geral, a uma maior estabilidade dos agregados e menor erosão hídrica (Veiga et al., 1993).

Os mecanismos envolvidos na formação e estabilização dos agregados são representados por floculação, dispersão e cimentação (químicos); adesão e desagregação (físicos); e crescimento das raízes e atuação dos microrganismos (biológicos) (Silva, 1993).

A estabilidade dos agregados é dependente da floculação das partículas de argila. A atividade das argilas é dependente, entre outras coisas, dos cátions adsorvidos sobre sua superfície e, também, de sua concentração eletrolítica na solução do solo. Os íons de cálcio adsorvidos se ligam às partículas de argila, de matéria orgânica e de óxidos para dar início à formação dos agregados (Dexter, 1991).

À semelhança da matéria orgânica, a carga dos óxidos é dependente do pH. Os óxidos promovem a estabilidade dos agregados independentemente do seu tamanho. Em pH baixo, onde os óxidos são dotados de suficiente carga positiva, eles precipitam sobre as superfícies das argilas na forma de gel hidratado e, por desidratação, formam um bom cimento

para unir as partículas floculadas (Goldberg, 1989). Essas coberturas formadas são estáveis mesmo em pH alto. Os óxidos de ferro e manganês são os agentes cimentantes mais importantes envolvidos na estabilização dos agregados em solos latossólicos (Harris et al., 1966).

A calagem propicia a substituição do  $Al^{+++}$ , que tem ação estabilizante na estrutura do solo, pelos cátions  $Ca^{++}$  e  $Mg^{++}$ , que, na faixa de pH abaixo de 7,0, têm ação dispersante, culminando com a dispersão do solo em microagregados e/ou em partículas unitárias (Denardin et al., 2001). Para estes autores, os efeitos diretos dos carbonatos de cálcio e de magnésio na dispersão do solo são resultantes do aumento de cargas elétricas negativas e da conseqüente redução da atração entre as partículas coloidais, especialmente dos óxidos de ferro e de alumínio.

Os sesquióxidos de ferro e de alumínio são elementos que propiciam ao solo elevada estabilidade estrutural, principalmente dos microagregados. Para os macroagregados, o principal papel é desempenhado pela matéria orgânica.

Outra relação que pode ser feita é entre o pH e o ponto de carga zero (PCZ). Assim, quanto maior a diferença entre eles, maior será a repulsão entre as partículas e, conseqüentemente, maior a dispersão do solo. Neste sentido, Albuquerque (1998) comprovou que, em geral, nos solos avaliados, com o aumento do pH, maior foi o afastamento do pH em relação ao PCZ, favorecendo a repulsão entre partículas. Porém, com o aumento do pH para valores próximos a 6,0 o crescimento de plantas e a atividade microbiana são favorecidos, com maior adição de resíduos orgânicos oriundos dos exsudatos radiculares e da decomposição microbiana, favorecendo a atração de partículas e a estabilização dos agregados. Portanto, o valor isolado de pH pode conduzir a interpretações contraditórias.

As diferenças encontradas em certos atributos físicos e químicos isoladamente, comparando diferentes métodos de preparo ou solos, não evidenciam, por si só, diferenças no rendimento de uma dada cultura. No entanto, a associação dos atributos pode resultar em diferentes condições estruturais, assim como, diferentes rendimentos.

A melhoria da estrutura do solo no sistema plantio direto foi verificada por Carpenedo & Mielniczuk (1990). O cultivo sem revolvimento do

solo permite a manutenção da continuidade de poros e canais deixados por raízes mortas no perfil do solo. Esses poros ou canais têm uma distribuição mais uniforme em profundidade no sistema plantio direto (Fernandes et al., 1983). Disso, resulta uma maior taxa de infiltração de água, que pode propiciar a movimentação de partículas finas do corretivo da acidez do solo para camadas mais profundas.

Em relação ao preparo convencional, o sistema plantio direto melhora os atributos físicos do solo, propicia economia, pelo menor número de operações com máquinas agrícolas, e diminui a perda de solo das lavouras. Do ponto de vista da conservação do solo e da sustentabilidade agrícola, é superior ao preparo convencional que, na maioria das vezes, apresenta solos com estrutura degradada e pulverizados pelas intensas mobilizações com gradagens e arações.

## **2.2. O sistema plantio direto e a compactação do solo**

Apesar das mudanças positivas sobre a estrutura do solo propiciadas pelo sistema plantio direto, o cultivo continuado pode trazer problemas, uma vez que, embora o trânsito de máquinas tenha sido reduzido em comparação ao preparo convencional, o solo não é revolvido. Assim, com o passar do tempo podem surgir problemas de compactação do solo.

O termo compactação do solo refere-se à compressão do solo não saturado durante a qual existe um aumento da densidade do solo em consequência da redução do seu volume (Gupta & Allmaras, 1987). Os solos apresentam diferentes características e propriedades, mostrando comportamentos distintos, quando submetidos à compactação (Silva et al., 1986). A compactação excessiva pode limitar a adsorção e/ou absorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento do sistema radicular (Bicki & Siemens, 1991).

O trânsito de máquinas e implementos é um dos responsáveis pelas modificações nos macroagregados do solo, com redução da porosidade total e aumento na proporção de poros pequenos em relação aos maiores (Sidiras et al., 1984). Essa mudança na distribuição do tamanho de poros pode comprometer a aeração do solo. O processo de aeração é um dos mais importantes na determinação da produtividade do solo (Hillel, 1980), porque a

respiração das raízes e dos microrganismos depende da troca de gases entre o ar do solo e da atmosfera. Esta troca deve acontecer em nível que evite a deficiência de oxigênio e o excesso de CO<sub>2</sub> no solo.

O aumento da densidade do solo no sistema plantio direto ocorre, também, pela consolidação natural do solo. A densidade do solo é uma propriedade relativamente instável: varia de solo para solo e dentro de um mesmo solo, dependendo, principalmente, do grau de compactação, do teor de matéria orgânica, da presença ou ausência de cobertura vegetal, do sistema de cultivo empregado e da profundidade (Kiehl, 1979; Brady, 1989). Sendo assim, pode-se dizer que o mesmo acontece com o espaço poroso, uma vez que este apresenta relação inversa à densidade, ou seja, quando a densidade do solo aumenta o espaço poroso diminui.

Em seus estudos, Bertol et al. (2000) encontraram que a densidade do solo foi 12% maior no sistema plantio direto do que no preparo convencional, na média das profundidades entre 0-15 cm. Na semeadura direta, a densidade média, foi 28% maior nas camadas 0-2,5 e 2,5-5,0 cm, superando o aumento da densidade e diminuição da macroporosidade nas camadas 5,0-10,0 e 10,0-15,0 cm no preparo convencional.

Há indicações de que os limites críticos de densidade do solo ao crescimento radicular são variáveis com os tipos de solo e plantas. Segundo Vomocil & Flocker (1961) e Grable & Siemer (1968), quando a macroporosidade de um solo for inferior a 0,10 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, poderá haver restrição ao crescimento radicular e, conseqüentemente, ao desenvolvimento das plantas.

Uma das preocupações relacionadas com a compactação é o efeito sobre o crescimento radicular, sendo a relação entre esses parâmetros estudada com o intuito de determinar valores que restrinjam o crescimento das raízes (Alvarenga et al., 1996). A resistência à penetração aumenta com a compactação e é restritiva ao crescimento radicular acima de certos valores que variam de 1,5 MPa (Grant & Lanfond, 1993), 2,0 MPa (Taylor et al., 1966) e de 2,0 a 4,0 MPa (Arshad et al., 1996).

As condições físicas do solo e o crescimento das plantas apresentam estreita interação, uma vez que as raízes parecem dispor de

mecanismos de detecção dessas condições, enviando sinais à parte aérea que controlam o crescimento e a expansão foliar (Passioura & Gardner, 1990).

### **2.3. Calagem no sistema plantio direto**

Os solos brasileiros são naturalmente ácidos, sendo necessária a correção dessa acidez para sua utilização na agricultura, que é efetuada quase que exclusivamente através da adição de calcário. Como esse material apresenta baixa solubilidade em água, para reagir, deve ser misturado com o solo. O consenso que prevalecia até recentemente no meio técnico e científico, era de que a aplicação de calcário na superfície do solo resultava em uma ação lenta e restrita à região de contato do corretivo com o solo. Assim, o pH e os teores de Ca e Mg trocáveis somente seriam aumentados em uma pequena camada na superfície do solo. Entretanto, no sistema plantio direto, verifica-se um aumento dos níveis desses atributos até camadas mais profundas do solo, acompanhado de uma diminuição do teor de Al trocável (Moschler et al., 1973; Blevins et al., 1978; Chaves et al., 1984; Sidiras & Pavan, 1985; Oliveira & Pavan, 1994; 1996; Amaral, 1998; Pöttker & Ben, 1998a; b; Caires et al., 1998; 1999; 2000; Petrere & Anghinoni, 2001). Esses resultados mostram a possibilidade de que a ação do calcário aplicado na superfície no sistema plantio direto possa atingir, também, camadas mais profundas de solo. Com isso, a mobilização do solo, para a incorporação do calcário, não seria necessária. No entanto, também há resultados que evidenciam pouco ou nenhum movimento do calcário no perfil do solo (Gonzales-Érico et al., 1979; Ritchey et al., 1982; Pavan et al., 1984).

Conforme visto, a questão da correção da acidez no sistema plantio direto tem sido objeto de estudo de vários pesquisadores. Os resultados, no Sul do Brasil, referentes ao efeito da movimentação do calcário no perfil do solo na sua maioria evidenciam consideráveis aumentos em camadas subsuperficiais com a aplicação superficial de calcário. Assim, constata-se que, em períodos relativamente pequenos, de até 4 anos, o efeito no pH, no Ca, no Mg e no Al trocáveis e na saturação por bases e de alumínio, ocorreu predominantemente até a profundidade de 10 cm (Santos, 1997; Cassol, 1995; Sá, 1996; Pöttker & Ben, 1998a; b; Petrere & Anghinoni, 2001). Para solo arenoso, a profundidade foi maior para a saturação por bases (20 cm) e

magnésio trocável (30 cm), após dois anos de aplicação superficial de  $4,1 \text{ t ha}^{-1}$  (Sá, 1996). No Sul do Brasil, as condições de clima, solo e sistemas de cultura parecem favorecer a ação corretiva, no perfil do solo, do calcário aplicado na superfície.

Diversos mecanismos têm sido propostos para explicar o efeito em profundidade no perfil do solo da calagem superficial no sistema plantio direto. A formação de  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  e  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$  e sua migração para camadas mais profundas (Oliveira et al., 1996) e pela diminuição da acidez na camada subsuperficial por resíduos orgânicos (Sidiras & Pavan, 1985). Também é possível a movimentação física do calcário em profundidade por canais formados por raízes mortas, que permanecem pela ausência de preparo do solo (Oliveira & Pavan, 1994). Entretanto, Miyazawa et al. (1996) relatam que o mais provável mecanismo de lixiviação do cálcio está relacionado com a formação de complexos orgânicos hidrossolúveis presentes nos resíduos vegetais. Na camada superficial do solo, os ligantes orgânicos complexam o cálcio trocável do solo, formando complexos  $\text{Ca L}^\circ$  ou  $\text{Ca L}^-$ . A alteração da carga do complexo facilita a mobilidade do cálcio no solo. Na camada subsuperficial, o cálcio dos complexos Ca-orgânicos é deslocado pelo alumínio trocável do solo, uma vez que os íons  $\text{Al}^{3+}$  formam complexos mais estáveis do que o  $\text{Ca}^{2+}$ , diminuindo a acidez trocável e aumentando o cálcio trocável. Reações semelhantes também ocorrem para magnésio.

A correção da acidez do solo tem grande importância para o rendimento de grãos e, conseqüentemente, para o sucesso do sistema plantio direto. Os resultados de estudos no Sul do Brasil (Cassol, 1995; Mielniczuk et al., 1995; Ruedell, 1995; Oliveira & Pavan, 1996; Pöttker & Ben, 1998a; Sá, 1997; Santos, 1997; Amaral, 1998; Caires et al., 2000; Petreire & Anghinoni, 2001) mostram que a não incorporação ao solo, nas doses de calcário indicadas para a correção da acidez (pH 6,0) da camada arável, tem favorecido o crescimento vegetal e o rendimento de grãos das diversas culturas utilizadas em diversos anos de condução das pesquisas.

A consolidação da prática de aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto pressupõe o conhecimento da dinâmica da correção da acidez no perfil do solo e da melhoria na qualidade estrutural advinda da não mobilização do solo nesse sistema. Conforme visto, a aplicação superficial de

calcário no sistema plantio direto tem sido eficiente na correção da acidez em profundidade no perfil do solo, bem como na produtividade das culturas. Assim, do ponto de vista da resposta da calagem superficial não há necessidade de revolver o solo para incorporar o calcário.

#### **2.4. Revolvimento do solo no sistema plantio direto e seus efeitos sobre os atributos físicos e químicos do solo e o rendimento de culturas**

Apesar de todos os benefícios do sistema plantio direto, há situações em que o solo cultivado nesse sistema apresenta problemas de compactação e/ou pH muito elevado (>7,0) na superfície, como é o caso de alguns solos do Planalto do Rio Grande do Sul. Nessas situações, deve-se observar se esses problemas estão causando efeito negativo na produtividade das culturas.

A mobilização do solo, após longos períodos de cultivo no sistema plantio direto, pode ser responsável por perdas nas características favoráveis ao cultivo agrícola, destacando-se o teor de matéria orgânica, a estabilidade de agregados, a continuidade de poros e a presença de canais de elevada atividade biológica.

A diminuição do espaço poroso e o aumento da resistência do solo à penetração de raízes com o passar do tempo de cultivo no sistema plantio direto, somado à necessidade de correção da acidez de uma camada de solo ou à existência de camada superficial com pH muito elevado, trazem de volta a discussão sobre a oportunidade ou não de mobilizar o solo. A par das restrições apresentadas, uma eventual mobilização do solo pode melhorar o espaço poroso ao mesmo tempo em que mistura o calcário na camada arável do solo (0-20 cm).

Assim, diante dessa situação, pode-se questionar se as limitações provocadas pelo tráfego em sistemas sem preparo, ao compactar o solo, interferem na produtividade das culturas. Caso haja essa interferência, a maneira prática e rápida de diminuir a compactação e aumentar o espaço poroso, principalmente a macroporosidade, é mobilizar o solo. A mobilização do solo poderia ser, também, benéfica no sentido de melhorar a distribuição e a reciclagem de nutrientes. Com um melhor espaço poroso haveria, também,

uma melhor distribuição de ar e água no perfil do solo, propiciando um melhor ambiente para o desenvolvimento radicular das plantas.

O revolvimento do solo desencadeia reações integradas no complexo sistema físico-químico-biológico do solo, atuando diretamente sobre a estrutura do solo. A estrutura do solo determina a capacidade de armazenamento e de disponibilidade de água, a capacidade de armazenamento e de difusão de calor e a permeabilidade ao ar, à água e às raízes (Denardin et al., 2001).

A dúvida que fica é quanto ao efeito da mobilização, se positivo ou negativo, na estrutura do solo e qual a intensidade desses efeitos. Embora os estudos relacionados ao revolvimento do solo no sistema plantio direto sejam escassos, a idéia é que os efeitos não seriam tão intensos como os verificados pelas freqüentes mobilizações do solo cultivado no preparo convencional.

Considerando um solo que tenha boa estrutura e seja mobilizado uma única vez, para a incorporação do calcário ou para sua descompactação após longo tempo de cultivo no sistema plantio direto e voltando a ser cultivado nesse mesmo sistema, pode-se supor que a recuperação da estrutura, para atingir um estágio similar ao anterior ao revolvimento, se dará em um pequeno período de tempo, uma vez que, provavelmente, após o revolvimento, a estrutura ainda estaria em um estágio superior à de um solo cultivado continuamente no preparo convencional.

A maioria dos resultados comparam solos cultivados no sistema plantio direto e solos cultivados em preparo convencional. Faltam informações sobre o efeito de um eventual revolvimento na estrutura de solos cultivados continuamente no sistema plantio direto. Entretanto, sabe-se que os sistemas de manejo apresentam diferentes efeitos na formação e estabilização dos agregados e, dependendo do tipo de cultura e preparo do solo, os efeitos serão maiores ou menores em termos de desestruturação ou degradação. Para Martin et al. (1955), as substâncias ligantes do solo, produzidas por atividade microbiana, são rapidamente destruídas pela própria ação microbiana. Sendo assim, deve-se manter suprimento contínuo de resíduos orgânicos para conservar a estabilidade dos agregados em alto nível e, conseqüentemente, uma boa estrutura de solo.

São poucos os estudos comparando os efeitos da aplicação superficial e da incorporação de calcário em um mesmo tipo de preparo. Assim, em um desses estudos em experimento cultivado há 4 anos no sistema plantio direto e preparo convencional (Cassol, 1995), o calcário foi incorporado na metade de cada parcela e na outra metade mantido na superfície. Não houve diferenças no rendimento de grãos de milho entre os tratamentos com calcário superficial e incorporado. No mesmo experimento, as mesmas comparações foram feitas por Amaral (1998), após 8 anos nos preparos convencional e plantio direto, plantio direto com 4 anos e plantio direto com mobilização do solo no quarto e oitavo anos para a incorporação do calcário. Os resultados, independentemente do manejo do calcário e do método de preparo, não apresentaram diferenças no rendimento de grãos de milho.

Em solos com camadas compactadas e com deficiências hídricas no período vegetativo, a mobilização para a incorporação do calcário pode ser benéfica, uma vez que aumenta o espaço poroso e o desenvolvimento radicular. Aumenta em importância no caso de solos fortemente ácidos, pobres em bases e com altos níveis de alumínio, onde a limitação ao crescimento radicular pode trazer sérias restrições à produtividade.

Em contrapartida aos possíveis benefícios advindos do revolvimento do solo, Fucks et al. (1994) mostram que uma aração e duas gradagens em área com quatro anos de plantio direto resultaram em perdas na qualidade estrutural do solo, evidenciados através da redução, ao redor de 2,2 vezes, no diâmetro médio geométrico de agregados. Esta redução deveu-se, principalmente, à redução da classe de agregados com tamanho entre 4,76 e 8 mm. Isso evidencia que parte dos agregados maiores e mais estáveis, formados ao longo do tempo, são reduzidos em função das operações de preparo do solo utilizadas, com conseqüente aumento da fração de agregados com tamanho menor.

As informações a respeito do tempo necessário para que o solo recupere o estado original de agregação existente antes da sua mobilização são escassas. Santin et al. (1994) verificaram que após uma mobilização do solo em área de plantio direto, são necessários três anos para que o solo recupere de 53 a 90% do diâmetro médio geométrico dos agregados. Albuquerque (1993) constatou que o sistema de manejo convencional do solo,

após três anos de plantio direto, resultou em substancial redução da estabilidade estrutural na camada superficial. No momento da semeadura, no sistema plantio direto, com horizonte A profundo, aproximadamente 27% dos agregados estáveis em água tiveram diâmetro menor que 4,76 mm, comparado a 71% no sistema de manejo convencional. Resultados semelhantes já tinham sido encontrados por Reinert (1990).

Operações de preparo do solo modificam o conteúdo de matéria orgânica causando mudanças na estabilidade estrutural. Os efeitos são menos pronunciados sobre os microagregados (<0,25 mm). Já, a estabilidade dos macroagregados (>0,25 mm), varia com o tipo de preparo do solo, devido a sua ação sobre as raízes e hifas (Gupta & Germida, 1988), consideradas agentes de ligação temporária do solo (Tisdal & Oades, 1982).

O revolvimento do solo expõe a matéria orgânica à ação dos microrganismos, provocando sua diminuição que, normalmente, é acompanhado por perdas na qualidade estrutural do solo. Para manter a estrutura do solo, a matéria orgânica deve ser, então, restituída continuamente.

Os solos submetidos ao revolvimento expõem os agregados a ações físicas de desagregação pelo impacto das gotas da chuva e, também, pelo cisalhamento provocado pelos implementos agrícolas. As diferentes formas de mobilização do solo alteram sua estrutura e seus atributos físicos, de acordo com a intensidade de mobilização (Shaffer & Johnson, 1982).

Nesta revisão, evidenciaram-se efeitos negativos e positivos das operações de preparo na qualidade estrutural do solo. Ficou clara a necessidade da busca de informações a respeito dos efeitos do revolvimento de solos cultivados no sistema plantio direto, sobre a qualidade estrutural dos mesmos.

Com relação ao efeito da calagem superficial na correção da acidez em profundidade e na produção de grãos, a grande maioria dos resultados mostram a exequibilidade de sua utilização. Mas, se for preciso mobilizar o solo, devido a sua compactação ou, por outro motivo, como um pH superficial muito elevado (>7,0), permanece, ainda, a questão dos efeitos dessa mobilização sobre os atributos físicos do solo, principalmente na sua estabilidade estrutural.

O sistema plantio direto encontra-se num estágio bastante avançado no Brasil e seu avanço criou novos questionamentos que devem ser respondidos através da busca de informações que possam contribuir para a sustentabilidade e melhoria do sistema, propiciando, assim, maior qualidade de solo e, conseqüentemente, maior produtividade pelas culturas.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Histórico, localização e caracterização da área experimental

O experimento utilizado no presente trabalho está sendo conduzido, desde maio de 1988, na Estação Experimental Agronômica da UFRGS (EEA/UFRGS), no município de Eldorado do Sul (RS), região fisiográfica da Depressão Central. A precipitação média anual é de 1440 mm e o clima da região, segundo a classificação de Koeppen, é o subtropical de verão úmido quente (Cfa). O solo, de textura franco argilo-arenosa e origem granítica, é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (EMBRAPA, 1999). O local do experimento apresenta relevo ondulado a suave ondulado.

Até 1974, a condição da área era de campo nativo. Nos anos de 1975 e 1976, a mesma foi cultivada convencionalmente. De 1977 a 1987, permaneceu em pousio, com um cultivo de aveia preta (*Avena strigosa*, S.) no ano de 1985. Em maio de 1988, tendo como base a análise de solo (0-15 cm) que apresentava valor de pH em água 5,5, matéria orgânica 30 g kg<sup>-1</sup>, P e K (Mehlich-1) respectivamente, 2,5 e 132 mg kg<sup>-1</sup> (Tedesco et al., 1985), aplicou-se calcário dolomítico na dosagem de 3,4 t ha<sup>-1</sup> (PRNT 100%) para elevar o pH a 6,0, incorporando-o através de uma aração e duas gradagens. Em julho do mesmo ano, foi implantada aveia preta, objetivando a produção de biomassa para cobertura do solo. Em setembro, após avaliação da matéria seca, a aveia foi dessecada.

Os tratamentos foram aplicados em outubro de 1988 e constaram de métodos de preparo de solo e modos de aplicação de fertilizantes fosfatado e potássico. Os métodos de preparo do solo consistiram em preparo convencional (uma aração até 17 cm de profundidade e duas gradagens); preparo em faixas (20 cm de largura, centrada na linha de semeadura do milho e 15 cm de profundidade, usando um sulcador tipo “asa de andorinha”); e sem

preparo (sulco para semeadura do milho com 5 cm de largura na linha do milho e 8-10 cm de profundidade = plantio direto). Os tratamentos de modos de aplicação de fósforo e potássio foram: lanço, faixa e linha, efetuados manualmente e após os tratamentos de preparo do solo. O experimento foi conduzido no delineamento de blocos ao acaso em parcelas subdivididas, onde os preparos de solo ocupavam as parcelas principais (12x24 m) e os modos de adubação, as subparcelas (12x8 m), com três repetições.

Após a aplicação dos tratamentos, a área experimental foi cultivada por 4 anos com milho (*Zea mays*, L.), no verão, e com aveia preta, no inverno, sendo esta usada para avaliar o efeito residual dos tratamentos e promover a cobertura do solo. Nesses cultivos, os tratamentos de preparo do solo e modos de adubação foram aplicados anualmente, antecedendo a semeadura do milho. A adubação em cada cultivo de milho foi determinada através da análise de solo das parcelas de preparo convencional e adubação a lanço e as recomendações foram obtidas do boletim de recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (Comissão, 1987). Informações mais detalhadas são encontradas em Model (1990) e Klepker (1991).

Em setembro de 1992, foi efetuada a primeira reaplicação de calcário (dolomítico) em toda a área experimental. A dose aplicada foi de 3,7 t ha<sup>-1</sup> (PRNT 100%), obtida pela análise de solo das parcelas sob preparo convencional e adubação a lanço, com o objetivo de elevar o pH a 6,0. O calcário foi aplicado em todo o experimento sobre a aveia dessecada e rolada, sendo as parcelas principais (preparo de solo) subdivididas ao longo de sua maior dimensão onde, numa metade, o calcário foi incorporado na camada arável (0-17 cm) e, na outra metade, o calcário permaneceu na superfície, independentemente do modo de adubação. Após essa data, cada bloco continuava com três parcelas principais – preparo do solo (12x24 m), com duas subparcelas – modos de incorporação de calcário (6x24 m) em faixa, em uma direção e os modos de adubação, também em faixa, em direção perpendicular. Os blocos foram separados entre si, desde a instalação do experimento, por uma faixa de 5 m, para facilitar os trabalhos de preparo de solo (Figura 1).

Dessa forma, os tratamentos de preparo do solo e de modos de adubação foram os mesmos dos cultivos anteriores. A diferença é que, após a

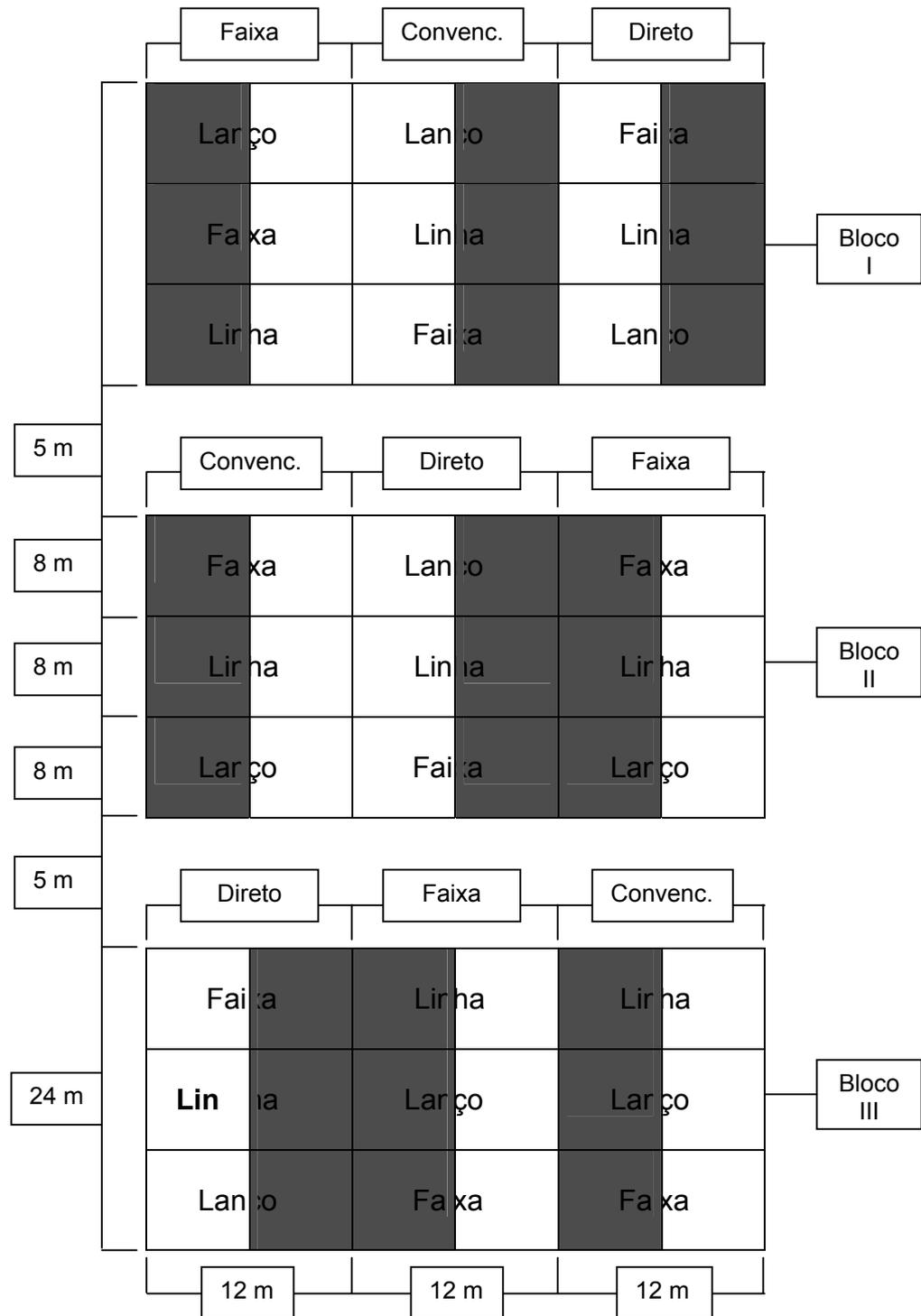


FIGURA 1. Disposição dos tratamentos na área experimental, após a primeira reaplicação de calcário (outubro de 1992). (■) com incorporação de calcário, (□) sem incorporação de calcário.

primeira reaplicação do calcário, as parcelas de preparo do solo foram divididas: (a) na parcela de plantio direto, metade continuou com o mesmo tratamento e a outra metade foi mobilizada para incorporar o calcário, voltando a ser cultivada sem preparo de solo; (b) na parcela de preparo convencional, metade teve incorporação do calcário e a outra metade permaneceu com calcário na superfície, sem revolvimento, passando a ser cultivada desta forma (sem preparo); (c) na parcela de cultivo em faixas, ocorreu o mesmo do que nas anteriores, ou seja, sem e com incorporação de calcário em cada metade, respectivamente, com posterior preparo em faixas. Os tratamentos de modos de adubação foram os mesmos dos anos anteriores. Informações mais detalhadas podem ser obtidas em Cassol (1995). O experimento foi, então conduzido, por mais quatro anos, com preparo de solo somente nas subparcelas de preparo convencional com calcário incorporado. A adubação em cada cultivo de milho também foi determinada através da análise de solo das parcelas de preparo convencional e adubação a lanço e as recomendações foram feitas conforme Comissão (1989).

Em outubro de 1996, realizou-se a segunda reaplicação de calcário, oito anos após a instalação do experimento. A dose aplicada foi de  $2,5 \text{ t ha}^{-1}$  (PRNT 100%) obtida pela análise de solo (0-15 cm) das parcelas sob preparo convencional e adubação a lanço, com o objetivo de elevar o pH a 6,0. O calcário foi novamente aplicado em todo o experimento sobre a aveia preta dessecada e manejada com o rolo faca. A seguir, efetuou-se os mesmos procedimentos adotados na primeira reaplicação de calcário (1992), incorporando o calcário em metade de cada parcela e na outra metade permanecendo em superfície. Os tratamentos de modos de adubação foram os mesmos dos anos anteriores, apenas com variações nas doses, conforme recomendações da Comissão (1995). Informações mais detalhadas são encontradas em Amaral (1998).

### **3.2. Etapa experimental referente ao presente trabalho**

Esta fase refere-se ao ano agrícola 2000/01, com início 12 anos após a instalação do experimento e quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.

### 3.2.1. Tratamentos

Em agosto de 2000, após a análise de solo (0-15 cm), verificou-se a necessidade de reaplicação de calcário em toda a área experimental. Utilizou-se, novamente, como referência, as parcelas de preparo convencional com adubação a lanço. A dose indicada, de  $4,1 \text{ t ha}^{-1}$  (PRNT 100%), média das três repetições, visou elevar o pH do solo a 6,0 (Comissão, 1995).

Após a avaliação do rendimento de matéria seca de aveia preta + ervilhaca comum, aplicou-se, em 28/09/00, uma solução contendo  $3 \text{ L ha}^{-1}$  de Glyphosate para sua dessecação. Quatro dias depois (02/10/00) as culturas foram manejadas com rolo faca. Após, calcário dolomítico foi aplicado em todo o experimento seguindo os procedimentos adotados nas reaplicações anteriores (1992 e 1996), com uma pequena variação, ou seja: nos tratamentos com revolvimento de solo (metade de cada parcela) colocou-se o calcário na superfície do solo, efetuou-se aração e gradagem e aplicou-se os tratamentos de modos de adubação. Na outra metade, aplicou-se, inicialmente, os tratamentos de modos de adubação e, posteriormente, aplicou-se o calcário na superfície do solo. Assim, (a) a subparcela de plantio direto em que o calcário não foi incorporado, completou 12 anos sem mobilização do solo; (b) a outra subparcela, mobilizada para incorporar o calcário e voltando a ser utilizada sem preparo, corresponde ao tratamento de calcário incorporado a cada 4 anos; (c) a subparcela de preparo convencional teve incorporação do calcário; (d) a outra subparcela, que havia sido conduzida em sistema plantio direto desde 1992 quando da primeira aplicação de calcário, permaneceu com o calcário na superfície, completando 8 anos sem revolvimento; (e) na subparcela de preparo em faixas, em que o calcário não foi incorporado completou 12 anos; e (f) a outra subparcela, mobilizada para incorporar o calcário, corresponde ao tratamento de calcário incorporado a cada 4 anos. Os tratamentos de modos de adubação foram os mesmos dos anos anteriores, onde, com base na análise do solo nas parcelas de preparo convencional e adubação a lanço, aplicou-se, em 21/10/00, a recomendação da Comissão (1995), para a cultura do milho:  $110 \text{ kg de P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  e  $60 \text{ kg de K}_2\text{O ha}^{-1}$  nas formas de superfosfato triplo e cloreto de potássio, respectivamente.

### **3.2.2. Implantação e manejo da cultura do milho**

A semeadura do milho, híbrido Pioneer 3069, foi efetuada em 27/10/00, 6 dias após a aplicação dos adubos. As linhas de milho foram localizadas na mesma posição dos cultivos anteriores. O espaçamento dentro da linha foi de 0,2 m e, entre linhas, de 1,0 m. A semeadura foi feita manualmente, utilizando-se uma matraca regulada para depositar de duas a três sementes por cova, resultando, após desbaste, em uma população de aproximadamente 50.000 plantas ha<sup>-1</sup>. Em 10/11/00, aplicou-se herbicida pós-emergente (Sanson), na dose de 1,5 L ha<sup>-1</sup>, para controle de plantas invasoras.

A adubação nitrogenada (150 kg N ha<sup>-1</sup>), foi dividida em três aplicações: na semeadura do milho e 17 e 63 dias após a mesma, aplicando-se, em cada uma, 50 kg N ha<sup>-1</sup>, na forma de uréia. A distribuição das chuvas não foi uniforme durante o ciclo da cultura, havendo necessidade de 4 suplementações de água por irrigação, aplicando-se, cada vez, aproximadamente, 20 mm. Como critério para as suplementações utilizou-se o início do enrolamento das folhas de milho.

### **3.2.3. Implantação e manejo do consórcio aveia + ervilhaca**

Após a avaliação do rendimento de grãos (04/04/01), as plantas inteiras de milho foram manejadas, utilizando-se rolo faca. Sobre esta palhada semeou-se, em 03/05/01, aveia preta (45 kg ha<sup>-1</sup>) + ervilhaca comum (45 kg ha<sup>-1</sup>), utilizando-se uma semeadora Vence Tudo, com abertura de sulco de aproximadamente 2 cm de profundidade e espaçamento entre linhas de 17 cm. Efetuou-se uma adubação de cobertura aos 40 dias após a semeadura (12/06/01), aplicando-se 50 kg N ha<sup>-1</sup>, na forma de uréia.

### **3.2.4. Amostragens e determinações**

Para o presente estudo, foram utilizadas as parcelas de adubação a lanço nos preparos convencional e plantio direto, com e sem mobilização do solo para incorporar o calcário, gerando os seguintes tratamentos: a) Preparo convencional, por 12 anos, b) Plantio direto, por 12 anos, c) Preparo convencional durante 4 anos, seguido de plantio direto por 8 anos e d) Plantio direto (12 anos) com revolvimento do solo a cada quatro anos, para incorporar o calcário.

### **3.2.4.1. Caracterização física do solo**

A amostragem de solo para sua caracterização física foi feita em três ocasiões, sendo a primeira em 23 e 26/09/00, antes da reaplicação de calcário, 12 anos após o início do experimento. A segunda amostragem foi efetuada em 19/04/01 e a terceira em 17/09/01, correspondendo a 6 meses e um ano após a reaplicação do calcário, respectivamente.

As amostras foram coletadas em três locais de cada parcela dos tratamentos antes mencionados (3.2.4), nas seguintes profundidades: 0-2,5; 2,5-7,5 e 7,5-15,0 cm, utilizando-se pá-de-corte e anéis volumétricos, respectivamente, para as determinações de estabilidade dos agregados e de densidade e porosidade do solo.

Os parâmetros físicos avaliados foram: densidade de solo, segundo Blake (1965), macroporosidade, microporosidade e porosidade total, segundo metodologia descrita por Kiehl (1979), usando-se funil com placa porosa de vidro, tensão e sucção matricial de 6 kPa. Também foi determinada a estabilidade de agregados, com base no método descrito por Kemper & Chepil (1965), conforme descrito a seguir.

As amostras (indeformadas) de solo para determinação da estabilidade de agregados foram coletadas e acondicionadas de modo que os agregados não sofressem deformação. No laboratório, os blocos de solo com estrutura original foram secos ao ar, na sombra, até atingirem o ponto de friabilidade. A seguir, as amostras (blocos de solo) foram separadas manualmente, a partir dos pontos de clivagem, em agregados menores que 9,51 mm, passando-os em peneira com essa malha. Em seguida, os agregados foram colocados em pratos de papel onde permaneceram até a determinação da sua estabilidade. Depois de homogêneas, de forma a não segregar o material, pesaram-se subamostras para a determinação da distribuição de agregados a seco (25 g) e em água (25 g), assim como para a determinação da umidade (25 g). Para a determinação dos agregados a seco, as subamostras foram dispostas sobre um conjunto de peneiras, com malhas de 4,76; 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm. Após a agitação de um minuto, utilizando-se um aparelho vibrador Produtest, os agregados retidos em cada peneira foram transferidos para latas e pesados após secagem a 105°C.

Para a determinação da distribuição dos agregados em água, as subamostras foram dispostas sobre um conjunto de peneiras, com malhas de 4,76; 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm e imersas na água até submergir os agregados, quando da posição inferior do curso do agitador, durante 10 minutos. A seguir, estas subamostras foram submetidas a uma peneiragem úmida durante 5 minutos, num agitador de oscilação vertical, com 45 oscilações por minuto. O material retido em cada peneira foi transferido para latas e pesado após secagem a 105°C.

O índice de estabilidade dos agregados de solo foi obtido pela razão DMPu/DMPs (diâmetro médio ponderado obtido pela agitação úmida dividido pelo diâmetro médio ponderado obtido pela agitação a seco). O DMPu e o DMPs foram calculados a partir do somatório dos produtos entre o diâmetro médio de cada fração de agregado e a proporção da massa da amostra, que é obtida através da divisão da massa de agregados retidos em cada peneira pela massa da amostra corrigida em termos de umidade.

#### **3.2.4.2. Caracterização química do solo**

Para avaliar o efeito da reaplicação de calcário sobre os atributos químicos, fez-se duas amostragens de solo: a primeira, em 23 e 26/09/00, antes da reaplicação de calcário e a segunda, aproximadamente um ano após (17/09/01). Coletou-se as amostras com pá-de-corte, em quatro locais nas entre linhas do milho de cada parcela com adubação a lanço, antes referida (3.2.4), e nas mesmas profundidades da amostragem para a avaliação dos parâmetros físicos, ou seja: 0-2,5; 2,5-7,5 e 7,5-15,0 cm.

Os parâmetros químicos avaliados foram: carbono orgânico total, por digestão úmida com posterior titulação, de acordo com o método de Walkley & Black, pH-H<sub>2</sub>O (relação 1:1), pH CaCl<sub>2</sub> 0,01M (relação 1:2,5), índice SMP, cálcio e magnésio trocáveis (KCl 1M) em espectrofotômetro de absorção atômica, alumínio trocável (KCl 1M) por titulação com NaOH 0,0125M e fenolftaleína de indicador e potássio trocável (Mehlich-1) por fotometria de chama, todos conforme metodologia descrita em Tedesco et al. (1995), exceto do pH CaCl<sub>2</sub> 0,01M, descrita em EMBRAPA (1997). A CTC efetiva (Ca + Mg + K + Al trocáveis) foi calculada.

### **3.2.5. Rendimento de grãos e de matéria seca**

#### **3.2.5.1. Milho**

Na fase de enchimento de grãos (12/01/01), as plantas de milho foram amostradas para determinação do rendimento de matéria seca. Nas quatro linhas centrais de cada parcela, coletou-se quatro plantas inteiras (parte aérea) de milho. Estas plantas foram colocadas para secar em estufa com circulação de ar, a 65°C de temperatura. Após adquirirem peso constante, efetuou-se a pesagem e a determinação do rendimento de matéria seca.

O rendimento de grãos foi avaliado em 04/04/01 através de amostragem numa área de 16 m<sup>2</sup> por parcela, corrigindo-se a umidade para 130 g kg<sup>-1</sup>.

#### **3.2.5.2. Aveia preta + ervilhaca comum**

O consórcio aveia preta + ervilhaca comum foi avaliado manualmente no dia 24/08/01, em seu estágio de pleno florescimento. Determinou-se o rendimento de matéria seca através da amostragem numa área de 1,0 m<sup>2</sup> situada na área útil de cada parcela. A determinação foi efetuada após as amostras atingirem peso constante.

### **3.2.6. Análise estatística**

Realizou-se a análise da variância dos resultados de rendimento do milho e aveia preta + ervilhaca comum, considerando-se os quatro tratamentos (item 3.2.4) e o delineamento experimental de blocos ao acaso, utilizando-se o teste de Tukey (P<0,05) para a comparação entre médias.

A análise de variância para os dados dos parâmetros físicos e químicos foi feita de acordo com os modelos (1) e (2) com a inclusão da restrição aos fatores profundidade e tempo (época de avaliação):

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + S_j + \text{erro a (i,j)} + P_k + \text{erro b (ik)} + SP_{jk} + \text{erro c (i,j,k)} \quad (1)$$

onde: B = blocos (i = 1,2,3); S = sistemas de manejo (j = 1,2,3,4); P = profundidade do solo (k = 1,2,3).

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + T_j + \text{erro a (i,j)} + P_k + \text{erro b (ik)} + TP_{jk} + \text{erro c (i,j,k)} \quad (2)$$

onde: B = blocos ( $i = 1,2,3$ ); T = tempo (época de avaliação) ( $j = 1,2,3$  parâmetros físicos;  $j = 1,2$  parâmetros químicos); P = profundidade do solo ( $k = 1,2,3$ ).

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nesta etapa, são abordados e discutidos os resultados referentes às avaliações feitas quatro anos após a segunda reaplicação de calcário e seis e doze meses após a terceira reaplicação de calcário. É dada ênfase aos efeitos acumulados e aos de curto prazo da mobilização do solo por ocasião das reaplicações de calcário sobre os atributos físicos do solo. São, também, apresentados os efeitos do manejo da calagem sobre os atributos químicos do solo e sobre o rendimento das culturas de milho e de aveia + ervilhaca.

### **4.1. Atributos físicos do solo em função do seu manejo na reaplicação do calcário**

#### **4.1.1. Quatro anos após a segunda reaplicação de calcário**

Os quatro tratamentos gerados a partir da segunda reaplicação de calcário são: preparo convencional durante doze anos, plantio direto durante doze anos, plantio direto durante oito anos antecedido por quatro anos de preparo convencional e plantio direto durante doze anos com revolvimento do solo no quarto e oitavo anos, para a incorporação do calcário.

Os tratamentos de plantio direto (4, 8 e 12 anos) apresentaram menor densidade do solo, na camada superficial, em relação às demais camadas avaliadas (Figura 2). Para Fernandes et al. (1983) e Reeves (1995), a densidade do solo no plantio direto pode diminuir com o passar dos anos devido à melhoria da estrutura do solo pelo aumento da matéria orgânica na camada superficial. Em contrapartida, o preparo convencional apresentou densidade similar no perfil, pelo revolvimento anual do solo, que tende a homogeneizar a camada revolvida.

Deve-se salientar que, apesar dos resultados diferenciados nos tratamentos, mesmo no solo mobilizado anualmente, a densidade do solo é

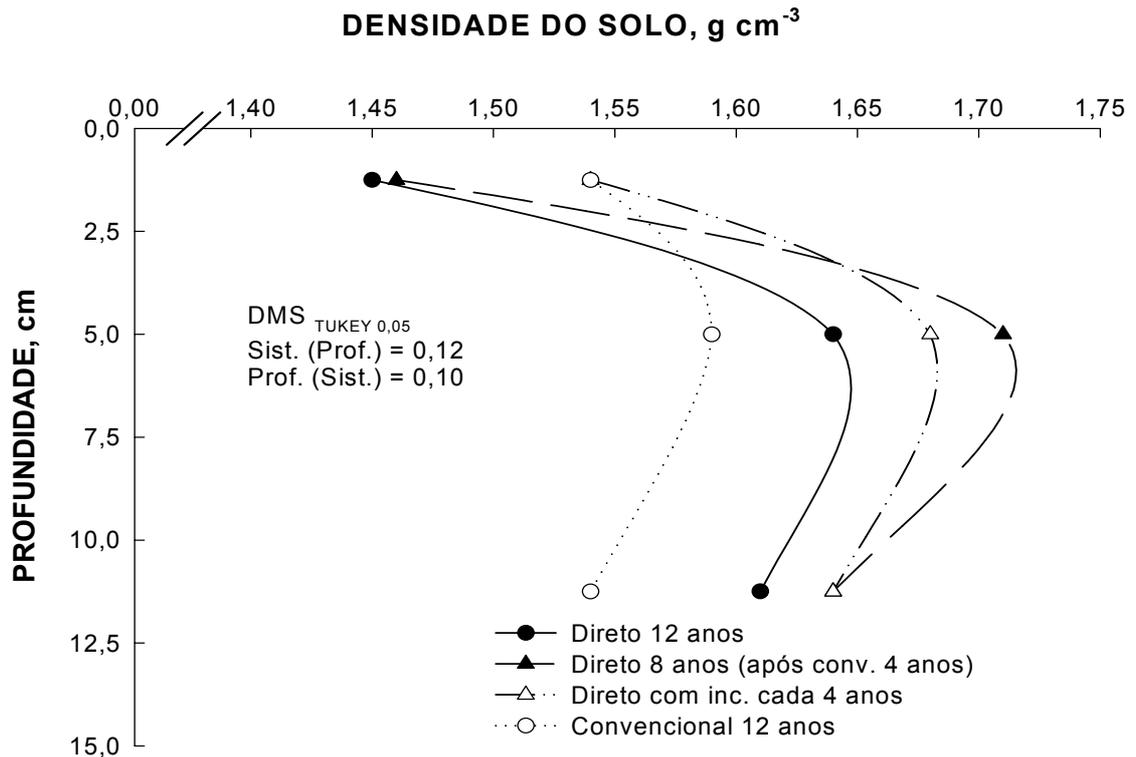


FIGURA 2. Densidade do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.

elevada e conseqüentemente, a porosidade total é baixa. Os maiores reflexos estão, principalmente, na camada de 2,5-15,0 cm do sistema plantio direto. O elevado valor de densidade do solo ocorre, provavelmente, devido à distribuição das partículas do solo, que pode influenciar, de maneira significativa, a predisposição ao “empacotamento” do solo. Barnes et al. (1971) mediram a densidade máxima alcançada misturando várias proporções de areia com solo, verificando as maiores densidades na fração areia entre 500 a 850 g kg<sup>-1</sup>. No experimento em estudo, a distribuição das partículas se enquadra dentro dessa faixa, ou seja, alta predisposição ao “empacotamento”. Assim, as partículas tendem a se ajustar umas nos espaços deixados pelas outras, elevando a densidade do solo e resultando na formação de camadas adensadas, mesmo em solos sem interferência antrópica. O sistema plantio direto nem sempre causa aumento na densidade do solo, podendo, inclusive, diminuir a mesma e aumentar a porosidade e o diâmetro dos agregados, com o passar do tempo de cultivo (Campos et al., 1995).

Como esperado, os resultados de porosidade total nos diferentes tratamentos de plantio direto (Figura 3) tiveram comportamento inverso aos de

densidade (Figura 2). Foi menor na camada superficial do sistema plantio direto por quatro anos, em relação ao plantio direto contínuo (Figura 3). Para a densidade do solo (Figura 2), embora não tenha ocorrido diferença nessa camada, houve uma ligeira tendência a ser maior.

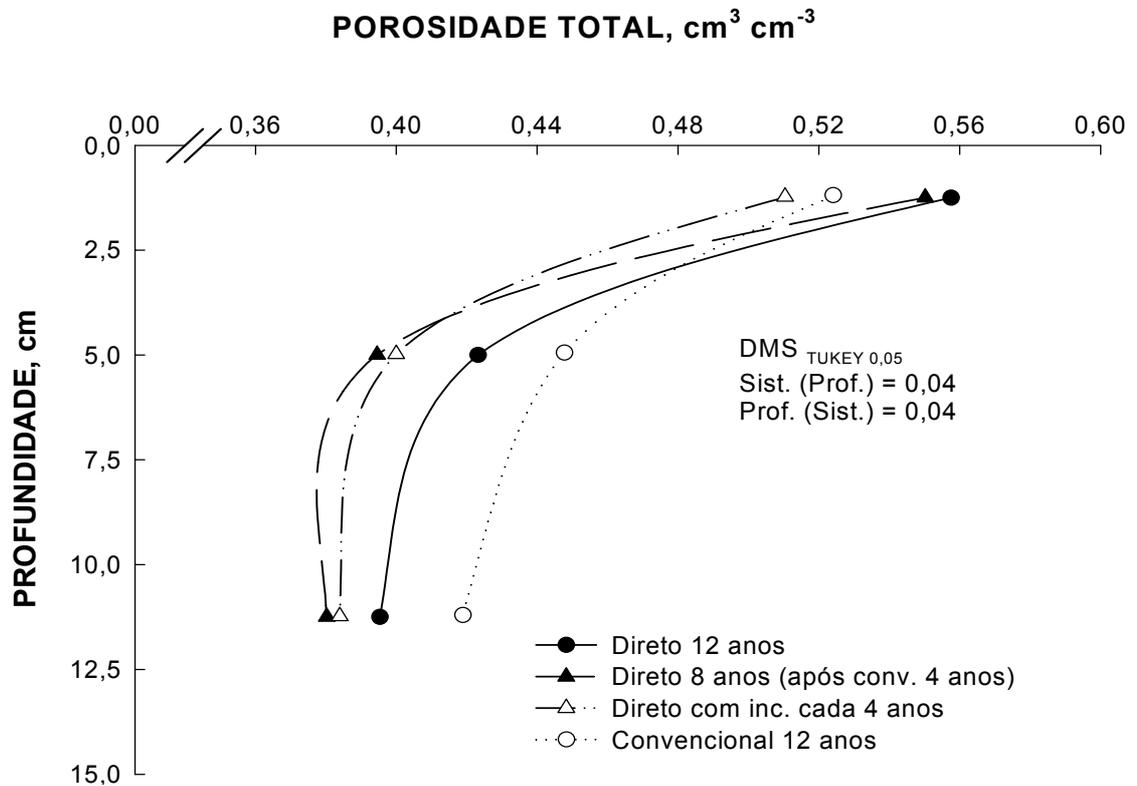


FIGURA 3. Porosidade total do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.

A porosidade total foi maior na camada superficial em relação às demais profundidades em todos os sistemas de manejo. Esse resultado já havia sido observado por Cassol (1995), no mesmo experimento. Diferentemente da camada superficial, na camada de 2,5-7,5 cm o preparo convencional apresentou maior porosidade total em relação aos plantio direto de quatro e oito anos. Como os valores de porosidade total e densidade do solo no plantio direto de doze anos se aproximam e não se diferenciam dos de plantio direto de quatro e oito anos, há concordância, ao menos em parte, com a idéia de que, a longo prazo, foi melhorando a qualidade física do solo em profundidade, no sistema plantio direto.

O comportamento da macroporosidade (Figura 4) foi semelhante ao da porosidade total, sendo maior na camada superficial para todos os sistemas de manejo em relação às demais profundidades. No entanto, deve-se salientar que não houve interação entre sistemas e profundidades para esse atributo físico. Assim, verifica-se que o revolvimento do solo, a cada quatro anos, no sistema plantio direto não resultou em diferença em relação aos sistemas com plantio direto contínuo, mas apresentou-se menor em relação ao preparo convencional, onde o revolvimento é anual (Figura 4). Observa-se, também, na camada de 2,5-15,0 cm dos tratamentos de plantio direto por quatro e oito anos valores de macroporosidade menores que  $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Estes valores podem restringir o crescimento radicular e o desenvolvimento das plantas (Vomocil & Flocker, 1961; Grable & Siemer, 1968).

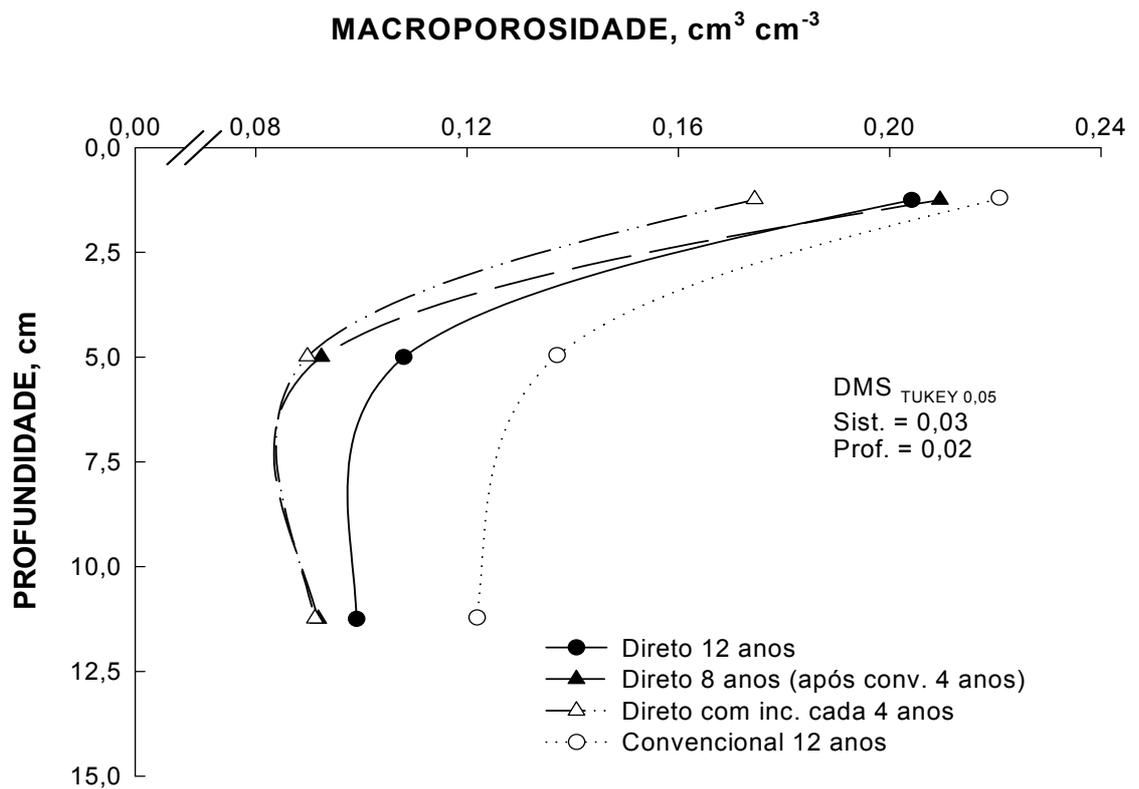


FIGURA 4. Macroporosidade do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.

A microporosidade foi maior na camada superficial nos tratamentos com plantio direto em relação às camadas subsuperficiais (Figura 5). Entretanto, essa diferença não é evidenciada no preparo convencional, uma

vez que o revolvimento anual do solo tende a homogeneizar o mesmo em todo o perfil revolvido, não se verificando, assim, diferenças na microporosidade entre as profundidades. Na comparação entre os tratamentos, houve diferença somente na camada superficial, onde a microporosidade foi menor no preparo convencional em relação aos tratamentos sob plantio direto (Figura 5). Provavelmente, com revolvimento anual do solo ocorre a obstrução dos microporos pelas partículas de argila.

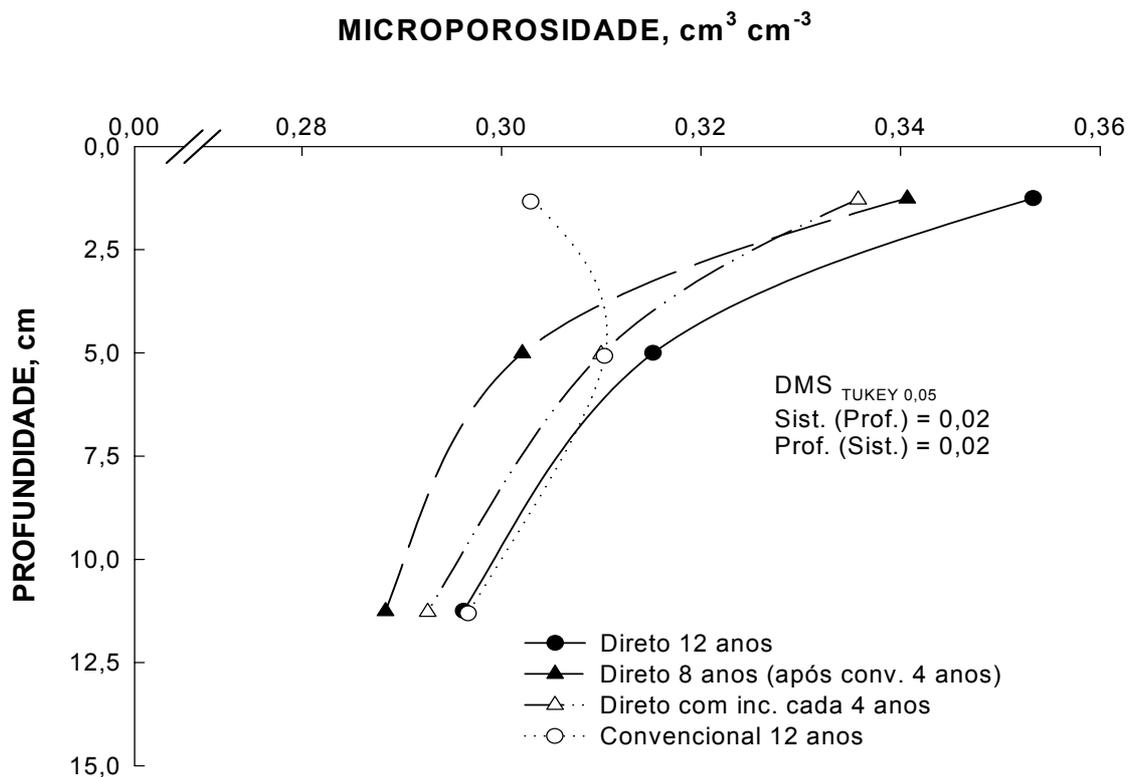


FIGURA 5. Microporosidade do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário

Neste estudo, a qualidade estrutural do solo pode ser melhor visualizada através do índice de estabilidade de agregados (Figura 6). Considerando a metodologia utilizada, quanto maior o valor da relação  $\text{DMPu/DMPs}$  (mais próximo da unidade), maior é a estabilidade dos agregados do solo.

O índice de estabilidade de agregados foi maior na camada superficial nos três tratamentos do sistema plantio direto em relação ao preparo convencional (Figura 6). No sistema plantio direto, esse índice decresce em profundidade, especialmente no de doze anos. O revolvimento do solo, para a

incorporação do calcário, também incorpora agregados mais estáveis presentes na superfície que, somado à incorporação do próprio calcário e da matéria orgânica, devem elevar a estabilidade em profundidade, com uma conseqüente tendência de diminuição na superfície. Segundo Carpenedo & Mielniczuk (1990), o sistema de plantio direto propicia maior estabilidade de agregados em relação ao preparo convencional no qual se faz aração e gradagem seguidas de gradagem de nivelamento por ocasião do plantio.

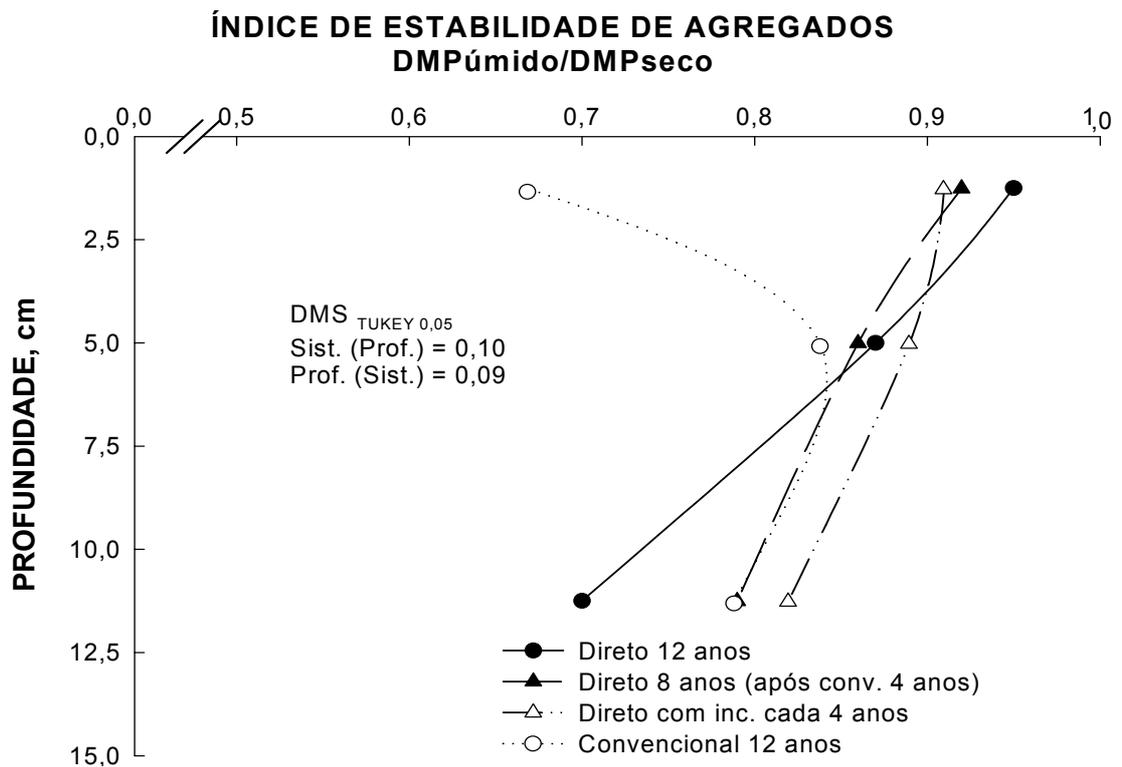


FIGURA 6. Índice de estabilidade de agregados em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.

De maneira geral, os resultados sugerem que, apesar do revolvimento do solo para a incorporação de calcário apresentar um possível impacto negativo momentâneo sobre alguns atributos físicos do solo, posteriormente há uma recuperação parcial quando o solo é mantido sem revolvimento.

No preparo convencional, a menor estabilidade de agregados era esperada, uma vez que, devido ao revolvimento anual, os agregados vão diminuindo de tamanho. Assim, além das forças disruptivas da ação mecânica, o solo revolvido fica exposto à desagregação pelo impacto das gotas da chuva

que, somado à mineralização da matéria orgânica, diminui a estabilidade dos agregados.

O sistema plantio direto, ao acumular material vegetal na superfície, apresenta maior carbono orgânico nessa camada em relação às demais e, também, em relação ao preparo convencional que apresenta uma distribuição mais uniforme no perfil do solo (Figura 7), uma vez que é revolvido anualmente. Esse comportamento concorda com afirmações de Bayer & Mielniczuk (1997) e Castro Filho et al. (1998), em que, em geral, no sistema plantio direto, ocorre o acúmulo de matéria orgânica na camada superficial em relação às camadas subsuperficiais.

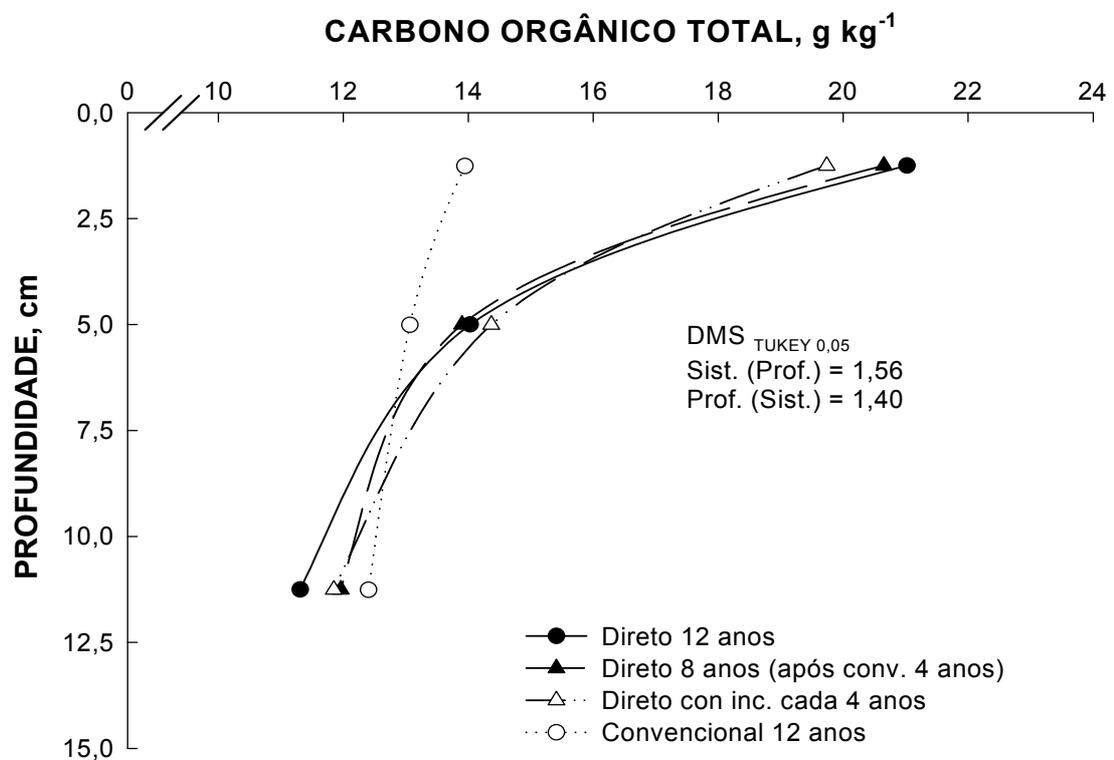


FIGURA 7. Carbono orgânico total do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.

O carbono orgânico do solo apresenta uma relação muito estreita com o índice de estabilidade de agregados, tal a semelhança de comportamento dos resultados (Figuras 6 e 7), corroborando as correlações altamente significativas entre índices de agregação e carbono orgânico encontradas por Carpenedo & Mielniczuk (1990) e Castro Filho et al. (1998).

No sistema plantio direto, o revolvimento do solo a cada quatro anos não ocasionou mudanças no teor de carbono orgânico total, em relação ao plantio direto contínuo por mais tempo (8 e 12 anos)(Figura 7), indicando que um eventual revolvimento, seguido de um retorno ao sistema plantio direto, não ocasionaria grande prejuízo à matéria orgânica.

A menor densidade do solo e maior macro, micro e porosidade total na camada superficial do sistema plantio direto em relação às demais camadas pode ser relacionada ao efeito da matéria orgânica acumulada na superfície do solo.

Os sistemas de manejo influenciam diretamente nas propriedades estruturais do solo, uma vez que a agregação depende, entre outras coisas, do conteúdo e tipo de matéria orgânica, sistemas de culturas (Perfect et al., 1990), atividade biológica (Lehrsch & Jolley, 1992), preparo do solo e tráfego de máquinas (Kay, 1990), e, ainda, variações de umidade e temperatura no solo. Deve-se salientar que a instalação do experimento em estudo foi em solo de campo natural, com boa estrutura, ao contrário da maioria das lavouras em plantio direto que tem partido de uma estrutura degradada de solo. Outro fato a considerar é que a declividade do terreno é quase nula e, com isso, eventuais problemas com erosão são mínimos quando do revolvimento do solo. Também, neste experimento, o tráfego de máquinas é mínimo, uma vez que, a semeadura do milho é feita com “matraca” e a colheita é manual.

As boas condições estruturais iniciais, o reduzido trânsito de máquinas e as operações de preparo realizadas em condições privilegiadas de umidade beneficiam os atributos físicos do solo. Em condições de lavoura, certamente o comportamento deve ser diferenciado. Assim, no sistema plantio direto contínuo (12 anos), os atributos físicos avaliados, possivelmente, pouco diferenciaram-se, ao longo do tempo de cultivo, em relação ao seu estado original, campo natural. Bayer (1996) obteve, nas mesmas condições de solo e vegetação em área próxima, valores de densidade do solo entre 1,49 a 1,63 g cm<sup>-3</sup> e Silva (1993) de teor de carbono orgânico igual a 20,9 g kg<sup>-1</sup>, na camada de 0-15 cm, semelhantemente aos valores encontrados para o sistema plantio direto doze anos do experimento.

Os resultados indicam que um possível prejuízo de revolver o solo para a incorporação do calcário é passageiro, uma vez que, após quatro anos,

essa estabilidade de agregados já estaria totalmente recuperada. Também deve-se salientar que essa recuperação na estabilidade de agregados talvez ocorra em menor período de tempo.

#### **4.1.2. Após a terceira reaplicação de calcário**

Os resultados referem-se às amostragens efetuadas quatro anos após a segunda reaplicação de calcário (imediatamente antes da terceira reaplicação de calcário) e seis e doze meses após a terceira reaplicação de calcário, nos tratamentos discutidos no item anterior (4.1.1).

No preparo convencional, a densidade do solo, a porosidade total e a macroporosidade (Figuras 8a a 10a) não foram modificadas ( $P>0,05$ ) pelo revolvimento do solo. Já, a microporosidade foi menor seis meses após o revolvimento do solo e, aos doze meses aumentou, voltando ao estado original (antes da calagem) (Figura 11a).

O revolvimento do solo após quatro anos de plantio direto teve efeito positivo na maioria dos atributos físicos. Na avaliação aos seis meses a densidade do solo, embora apresente forte tendência à diminuição, não diferiu da original ( $P>0,05$ ) (Figura 8b). A porosidade total e a macroporosidade aumentaram (Figuras 9b e 10b) e a microporosidade diminuiu (Figura 11b). Aos doze meses, a porosidade total ainda não recuperou o estado original, embora haja tendência do seu retorno com o passar do tempo. Já, a macro e a microporosidade voltaram ao estado original, apresentando tendência de serem maiores, em relação à original, inclusive a microporosidade que havia sido menor aos seis meses.

Antes do revolvimento do solo a densidade média era de  $1,62 \text{ g cm}^{-3}$  e após o revolvimento foi de  $1,47 \text{ g cm}^{-3}$  e  $1,51 \text{ g cm}^{-3}$ , aos seis e doze meses respectivamente (Figura 8b). Embora não tenha ocorrido diferença ( $P>0,05$ ), pode-se verificar o efeito, a curto prazo, do revolvimento do solo, que, com o passar do tempo, tende a voltar ao estado original.

Nos tratamentos de sistema plantio direto por oito e doze anos, não houve diferença nos atributos físicos entre as três avaliações, o que era esperado devido ao não revolvimento do solo. As aparentes diferenças visuais existentes na porosidade total, macroporosidade e microporosidade entre as três avaliações, (Figuras 9cd a 11cd), devem-se, provavelmente, à

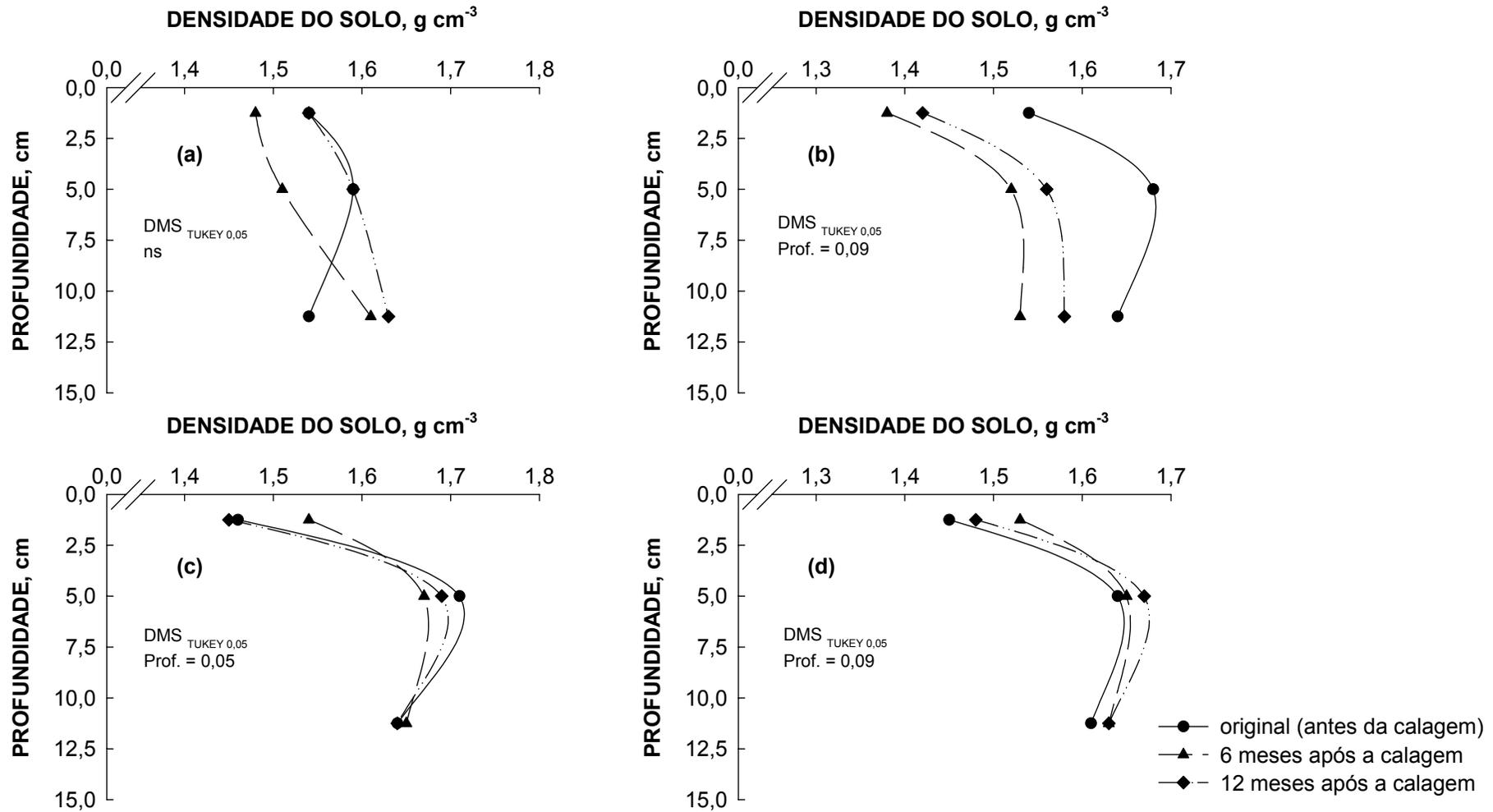


FIGURA 8. Densidade do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo. a) Convencional 12 anos; b) Direto incorporado cada 4 anos; c) Direto 8 anos; d) Direto 12 anos.

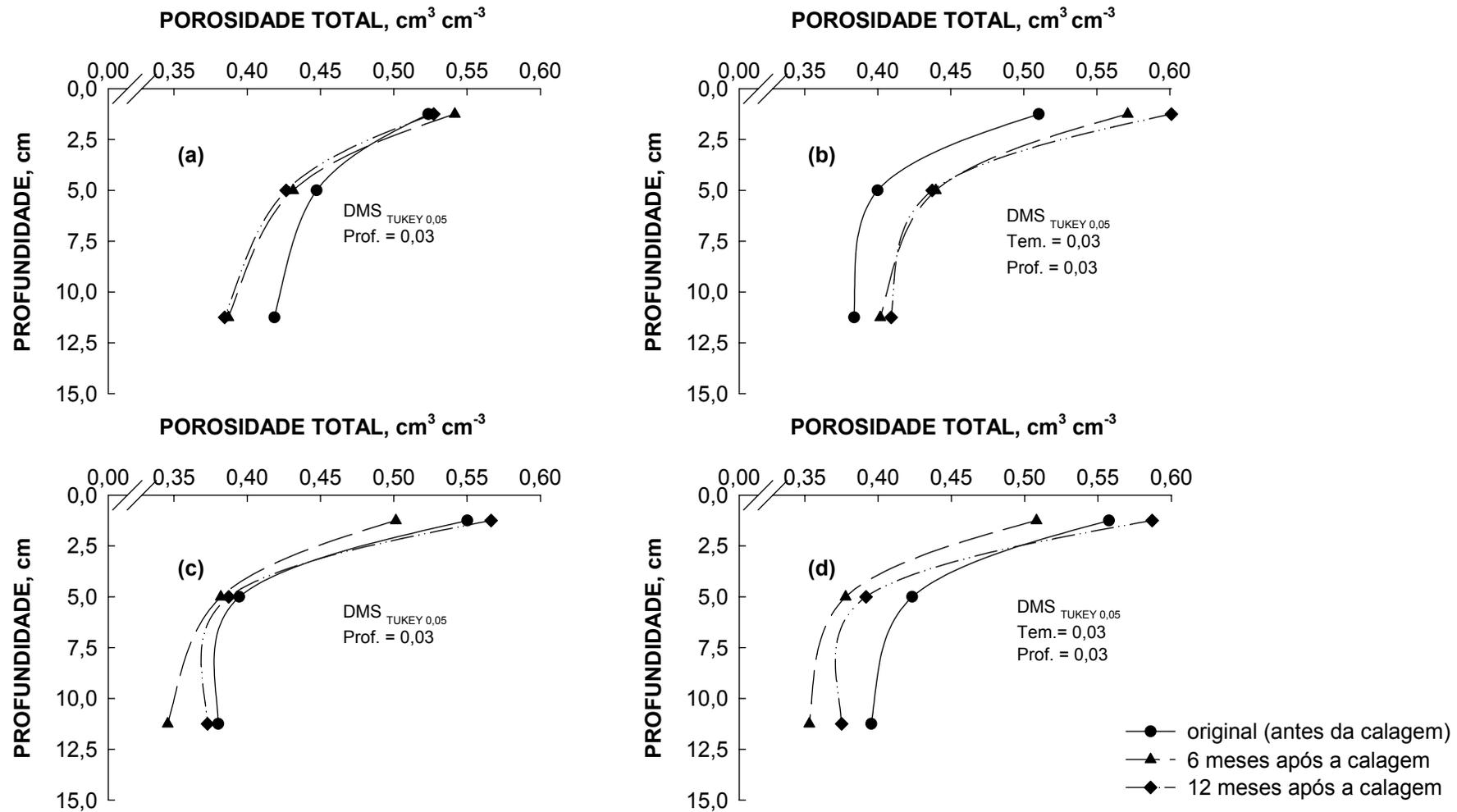


FIGURA 9. Porosidade total do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo. a) Convencional 12 anos; b) Direto incorporado cada 4 anos; c) Direto 8 anos; d) Direto 12 anos.

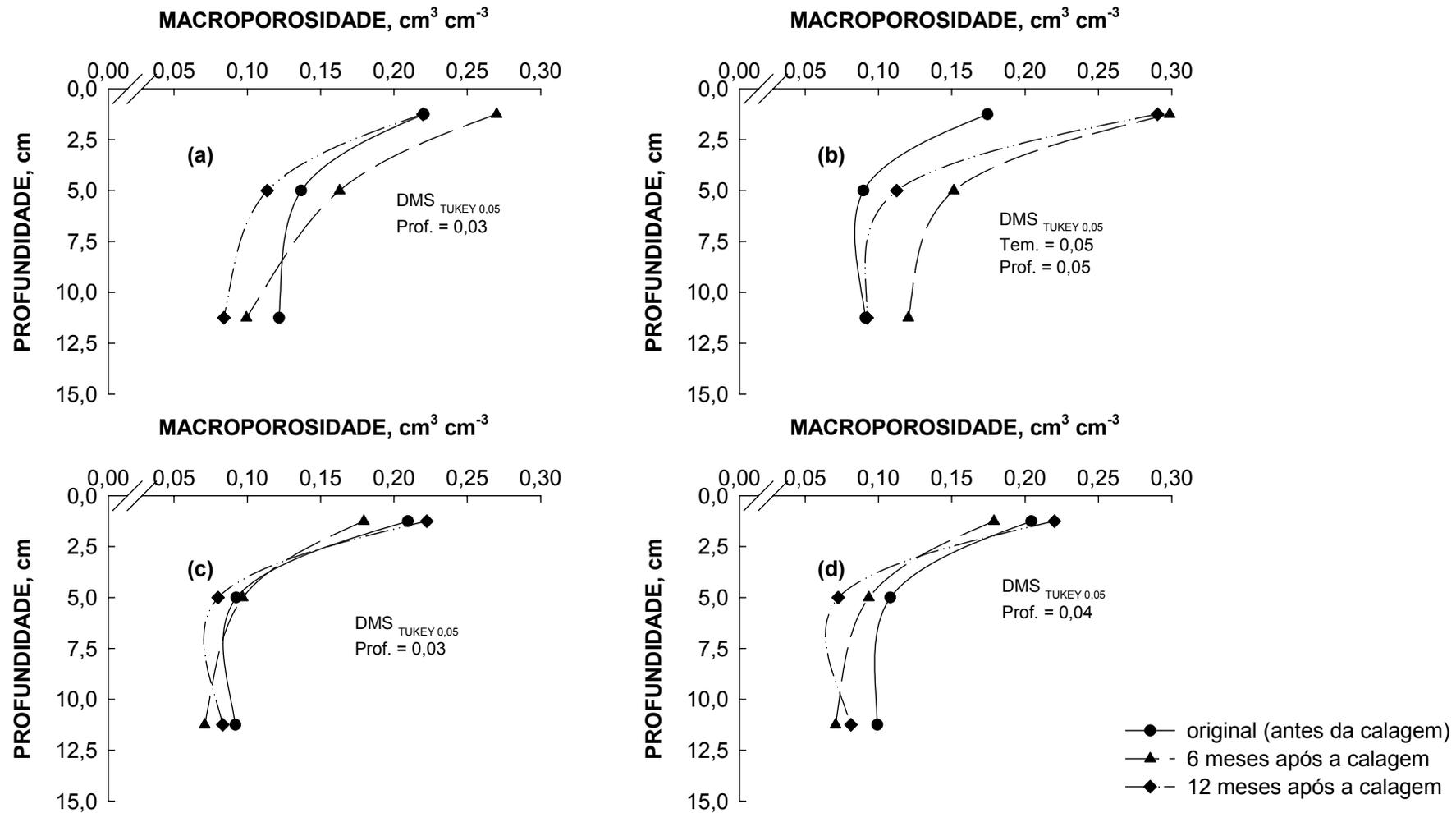


FIGURA 10. Macroporosidade do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo. a) Convencional 12 anos; b) Direto incorporado cada 4 anos; c) Direto 8 anos; d) Direto 12 anos.

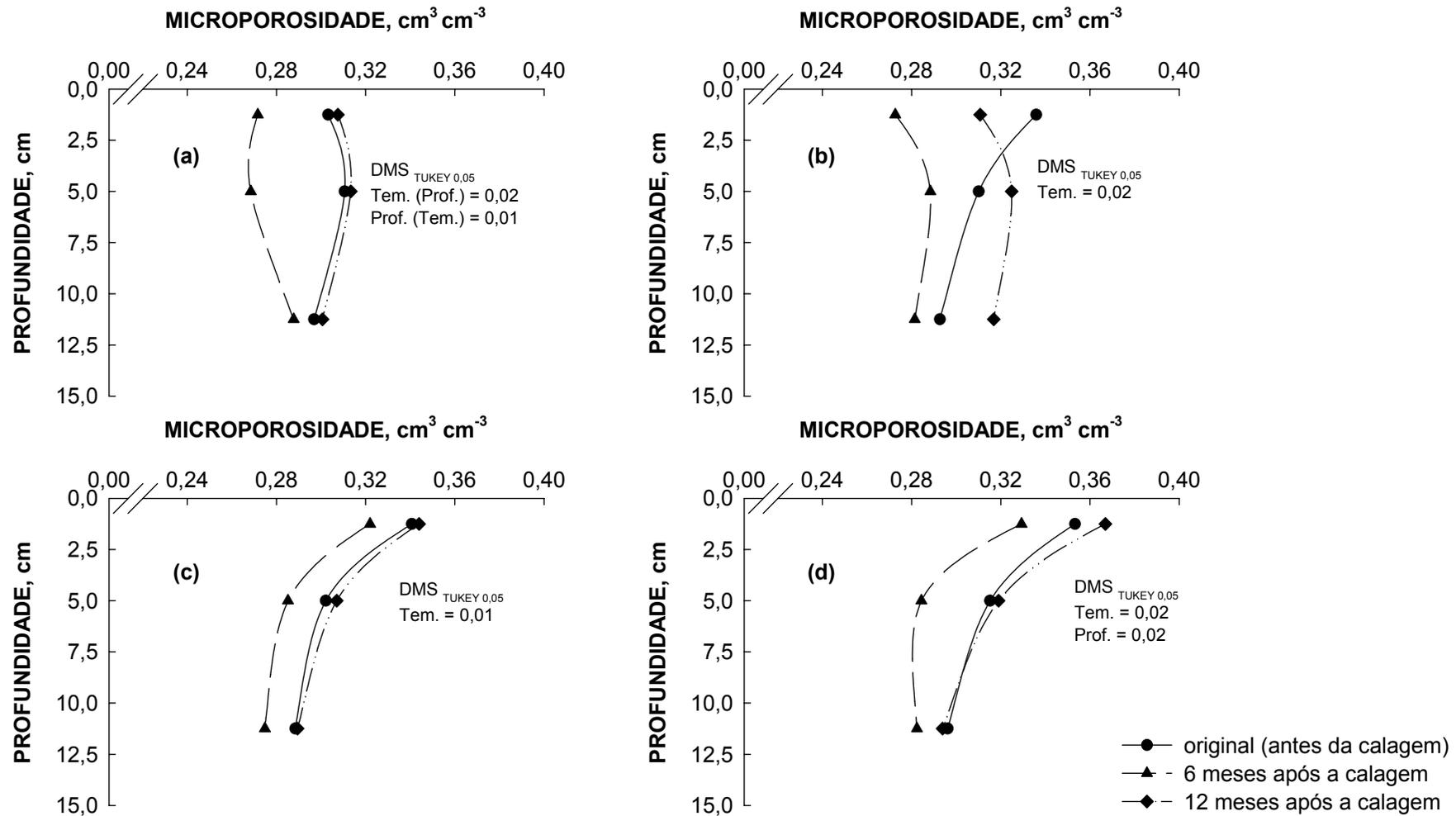


FIGURA 11. Microporosidade do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo. a) Convencional 12 anos; b) Direto incorporado cada 4 anos; c) Direto 8 anos; d) Direto 12 anos.

variabilidade nas amostragens, porém não foram suficientes para resultar em diferenças ( $P>0,05$ ).

O revolvimento do solo embora apresente tendência à diminuir o índice de estabilidade de agregados no preparo convencional, a mesma não foi suficiente para resultar em diferença ( $P>0,05$ ) (Figura 12a). A expectativa era de que não houvesse diferença na estabilidade de agregados, uma vez que o solo é revolvido anualmente.

Para o plantio direto com revolvimento do solo a cada quatro anos, o índice de estabilidade de agregados diminuiu com o revolvimento do solo e, ainda, não recuperou e nem apresenta tendência de retorno ao estado original aos doze meses (Figura 12b). Observa-se, novamente, uma estreita relação do teor de carbono com a estabilidade de agregados, uma vez que, com o revolvimento do solo, parte da matéria orgânica que estava na superfície foi incorporada na camada subsuperficial e a outra parte mineralizada, explicando, assim, o decréscimo superficial de carbono e um certo incremento em profundidade (Figura 13b). A diminuição do teor de carbono após o revolvimento, devido a mineralização, explica, ao menos em parte, a não recuperação da estabilidade de agregados.

Perdas na qualidade estrutural do solo foram, também, encontradas por Fucks et al. (1994) após uma aração e duas gradagens, em área de plantio direto por quatro anos, uma vez que parte dos agregados maiores e mais estáveis, formados ao longo do tempo, foram reduzidos em função das operações de preparo do solo.

Para o sistema plantio direto contínuo (8 e 12 anos), a exemplo do que ocorreu com o teor de carbono (Figuras 13c e 13d), não houve diferenças no índice de estabilidade de agregados entre as três avaliações (Figuras 12c e 12d). Todavia, houve tendência à alteração na camada de 7,5-15,0 cm, provavelmente, devido a variações de amostragem ou metodológicas, porém não resultou em diferença ( $P>0,05$ ). Índices de agregação, mostrando correlações altamente significativas com o carbono orgânico, foram, também, encontrados por Carpenedo & Mielniczuk (1990) e Castro Filho et al. (1998).

No preparo convencional, o revolvimento anual do solo tende à homogeneizar a camada de solo revolvida. Assim, a tendência é que os atributos físicos apresentem pouca diferença entre as profundidades e no

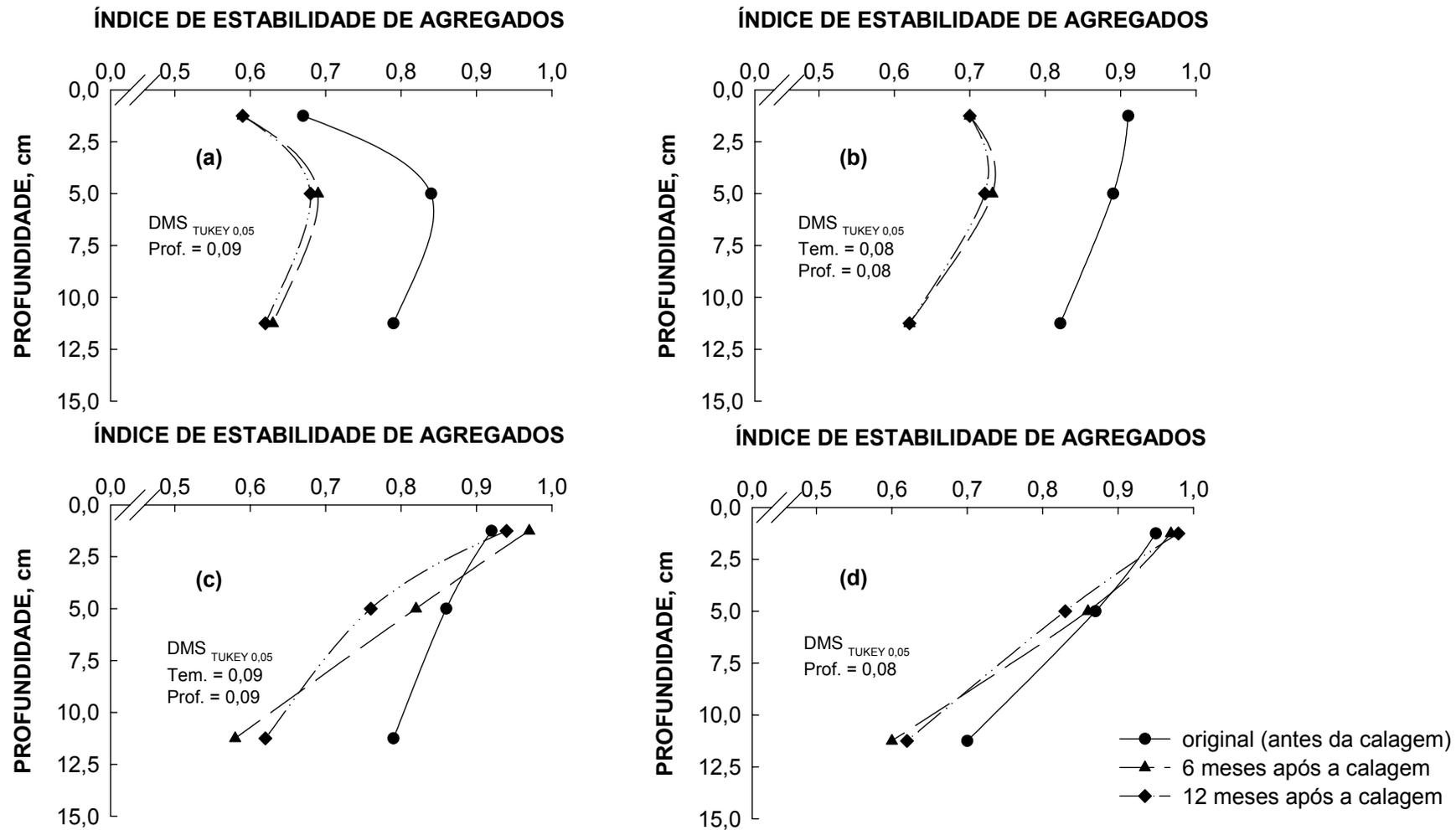


FIGURA 12. Índice de estabilidade de agregados em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo. a) Convencional 12 anos; b) Direto incorporado cada 4 anos; c) Direto 8 anos; d) Direto 12 anos.

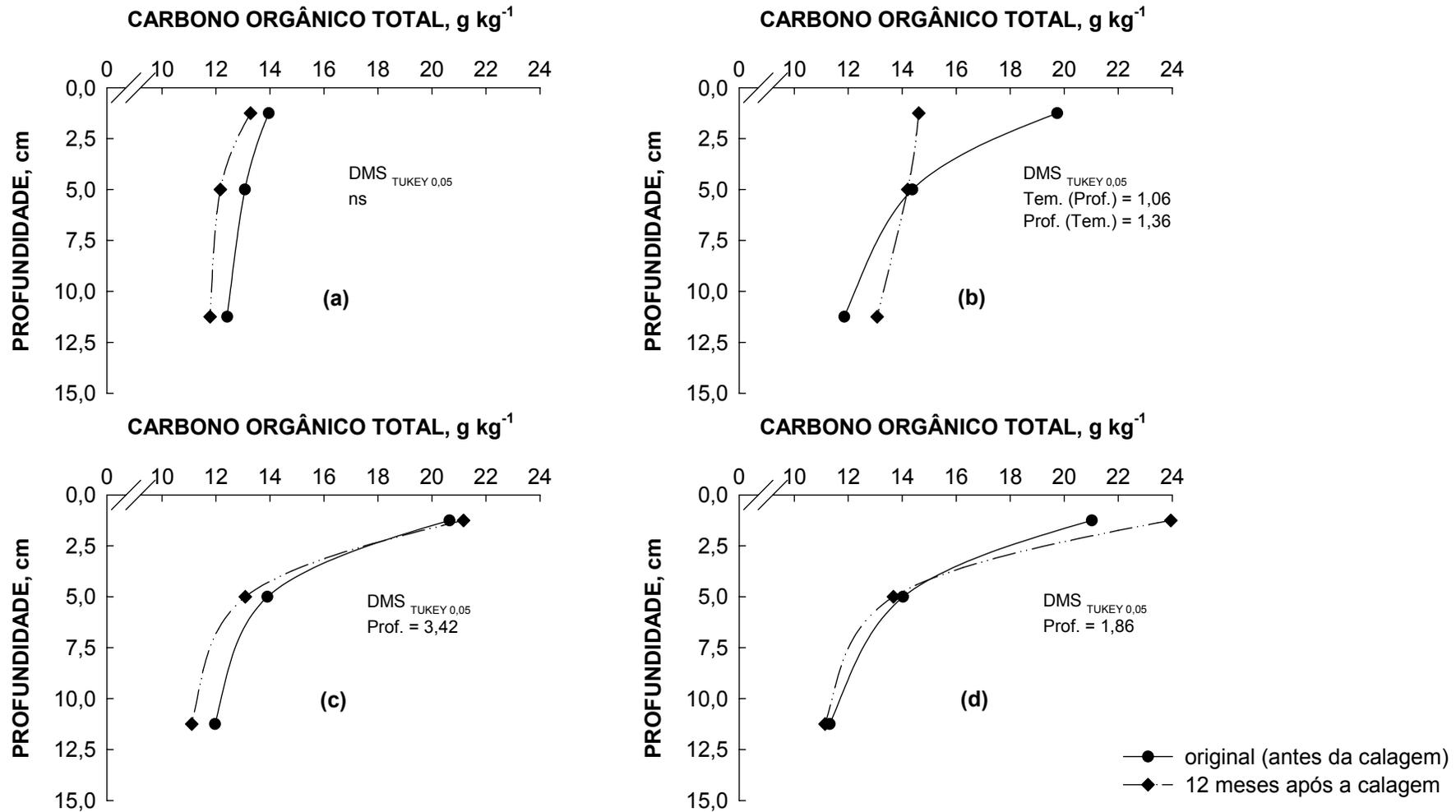


FIGURA 13. Carbono orgânico total do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo. a) Convencional 12 anos; b) Direto incorporado cada 4 anos; c) Direto 8 anos; d) Direto 12 anos.

tempo, resultando em condições bastante parecidas com aquelas do ano anterior.

A justificativa para o comportamento da macroporosidade no sistema plantio direto com revolvimento do solo a cada quatro anos (Figura 10b) é que, devido ao provável adensamento natural das partículas do solo, ao longo dos quatro anos, houve uma diminuição da macroporosidade. Com o revolvimento do solo houve um aumento da mesma, num primeiro momento e, após a tendência foi de voltar à situação original. Com relação a microporosidade, ocorreu comportamento inverso, ou seja, a microporosidade diminuiu com o revolvimento do solo, num primeiro momento e depois voltou a aumentar, não diferindo aos doze meses da avaliação anterior ao revolvimento do solo (Figura 11b).

Com a mobilização do solo, há um aumento do volume de poros, principalmente dos macroporos, e conseqüente diminuição da densidade (Da Ros et al., 1997). O aumento na porosidade de aeração observada pela mobilização do solo, a cada quatro anos no sistema plantio direto, é importante, uma vez que os macroporos permitem o rápido fluxo de ar e de água no solo (Culley et al., 1987). A porosidade de aeração destaca-se como um dos atributos mais importantes em relação ao desempenho dos sistemas de manejo sobre a produtividade das culturas. Assim, em análise mais detalhada, observa-se que a macroporosidade apresenta valores abaixo de  $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (Figura 10), potencialmente limitantes ao crescimento radicular das plantas (Vomocil & Flocker, 1961; Grable & Siemer, 1968). Tal limite depende também do tipo de planta e do nível de atividade biológica do solo (Gupta et al., 1989). O fornecimento de oxigênio às raízes depende, no entanto, de vários fatores, incluindo tortuosidade, continuidade e distância entre poros ocupados com ar (Dexter, 1988). Segundo Reinert et al. (1984), solos cultivados em plantio direto adquirem condições físicas diferentes em relação ao convencional.

No sistema plantio direto com revolvimento do solo a cada quatro anos, foi possível observar que o eventual revolvimento do solo teve efeitos negativos sobre a estabilidade de agregados, porém com o passar do tempo, sendo cultivado novamente no sistema plantio direto, é possível recuperar o estado original, conforme foi evidenciado no item 4.1.1, na comparação do plantio direto por quatro anos, após o revolvimento do solo, com plantio direto

por oito e doze anos (Figura 6). Assim, pode-se inferir que quatro anos é tempo suficiente para recuperar o estado original. Deve-se salientar que, é possível que esta recuperação possa ocorrer em um período menor. Analisando o tempo necessário para a recuperação do estado de agregação existente antes do revolvimento do solo, após um ano de preparo convencional em área de plantio direto, Santin et al. (1994) constataram a necessidade de três anos para que o solo recuperasse de 53 a 90% do diâmetro médio geométrico dos agregados em relação ao plantio direto contínuo.

A reestruturação do solo está relacionada, basicamente, ao sistema de manejo do solo. A adoção de sistemas de manejo que propiciem a proteção do solo através do contínuo aporte de resíduos orgânicos é fundamental para uma boa estrutura. O contínuo aporte de material orgânico serve como fonte de energia para a atividade microbiana, que atua como agente de estabilização dos agregados (Campos et al., 1995).

O eventual revolvimento do solo, para incorporação de corretivos e/ou para descompactar o solo, após alguns anos de cultivo em sistema plantio direto pode modificar os atributos físicos do solo, tendo efeitos negativos nos agregados maiores e mais estáveis formados ao longo do tempo. Mas por outro lado, pode reduzir a densidade do solo, aumentar sua macroporosidade e incorporar material orgânico, disponibilizando nutrientes. Revolver o solo no sistema plantio direto pode ser importante quando a densidade ou a resistência mecânica atingirem valores limitantes para a produtividade das culturas.

Apesar da maioria dos atributos físicos do solo recuperarem o seu estado original após doze meses do revolvimento do solo, no sistema plantio direto com revolvimento do solo a cada quatro anos, para o índice de estabilidade de agregados, esse tempo não foi suficiente, indicando, a curto prazo, efeito negativo na sua estrutura.

## **4.2. Atributos químicos do solo em função do seu manejo na reaplicação do calcário**

### **4.2.1. Quatro anos após a segunda reaplicação de calcário**

Os resultados apresentados neste item são referentes à coleta feita em setembro de 2000. Assim, os tratamentos e a época de coleta são os mesmos do item 4.1.1: preparo convencional durante doze anos, plantio direto

durante doze anos, plantio direto durante oito anos antecedido por quatro anos de preparo convencional e plantio direto durante doze anos com revolvimento do solo no quarto e oitavo anos para a incorporação do calcário.

Os tratamentos de preparo convencional e plantio direto com revolvimento do solo a cada quatro anos apresentaram, em geral, valores mais uniformes na camada mobilizada (0-15 cm) para todos os atributos químicos avaliados, em relação ao sistema plantio direto por oito e doze anos (Figuras 14 a 19).

Na comparação dos tratamentos de plantio direto com revolvimento do solo a cada quatro anos e preparo convencional, houve semelhança nos valores de pH e necessidade de calcário (Figuras 14 e 16), já, os valores de CTC efetiva e Ca e Mg trocáveis foram maiores (Figuras 17, 18 e 19) e os de alumínio trocável menores (Figura 15) no sistema plantio direto. A matéria orgânica (Figura 7) e o calcário incorporado a cada quatro anos devem estar contribuindo para o aumento da CTC efetiva e Ca e Mg trocáveis e para a diminuição do alumínio. O menor teor de alumínio no sistema plantio direto de quatro anos pode ser devido à complexação do alumínio por ácidos fúlvicos da matéria orgânica ou ácidos orgânicos de baixo peso molecular da decomposição dos resíduos das culturas (Miyazawa et al., 1992 e Salet, 1994).

Nos tratamentos de plantio direto oito e doze anos, houve formação de gradiente linear para a maioria dos atributos químicos, diferentemente do gradiente verificado doze meses após as aplicações anteriores de calcário (Cassol, 1995; Amaral, 1998). A CTC efetiva (Figura 17), Ca e Mg trocáveis (Figuras 18 e 19) e carbono orgânico (Figura 7) apresentaram gradiente decrescente, enquanto que o alumínio trocável apresentou gradiente crescente (Figura 15). Para pH e necessidade de calcário não houve gradiente (Figuras 14 e 16).

O sistema plantio direto por oito anos apresentou maiores valores de pH (Figura 14) e menores de alumínio trocável (Figura 15) e necessidade de calcário (Figura 16), em relação ao plantio direto por doze anos. Para CTC efetiva (Figura 17) e Ca e Mg trocáveis (Figuras 18 e 19), houve tendência de aumento no plantio direto de oito anos, que não chegou a ser significativa ( $P>0,05$ ). Para o carbono orgânico (Figura 7), também, não houve diferença ( $P>0,05$ ) em relação ao plantio direto de doze anos.

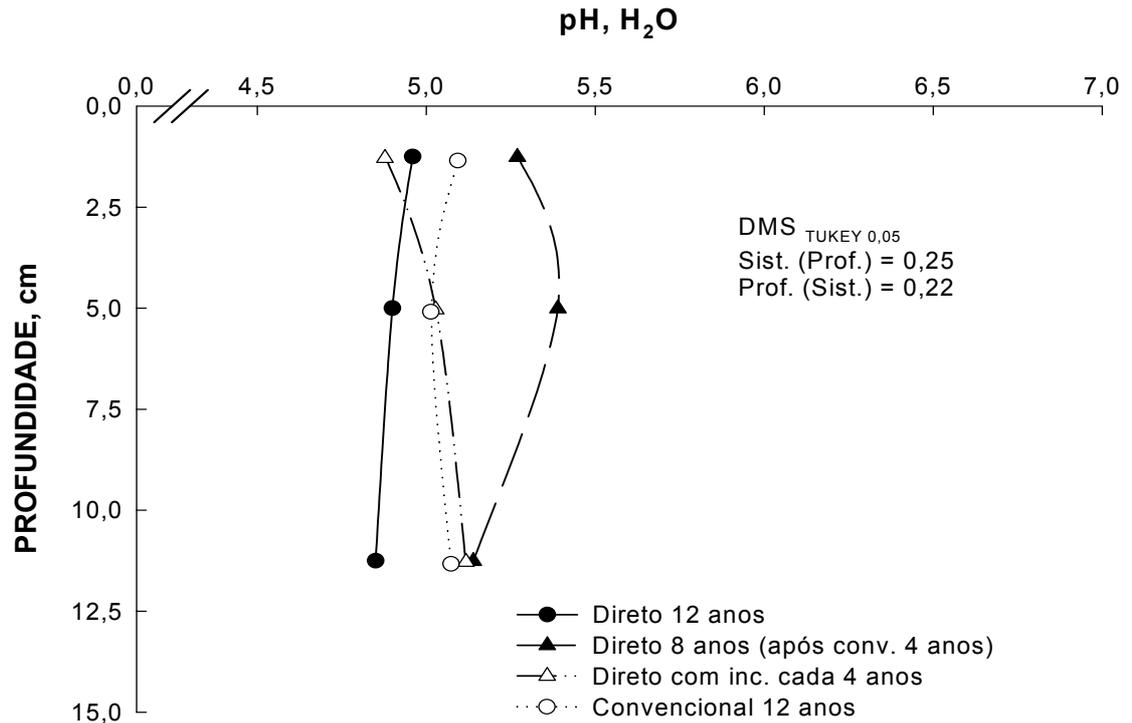


FIGURA 14. pH em H<sub>2</sub>O em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.

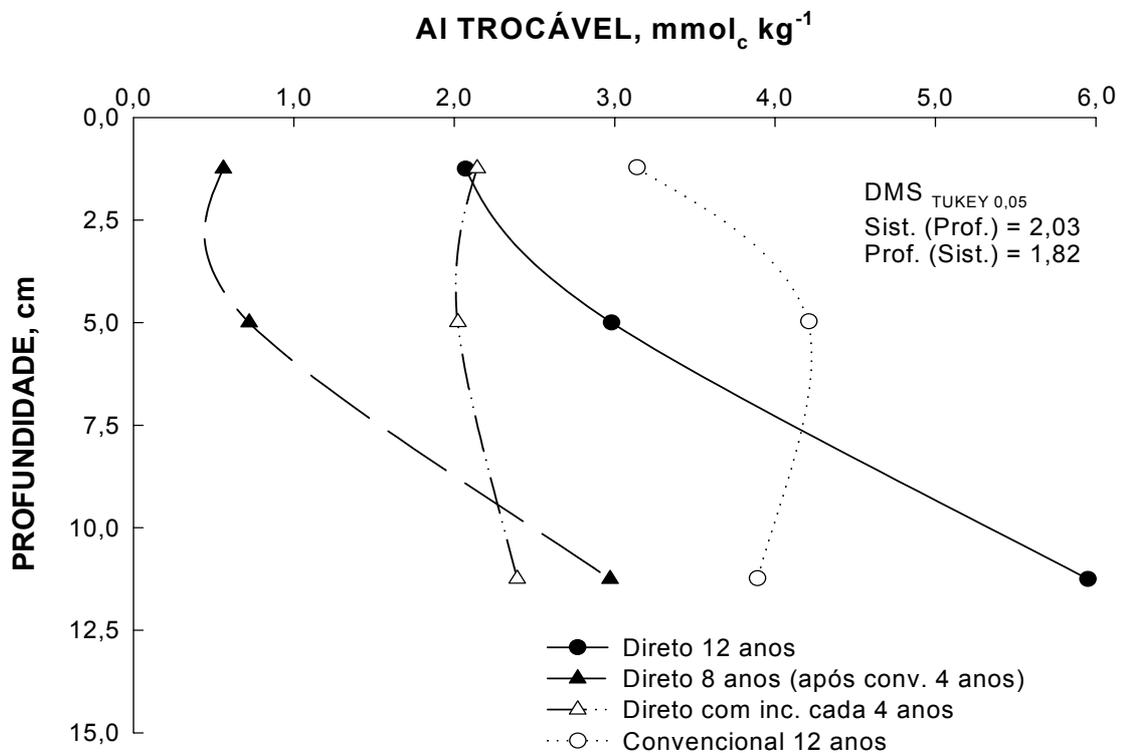


FIGURA 15. Alumínio trocável do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.

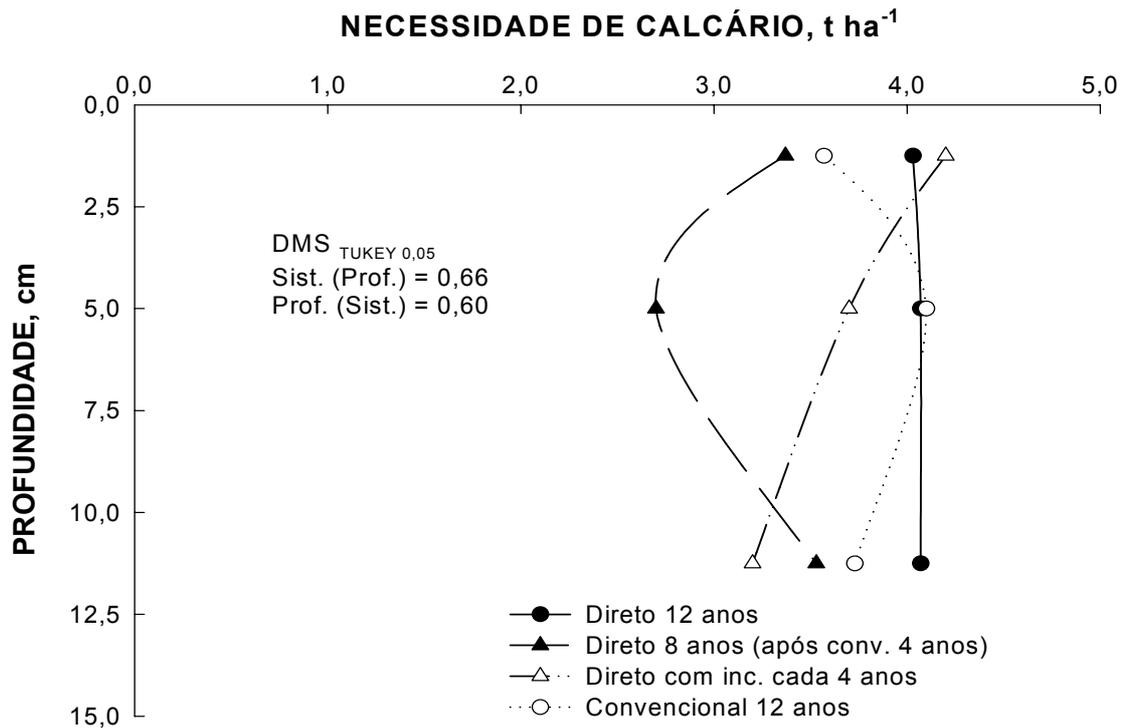


FIGURA 16. Necessidade de calcário (para elevar o pH em H<sub>2</sub>O a 6,0) em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.

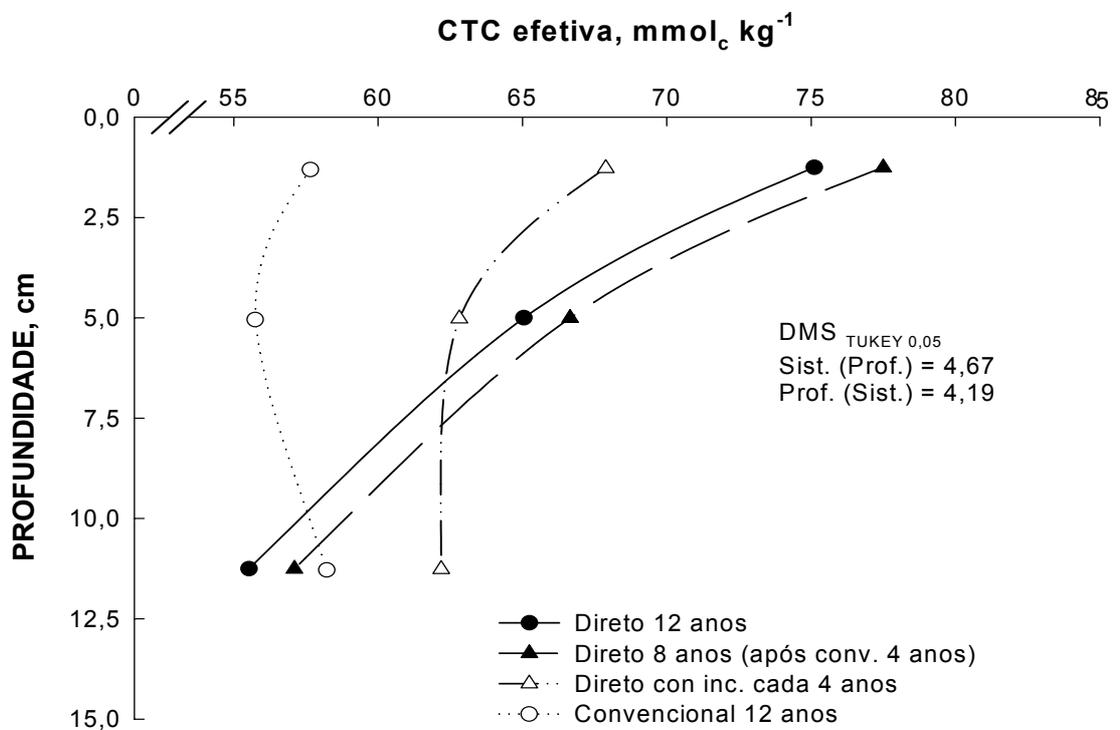


FIGURA 17. CTC efetiva do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.

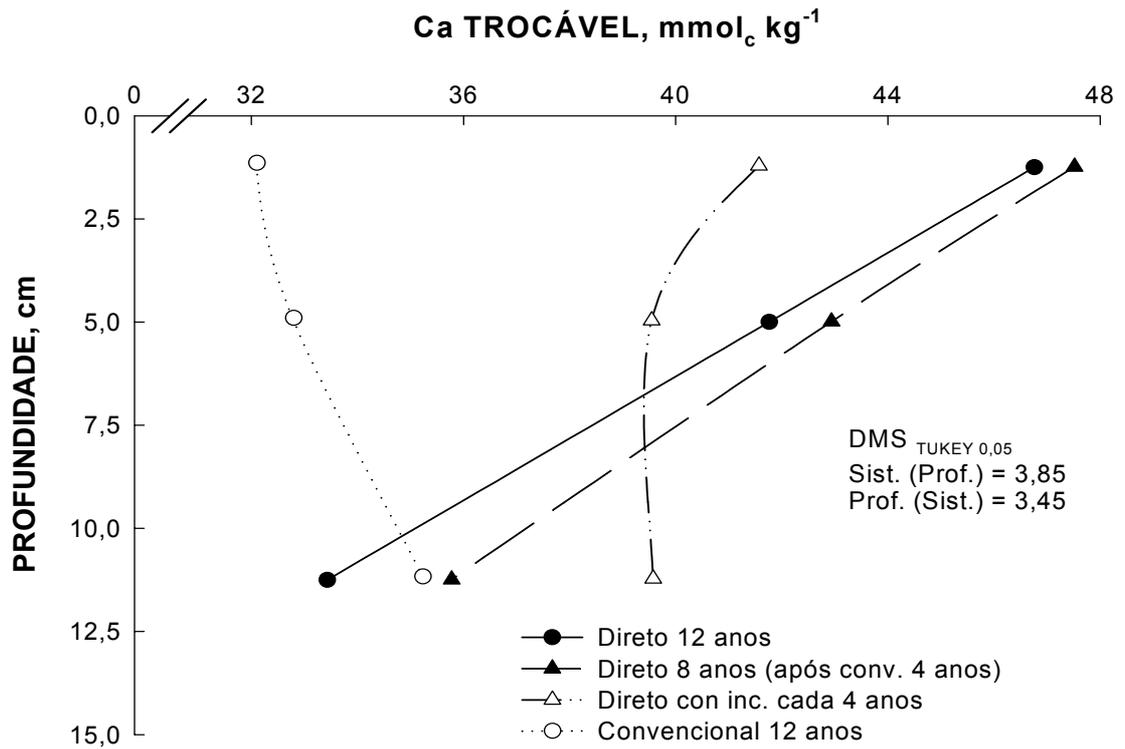


FIGURA 18. Cálcio trocável do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.

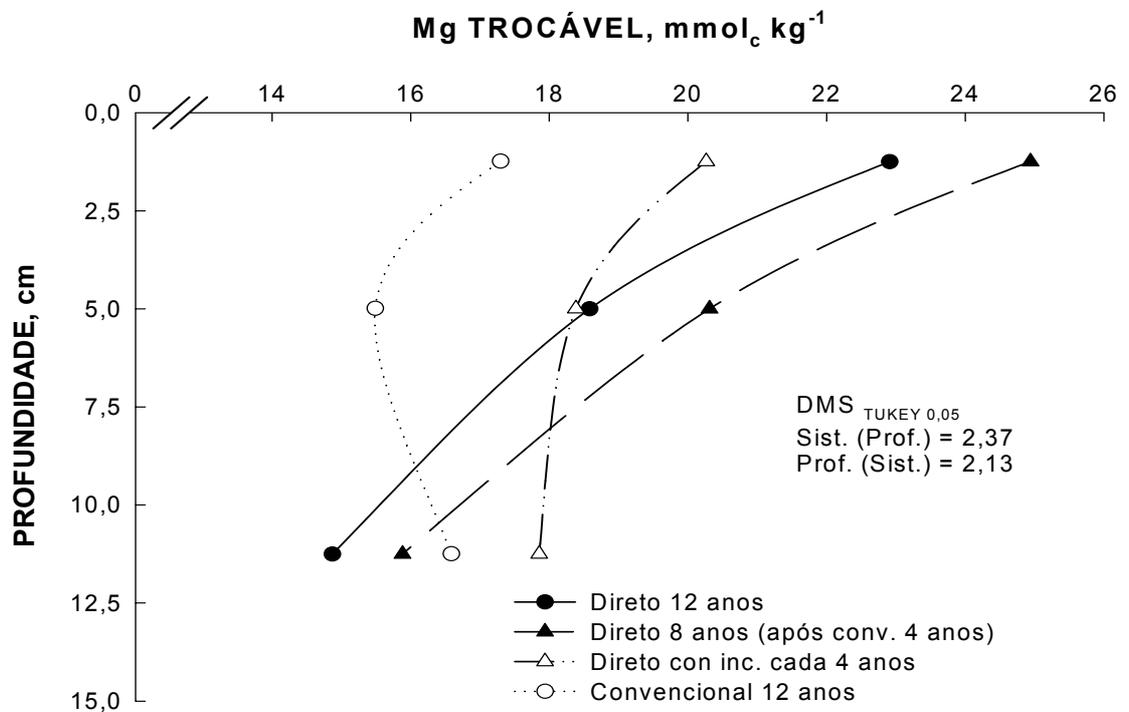


FIGURA 19. Magnésio trocável do solo em diferentes sistemas de manejo e profundidades, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.

A falta de gradiente no pH, em profundidade, no sistema plantio direto contínuo indica que está havendo uma correção eficiente da acidez a partir da superfície para o interior do solo, concordando, assim, com vários outros autores (Sidiras & Pavan, 1985; Oliveira & Pavan, 1994; 1996; Amaral, 1998; Pöttker & Ben, 1998a; b; Caires et al., 1998; 1999; 2000; Petreire & Anghinoni, 2001).

Para o alumínio trocável, o comportamento, de maneira geral, e como se esperava, foi inverso ao do pH do solo. Os valores evidenciam uma diminuição do alumínio trocável em relação à avaliação feita há quatro anos por Amaral (1998), antes da segunda reaplicação de calcário. Naquela ocasião, o alumínio trocável na camada de 7,5-15,0 cm, do sistema plantio direto de oito anos, era  $7,28 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$ , e agora, passados quatro anos, o valor máximo alcançado não chegou a  $6,00 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$  (Figura 15). Na comparação com o plantio direto de oito anos na mesma camada, o alumínio trocável foi mais baixo, não chegou a  $3,00 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$  (Figura 15). Esses resultados confirmam a eficiência da correção da acidez em profundidade, demonstrando o efeito progressivo da correção da acidez em sucessivas aplicações superficiais de calcário com diminuição dos teores de alumínio trocável até 15 cm.

Os maiores valores de CTC efetiva na camada superficial nos tratamentos de plantio direto contínuo (8 e 12 anos) devem-se ao não revolvimento do solo, que propicia o acúmulo de resíduos vegetais, adubos e corretivos naquela camada (Cassol, 1995; Bissani, 1997). No sistema com revolvimento do solo, os resíduos vegetais adubos e corretivos são incorporados, homogeneizando a camada revolvida.

Maiores teores de cálcio e magnésio trocáveis nas camadas superficiais em sistemas sob plantio direto quando comparadas ao preparo convencional também foram observados por Hargrove et al. (1982) e Edwards et al. (1992). Os maiores valores de CTC efetiva na camada superficial do sistema plantio direto, e os maiores teores de cálcio e magnésio trocáveis podem estar associados ao maior teor de matéria orgânica (Burle, 1995 e Bayer & Mielniczuk, 1997), uma vez que a fração orgânica é a principal responsável pela CTC efetiva, devido à sua alta densidade de cargas, predominantemente, dependente de pH.

De maneira geral, apesar dos gradientes, na média das profundidades, os sistemas com plantio direto por quatro, oito e doze anos apresentaram valores de CTC efetiva e Ca e Mg trocáveis semelhantes entre si, porém maiores que o preparo convencional. No plantio direto oito anos, o pH foi maior que os demais sistemas de manejo. A necessidade de calcário teve comportamento inverso ao pH do solo, podendo ser considerada baixa para todos os tratamentos, uma vez que, a maior necessidade foi de aproximadamente quatro toneladas por hectare.

Na avaliação conjunta dos atributos químicos, o preparo convencional apresentou a situação menos desejável de acidez na camada de 0-15 cm, com valores médios de pH = 5,1, alumínio = 3,7 mmol<sub>c</sub>kg<sup>-1</sup>, CTC efetiva = 57,3 mmol<sub>c</sub>kg<sup>-1</sup>, cálcio = 33,3 mmol<sub>c</sub>kg<sup>-1</sup> e magnésio = 16,4 mmol<sub>c</sub>kg<sup>-1</sup>. Por outro lado, a melhor situação foi verificada para o sistema plantio direto oito anos com pH = 5,3, alumínio = 1,4 mmol<sub>c</sub>kg<sup>-1</sup>, CTC efetiva = 67,1 mmol<sub>c</sub>kg<sup>-1</sup>, cálcio = 42,1 mmol<sub>c</sub>kg<sup>-1</sup> e magnésio = 20,4 mmol<sub>c</sub>kg<sup>-1</sup>.

Os resultados indicam, também, que não há evidências da formação de uma frente de acidificação no sistema plantio direto, pois a aplicação de calcário a cada quatro anos deve estar sendo suficiente para impedir a sua formação.

#### **4.2.2. Após a terceira reaplicação de calcário**

Os resultados referem-se às amostragens efetuadas imediatamente antes da terceira reaplicação de calcário e doze meses após a essa aplicação, resultando nos tratamentos discutidos no item 4.1.2.

A aplicação de 4,1 t ha<sup>-1</sup> de calcário determinou mudanças nos atributos químicos do solo, determinando, em geral, aumento dos valores de pH, CTC efetiva e Ca e Mg trocáveis e diminuição do teor de alumínio trocável e da necessidade de calcário (Figuras 20 a 25).

Nos tratamentos com incorporação do calcário ao solo houve efeito em toda a camada mobilizada e os valores dos atributos químicos foram uniformes, sem ocorrência de gradientes (Figuras 20ab a 25ab).

A aplicação superficial do calcário determinou a formação de gradientes acentuados nos atributos químicos a partir da superfície do solo (Figuras 20cd a 25cd). Esses resultados foram semelhantes aos obtidos por

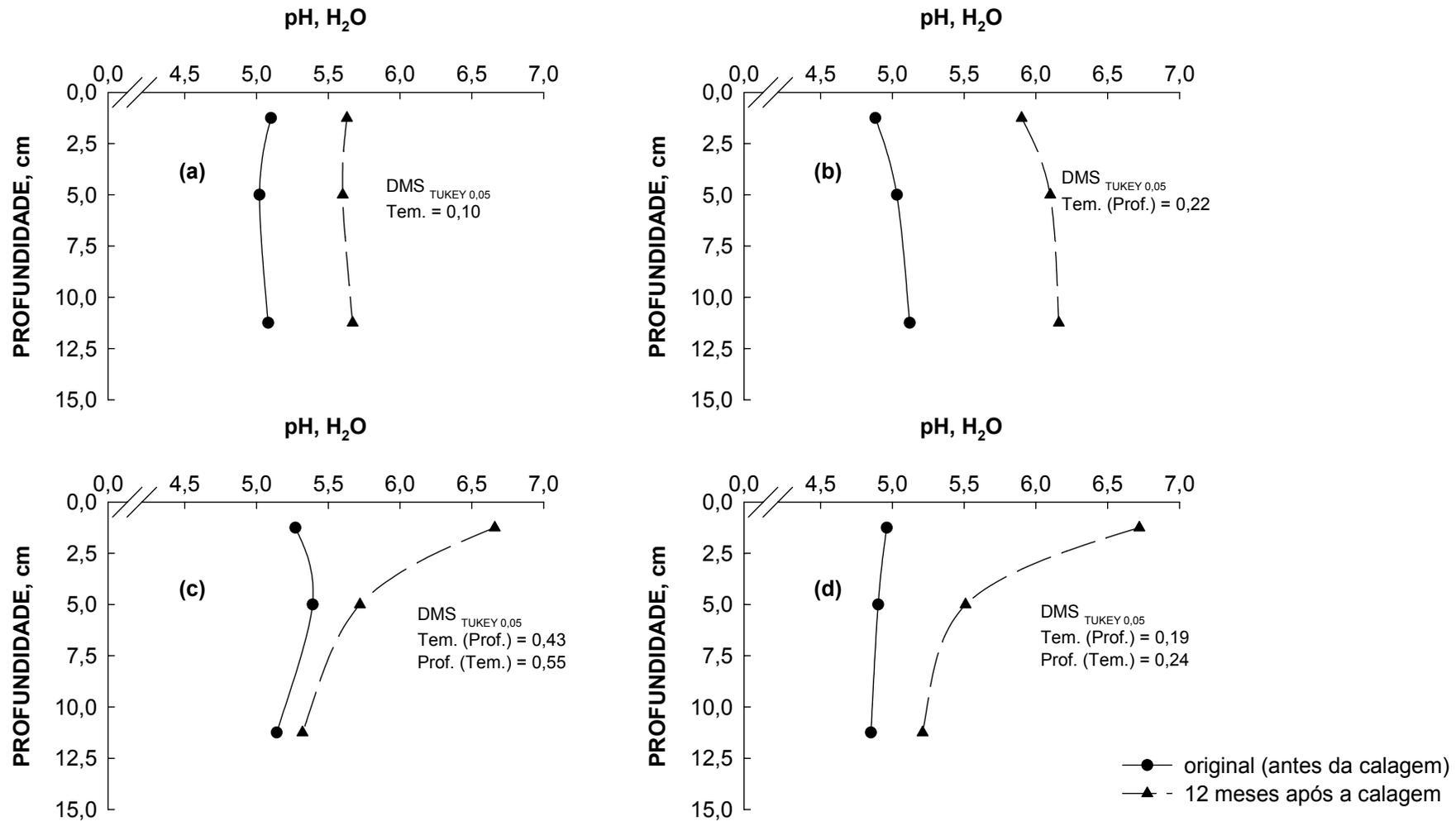


FIGURA 20. pH em H<sub>2</sub>O em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo. a) Convencional 12 anos; b) Direto incorporado cada 4 anos; c) Direto 8 anos; d) Direto 12 anos.

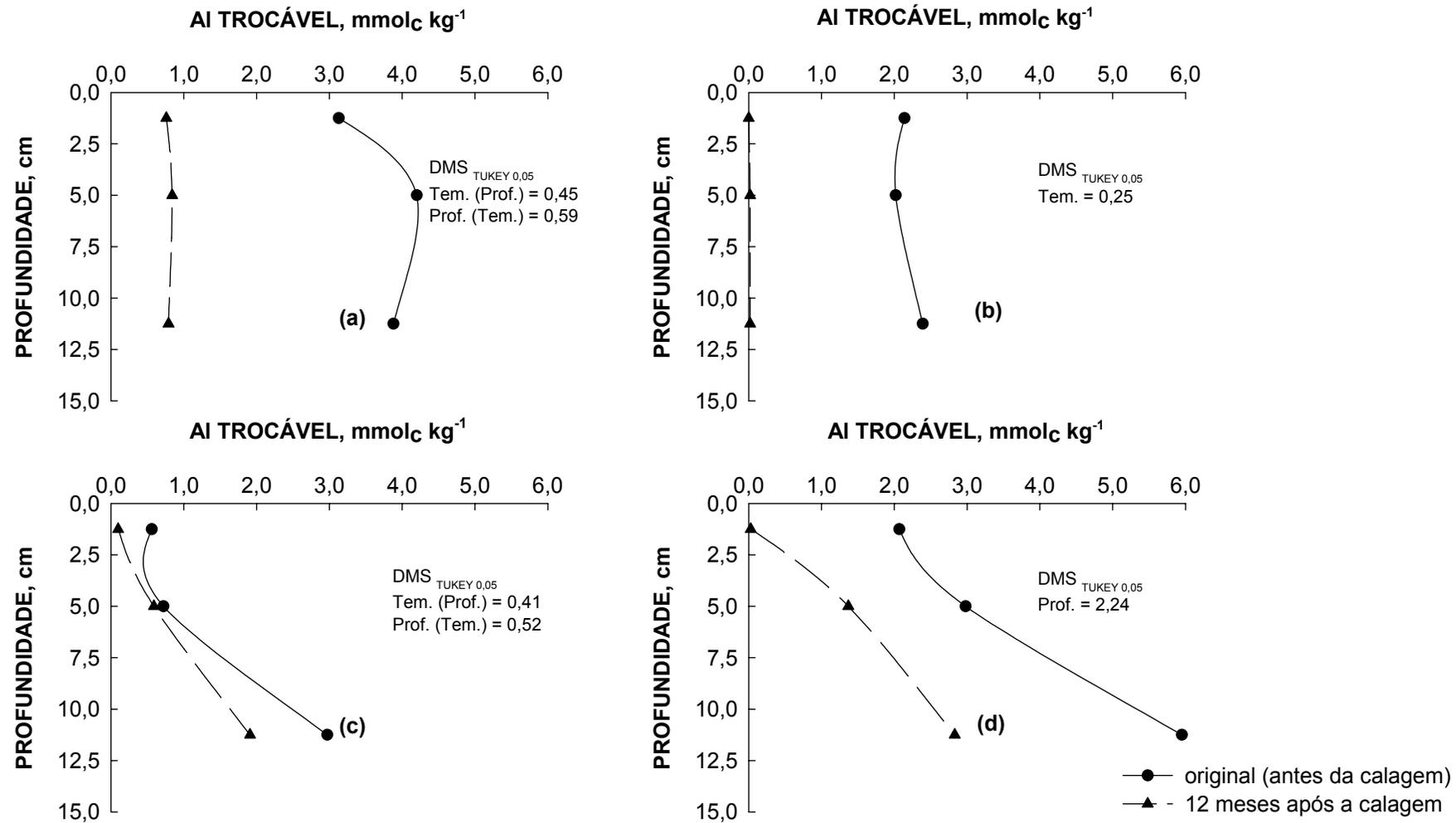


FIGURA 21. Alumínio trocável do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo. a) Convencional 12 anos; b) Direto incorporado cada 4 anos; c) Direto 8 anos; d) Direto 12 anos.

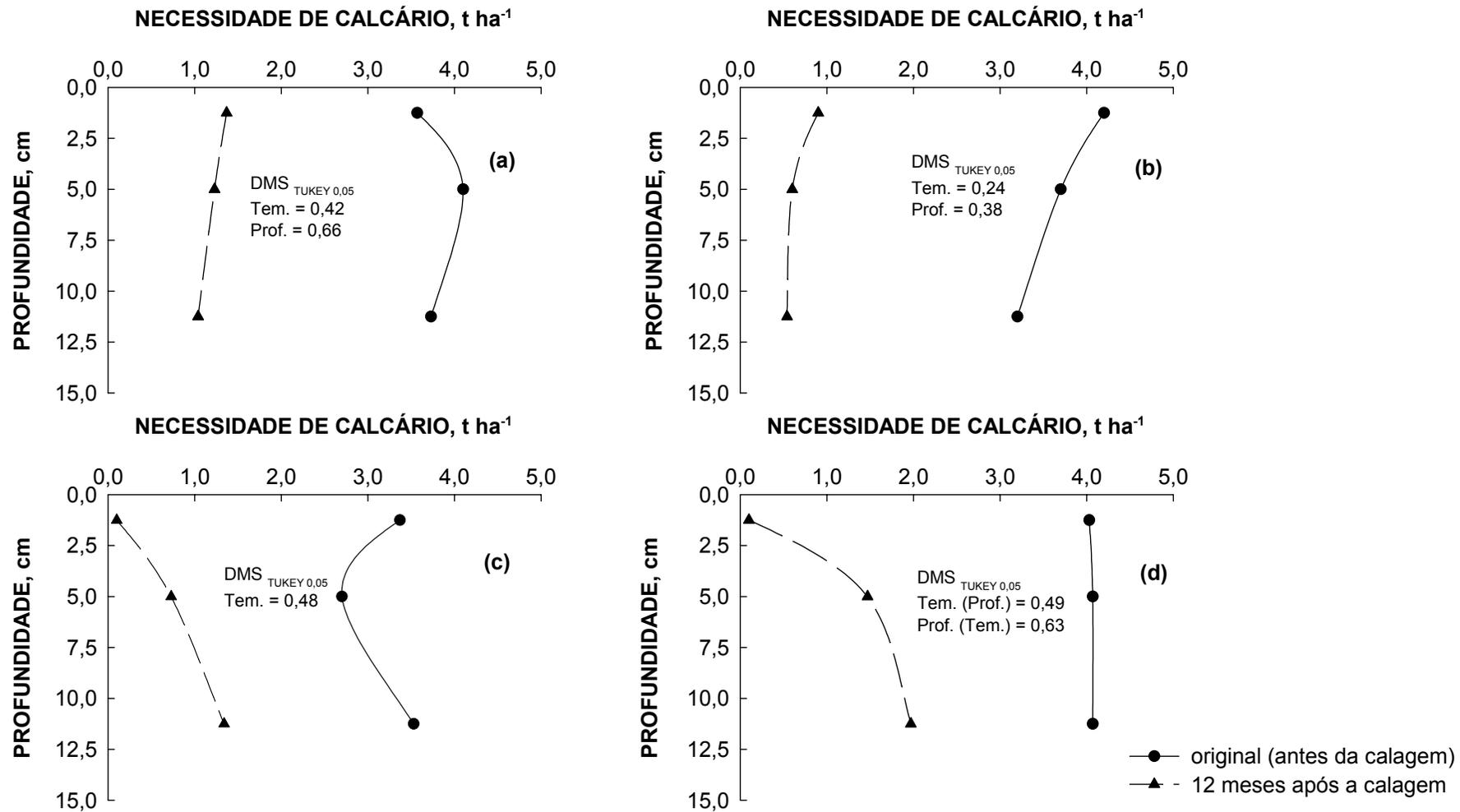


FIGURA 22. Necessidade de calcário (para elevar o pH em H<sub>2</sub>O a 6,0) em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo. a) Convencional 12 anos; b) Direto incorporado cada 4 anos; c) Direto 8 anos; d) Direto 12 anos.

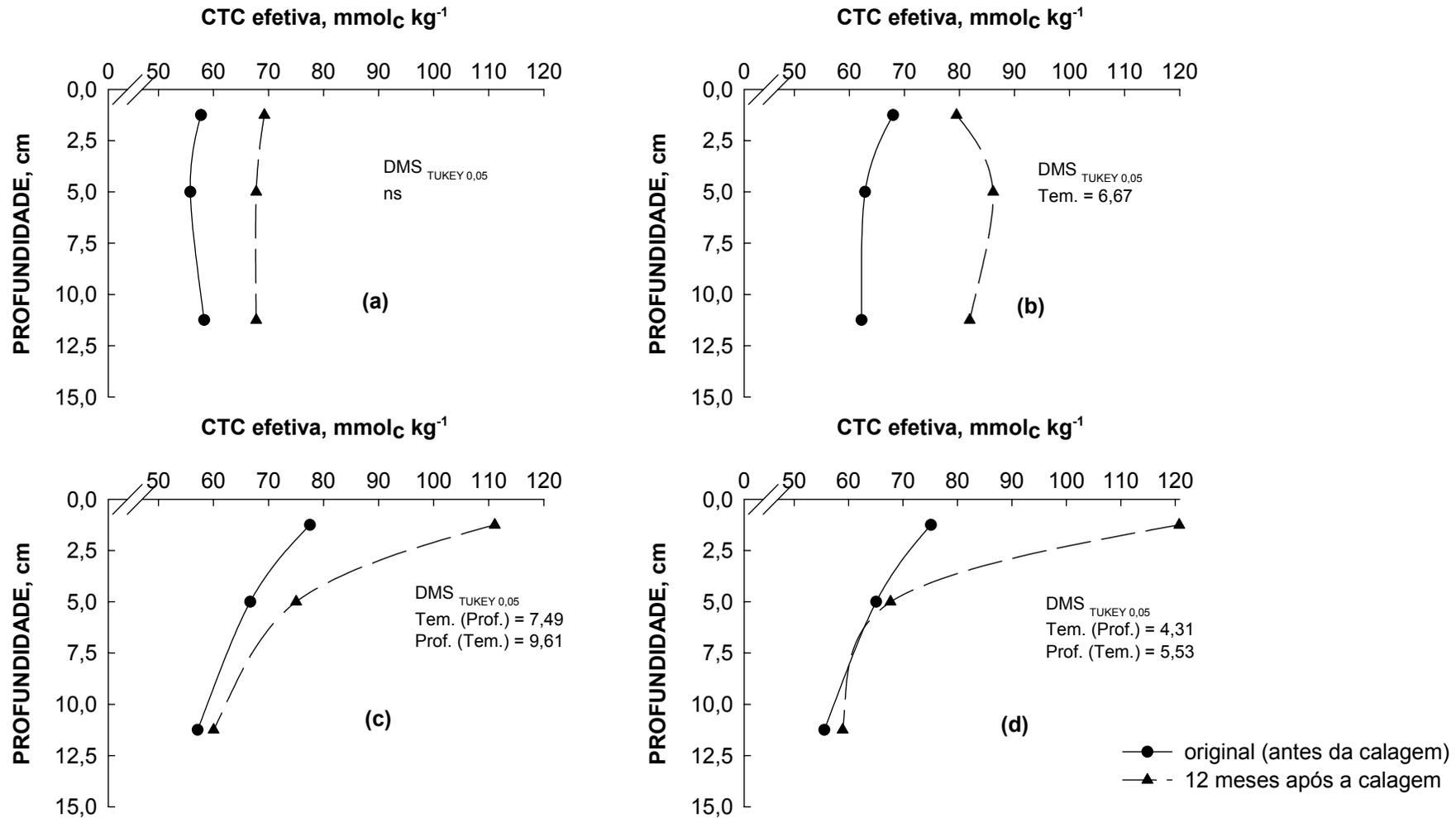


FIGURA 23. CTC efetiva do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo. a) Convencional 12 anos; b) Direto incorporado cada 4 anos; c) Direto 8 anos; d) Direto 12 anos.

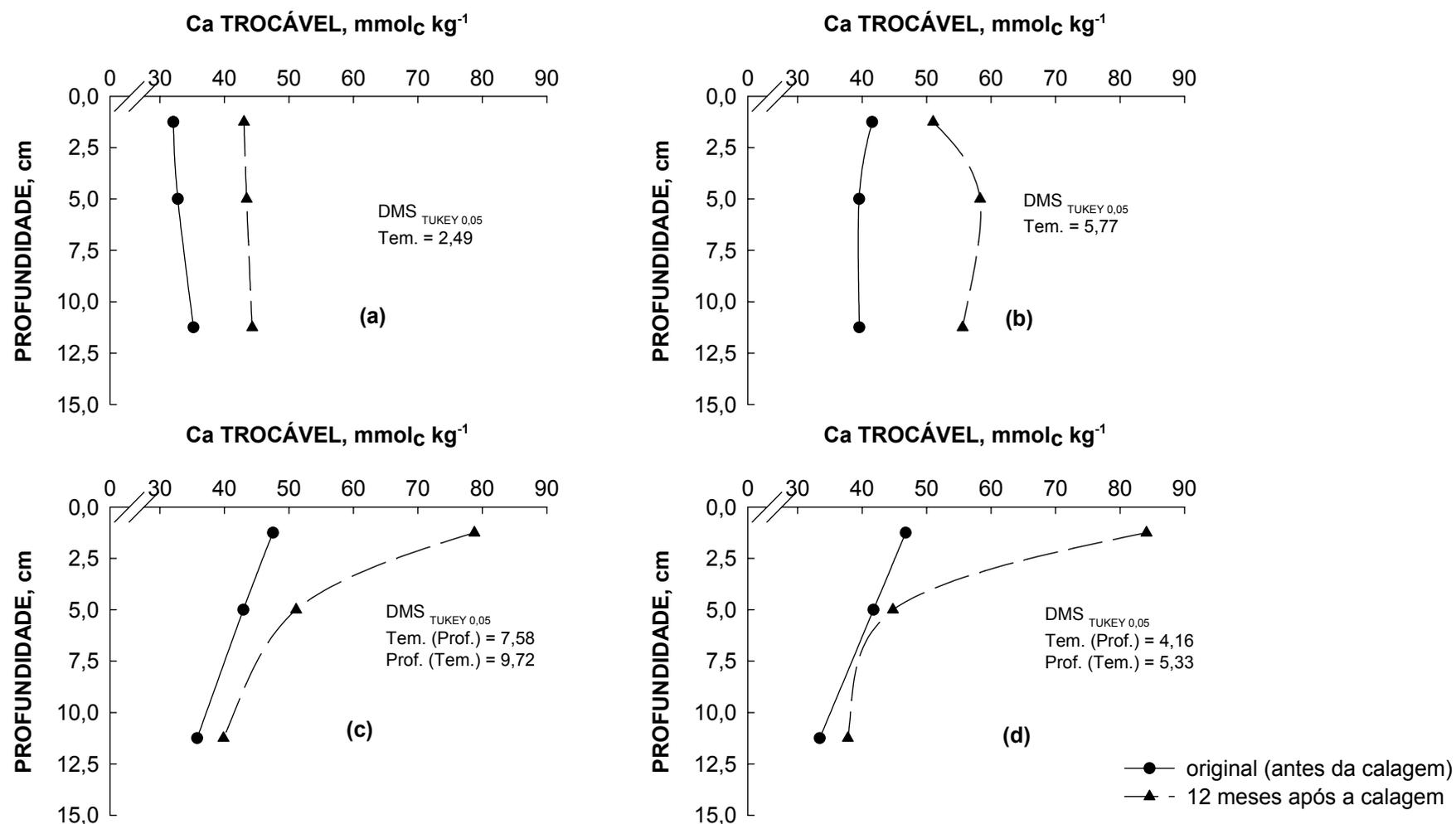


FIGURA 24. Cálcio trocável do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo. a) Convencional 12 anos; b) Direto incorporado cada 4 anos; c) Direto 8 anos; d) Direto 12 anos.

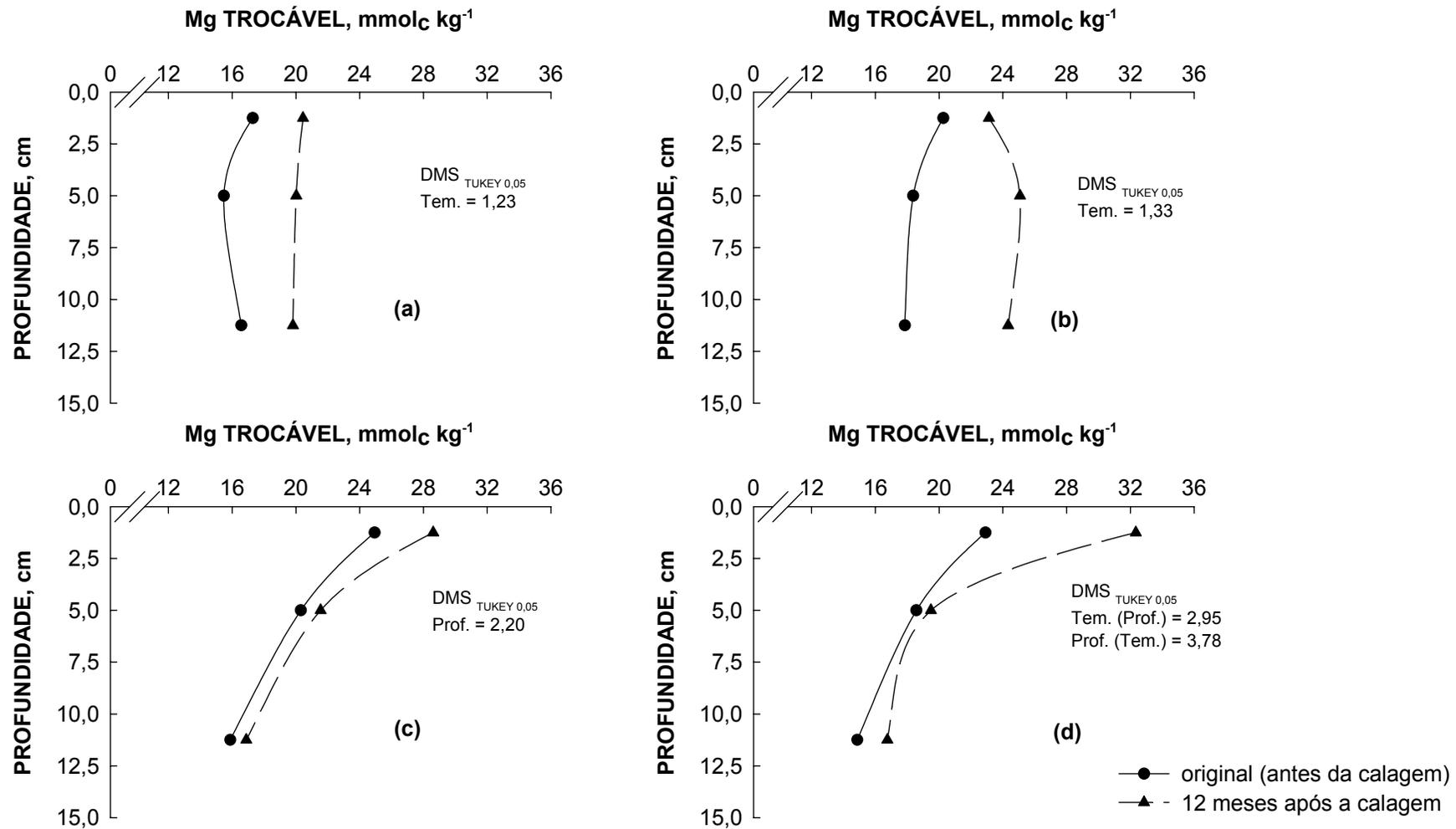


FIGURA 25. Magnésio trocável do solo em diferentes épocas de avaliação, profundidades e sistemas de manejo. a) Convencional 12 anos; b) Direto incorporado cada 4 anos; c) Direto 8 anos; d) Direto 12 anos.

Petrere & Anghinoni (2001). O efeito na camada superficial do solo é maior quando o calcário é aplicado na superfície, porque a incorporação o dilui em uma camada mais espessa de solo (Moreira et al., 2001).

No sistema plantio direto por doze anos ocorreu aumento de pH em toda a camada (0-15 cm) e no plantio direto por oito anos houve a mesma tendência, porém não resultou em diferença (Figuras 20c e 20d). Caires et al. (1998) também observaram aumento do pH até a profundidade de 10 cm doze meses após a aplicação superficial de calcário.

Para o alumínio trocável, observa-se, de maneira geral, efeito inverso ao do pH do solo. Assim, na média das profundidades, os maiores valores de alumínio trocável foram encontrados na camada de 7,5-15,0 cm, que se justificam devido às sucessivas aplicações superficiais de calcário (Figuras 21c e 21d).

Deve se salientar que, no sistema plantio direto com revolvimento do solo a cada quatro anos, os teores de alumínio trocável após a calagem foram praticamente nulos (Figura 21b). A matéria orgânica e o calcário incorporados devem estar contribuindo para a diminuição do alumínio trocável em profundidade, através de sua precipitação como  $\text{Al}(\text{OH})_3$  e da adsorção específica com a matéria orgânica (Salet, 1994; 1998).

Os valores de CTC efetiva foram semelhantes aos obtidos anteriormente por Amaral (1998) no mesmo experimento. Assim, os sistemas de manejo sob plantio direto contínuo apresentaram formação de gradientes de concentração a partir da superfície do solo e os sistemas com revolvimento do solo apresentaram-se homogêneos em toda a camada revolvida. Um revolvimento do solo foi suficiente para eliminar o gradiente formado ao longo dos quatro anos.

Os maiores valores de CTC efetiva na camada superior do solo cultivado sob sistema plantio direto após a calagem, deveram-se aos aumentos dos teores de cálcio e magnésio trocáveis. Aumentos nos teores de cálcio e magnésio trocáveis nas camadas superficiais de solos cultivados em sistema plantio direto devidos a calagem superficial têm sido freqüentemente encontrados (Sá, 1996; Oliveira & Pavan, 1996; Caires et al., 1998).

Em geral, independentemente do sistema de manejo, a calagem aumentou o pH, os teores de cálcio e magnésio trocáveis e,

consequentemente, a CTC efetiva, diminuindo o teor de alumínio trocável e a necessidade de calcário. No sistema plantio direto contínuo os efeitos ocorrem, principalmente, na camada superficial, enquanto que, nos sistemas com revolvimento do solo há maior uniformidade na ação corretiva da acidez. Para Pöttker & Ben (1998b), a aplicação de calcário, sem incorporação ao solo, no sistema plantio direto, influencia principalmente as características químicas da camada de 0-5 cm e, em menor grau, da camada de 5-10 cm.

A aplicação superficial do calcário no sistema plantio direto (8 e 12 anos) teve efeito mais pronunciado na média da camada de 0-15 cm, no pH, alumínio trocável e necessidade de calcário do que na CTC efetiva e no cálcio e magnésio trocáveis. O efeito em profundidade pode ter ocorrido pela formação de compostos orgânicos de baixo peso molecular, liberados pela decomposição de resíduos na superfície que atuam como ligantes, complexando o alumínio (Oliveira et al., 1996). A decomposição dos resíduos culturais origina compostos orgânicos hidrossolúveis que, além de favorecerem a descida dos cátions básicos divalentes (Pavan, 1997), complexam cátions de reação ácida ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  e  $\text{Al}^{3+}$ ) na solução do solo, liberando ânions ( $\text{OH}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$ ) que neutralizam o alumínio e aumentam o pH. Deve-se salientar, ainda, que compostos orgânicos com alto poder ligante, como os ácidos fúlvicos, podem complexar o alumínio do solo, inclusive, com maior eficiência do que os compostos orgânicos hidrossolúveis (Salet, 1998).

#### **4.3. Rendimento de culturas pelo manejo do solo em reaplicações sucessivas de calcário**

O rendimento de matéria seca de milho quatro anos após a reaplicação de calcário (safra 1999/00) não foi afetado pelo manejo da calagem nos métodos de preparo do solo (Tabela 1). É possível verificar uma tendência positiva no crescimento do milho para o tratamento plantio direto com revolvimento do solo a cada quatro anos, provavelmente, devido a ação do calcário em uma camada maior do solo e a incorporação dos resíduos orgânicos, aumentando a atividade biológica e a liberação de nutrientes. Entretanto, essa tendência não se manifestou no rendimento de grãos (Tabela 1), repetindo os dados obtidos anteriormente no mesmo experimento (Cassol, 1995; Amaral, 1998).

TABELA 1. Rendimento de milho e de uma mistura forrageira quatro anos após a segunda reaplicação de calcário em diferentes sistemas de manejo. EEA/UFRGS – safra 1999/2000.

Sistema de manejo	Milho		Aveia+ervilhaca
	Matéria seca	Grãos	Matéria seca
	..... t ha <sup>-1</sup> .....		
Direto 12 anos	10,01	8,51	5,47
Direto 8 anos (após conv. 4 anos)	10,36	7,64	5,32
Direto com incorp. cada 4 anos	12,21	8,99	5,26
Convencional 12 anos	10,12	8,96	5,44

\* Não significativo (P<0,05).

À semelhança do observado para o rendimento de matéria seca e de grãos de milho, o rendimento de matéria seca de aveia + ervilhaca não apresentou efeito dos sistemas de manejo (Tabela 1). O objetivo do cultivo dessas culturas é de manter e fornecer material para cobertura do solo, além de avaliar o efeito residual dos tratamentos. Todos os tratamentos forneceram boa quantidade de matéria seca para cobertura do solo.

O comportamento do rendimento de culturas após a terceira reaplicação de calcário mostrou-se bastante semelhante ao encontrado antes da reaplicação (Tabela 2), inclusive a tendência positiva para o tratamento plantio direto com revolvimento do solo a cada quatro anos, com relação ao rendimento de matéria seca de milho. Assim, pode-se afirmar que, não houve fatores que limitassem o desenvolvimento das culturas, independentemente do tratamento aplicado.

TABELA 2. Rendimento de milho e de uma mistura forrageira após a terceira reaplicação de calcário em diferentes sistemas de manejo. EEA/UFRGS – safra 2000/2001.

Sistema de manejo	Milho		Aveia+ervilhaca
	Matéria seca	Grãos	Matéria seca
	..... t ha <sup>-1</sup> .....		
Direto 12 anos	9,32	7,38	4,56
Direto 8 anos (após conv. 4 anos)	8,61	7,48	4,69
Direto com incorp. cada 4 anos	10,15	7,34	4,90
Convencional 12 anos	8,77	7,38	4,34

\* Não significativo (P<0,05).

Apesar das diferenças nos atributos físicos (item 4.1) e químicos (item 4.2) no perfil do solo, determinada pelo revolvimento ou não do solo, nas reaplicações de calcário, os rendimentos encontrados foram elevados e semelhantes entre os sistemas de manejo.

A falta de diferença para os diferentes manejos da calagem nos sistemas de manejo pode ser relacionada às boas condições químicas e físicas do solo e à provável falta de resposta à própria aplicação de calcário, evidenciada pela produção anterior à aplicação de calcário que apresentou rendimentos elevados (Tabela 1), indicando que não havia limitações químicas.

Os valores baixos de macroporosidade ( $< 0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), principalmente, no sistema sob plantio direto (Figuras 4 e 10), também não interferiram no crescimento das plantas. Assim, possivelmente, a baixa macroporosidade deve-se à própria condição original de campo nativo e, principalmente, à textura deste solo que, segundo Barnes et al. (1971), é das mais propícias ao “empacotamento” do solo.

De maneira geral, é possível afirmar que os bons rendimentos devem-se à ausência de limitações ao desenvolvimento das plantas, independentemente do sistema de manejo utilizado. As boas condições encontradas pelos atributos físicos e químicos do solo e as condições ambientais favoráveis, inclusive com suplementações d'água quando necessário, nivelaram os tratamentos, propiciando rendimentos semelhantes e adequados.

## 5. CONCLUSÕES

O uso do solo no sistema plantio direto por um período de quatro anos após o revolvimento foi suficiente para o retorno dos atributos físicos do solo à condição original, uma vez que os mesmos não se diferenciaram dos do sistema plantio direto de oito e doze anos.

O revolvimento do solo para a incorporação do calcário no sistema plantio direto de quatro anos, propiciou condições mais favoráveis de densidade e porosidade do solo, mas diminuiu a estabilidade de agregados que não retornou à condição original após doze meses.

Os atributos físicos apresentaram maior uniformidade no preparo convencional, com tendência de melhoria na porosidade, porém com menor estabilidade de agregados na camada superficial, que foi relacionada ao teor de carbono orgânico.

O preparo convencional propiciou a situação menos desejável para os atributos químicos do solo, na camada 0-15 cm, em relação ao sistema de plantio direto (quatro, oito e doze anos).

O efeito nos atributos químicos, em profundidade, da aplicação superficial de calcário no sistema plantio direto consolidado (oito e doze anos) foi rápido, atingindo a profundidade de 15 cm em doze meses. O revolvimento do solo após quatro anos de plantio direto uniformizou os atributos químicos do solo na camada revolvida e apresentou uma condição mais favorável do que a do preparo convencional.

As diferenças nos atributos físicos e químicos do solo decorrentes do revolvimento ou não do solo nos diferentes sistemas de manejo do solo não foram suficientes para afetar a produtividade de milho e da mistura aveia + ervilhaca.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J.A. **Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-amarelo**. Porto Alegre, 1993. 100f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

ALBUQUERQUE, J.A. **Suscetibilidade de alguns solos do Rio Grande do Sul à erosão em entressulcos**. Porto Alegre, 1998. 154f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

ALLISON, F.E. Soil aggregation-some facts and fallacies as seen by a microbiologist. **Soil Science**, Baltimore, v.106, p.136-143, 1968.

ALVARENGA, R.C.; COSTA, L.M.; MOURA FILHO, W.; REGAZZI, A.J. Crescimento das raízes de leguminosas em camadas de solo compactadas artificialmente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.319-326, 1996.

AMARAL, A.S. **Reaplicação de calcário no sistema plantio direto consolidado**. Porto Alegre, 1998. 102f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Ed.) **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141. (SSSA Special Publication, 49).

BARNES, K.X.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.T.; VANDEN BERG, G.E. **Compaction of agricultural soils**. Saint Joseph: ASAE, 1971. 471p.

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

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.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; MASSARIOL, J.M.; DOS REIS, E.F.; DILY, L. Propriedades físicas de um cambissolo húmico álico afetadas pelo manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, p.91-95, 2000.

BICKI, T.J.; SIEMENS, J.C. Crop response to wheel traffic soil compaction. **Transaction of the American Society of Agricultural Engineering**, Saint Joseph, v.34, p.909-913, 1991.

BISSANI, C. **Redução dos efeitos da acidez do solo pela aplicação de carbonato e sulfato de cálcio em superfície**. Porto Alegre, 1997. 107f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

BLAKE, G.R. Bulk density. In: BLACK, C.A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. v.1, p.374-390,.

BLEVINS, R.L.; MURDOCK, L.W.; THOMAS, G.W. Effect of lime application on no-tillage and conventionally tilled corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.70, p.322-326, 1978.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7.ed. São Paulo: Freitas Bastos, 1989. 878p.

BURLE, C. **Efeito de sistemas de cultura em características químicas do solo**. Porto Alegre, 1995. 105f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

CAIRES, E.F.; CHUEIRI, W.A.; MADRUGA, E.F.; FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.27-34, 1998.

CAIRES, E.F.; FONSECA, A.F.; MENDES, J.; CHUEIRI, W.A.; MADRUGA, E.F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.315-327, 1999.

CAIRES, E.F.; BANZATTO, D.A.; FONSECA, A.F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.161-169, 2000.

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um latossolo vermelho-escuro distrófico após sete

anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.9, p.121-126, 1995.

CARPENEDO, V.; MIELNICZUK, J. Estado de agregação e qualidade de agregados de Latossolos Roxos, submetidos à diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.14, p.99-105, 1990.

CASSOL, L.C. **Características físicas e químicas do solo e rendimento de culturas após a reaplicação de calcário, com e sem incorporação, em sistemas de preparo**. Porto Alegre, 1995. 97f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.527-538, 1998.

CHAVES, J.C.D.; PAVAN, M.A.; IGUE, K. Resposta do cafeeiro à calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, p.573-582, 1984.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT / SBCS - Núcleo Regional Sul, 1987. 100p.

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

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Recomendações de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3.ed. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT / SBCS - Núcleo Regional Sul, 1995. 223p.

CULLEY, J.L.B.; LARSON, W.E.; RANDALL, G.W. Physical properties of a typic Haplaquoll under conventional and no-tillage. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.51, p.1587-1593, 1987.

DA ROS, C.O.; SECCO, D.; FIORIN, J.E.; PETRERE, C.; CADORE, M.A.; PASA, L. Manejo do solo a partir de campo nativo: efeito sobre a forma e estabilidade da estrutura ao final de cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.1, p.241-247, 1997.

DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; DENARDIN, N.D. Calagem compacta o solo?-Fatos e hipóteses. In: SIMPÓSIO SOBRE ROTAÇÃO SOJA/MILHO NO PLANTIO DIRETO, 2., 2001, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: POTAFOS, 2001. 1 CD-ROM.

DEXTER, A.R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.11, p.199-238, 1988.

DEXTER, A.R. Amelioration of soil by natural processes. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.20, p.87-100, 1991.

EDWARDS, J.H.; WOOD, C.W.; THURLOW, D.L.; RUF, M.E. Tillage and crop rotation effects on fertility status of a Hapludult soil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.56, p.1577-1582, 1992.

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

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412p.

FERNANDES, B.; GALLOWAY, H.M.; BRONSON, R.D.; MANNERING, J.V. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição de poros, em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludalf). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.7, p.329-333, 1983.

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., 1994, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBCS, 1994. p.196-197.

GOLDBERG, S. Interaction of aluminum and iron oxides and clay minerals and their effect on soil physical properties. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.20, p.1181-1207, 1989.

GONZALES-ERICO, E.; KAMPRATH, E.J.; NADERMAN, G.C.; SOARES, W.V. Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn on an Oxisol of Central Brasil. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.43, p.1155-1158, 1979.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials, and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.32, p.180-186, 1968.

GRANT, C.A.; LAFOND, G.P. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on a clay soil in Southern Saskatchewan. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.73, p.223-232, 1993.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, London, v.6, p.65-100, 1987.

GUPTA, S.C.; SHARMA, P.P.; DeFRANCHI, S.A. Compaction effects on soil structure. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.42, p.311-338, 1989.

GUPTA, V.V.S.R.; GERMIDA, J.J. Distribution of microbial biomass and its activity in different soil aggregate size classes as affected by cultivation. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v.20, p.777-786, 1988.

HARGROVE, W.L.; REID, J.T.; TOUCHTON, J.T.; GALLAHER, R.N. Influence of tillage practices on the fertility status of an acid soil double-cropped to wheat and soybeans. **Agronomy Journal**, Madison, v.4, p.684-687, 1982.

HARRIS, R.F.; CHESTERS, G.; ALLEN, O.N. Dynamics of soil aggregation. **Advances in Agronomy**, New York, v.18, p.107-169, 1966.

HAYNES, R.J.; SWIFT, R.S. Stability of soil aggregates in relation to organic constituents and soil water content. **Journal of Soil Science**, London, v.41, p.73-83, 1990.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. 413p.

KAI, B.D. Rates of change of soil structure under different cropping systems. **Advances in Soil Science**, New York, v.12, p.1-41, 1990.

KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLAKE, C.A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. p.499-510.

KLEPKER, D. **Nutrientes e raízes no perfil e crescimento de milho e aveia em função do preparo do solo e modos de adubação**. Porto Alegre, 1991. 117f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

KIEHL, E.J. **Manual de Edafologia**. São Paulo: Ceres, 1979. 263p.

LEHRSCHE, G.A.; JOLLEY, P.M. Temporal changes in wet aggregate stability. **Transaction of the American Society of Agricultural Engineering**, Saint Joseph, v.35, p.493-498, 1992.

MARTIN, J.P.; MARTIN, W.P.; PAGE, J.B.; RANEY, W.A.; DE MENT, J.D. Soil aggregation. **Advances in Agronomy**, New York, v.7, p.1-37, 1955.

MENDEZ, M.A. **Estabilidade de agregados do solo afetada por sistemas de manejo**. Porto Alegre, 1996. 80f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

MIELNICZUK, J.; BURLE, M.L.; FERNANDES, S.V.; BAYER, C.; AMADO, T.J.C. Eficiência da aplicação de calcário em sistemas de culturas e preparos de solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995,

Viçosa. **Resumos expandidos...** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1995. p.1848-1850.

MIYAZAWA, M.; CHIERICE, G.O.; PAVAN, M.A. Amenização da toxicidade de alumínio às raízes do trigo pela complexação com ácidos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p.209-215, 1992.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; SANTOS, J.C.F. Effects of addition of crop residues on the leaching of Ca and Mg in Oxisols. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW pH, 4., Belo Horizonte, 1996. **Abstracts...** Sete Lagoas: SBCS/EMBRAPA-CPAC, 1996. p.8.

MODEL, N.S. **Rendimento de milho e aveia e propriedades do solo relacionadas ao modo de aplicação de fósforo e potássio e técnicas de preparo do solo.** Porto Alegre, 1990. 115f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1990.

MOLOPE, M.B.; GRIEVE, I.C.; PAGE, E.R. Contributions by fungi and bacteria to aggregate stability of cultivated soils. **Journal of Soil Science**, London, v.38, p.71-77, 1987.

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 de milho e soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.71-81, 2001.

MOSCHLER, W.W.; MARTENS, D.C.; RICH, C.I.; SHEAR, G.M. Comparative lime effects on continuous no-tillage and conventionally tilled corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.65, p.781-783, 1973.

MUNEER, M.; OADES, J.M. The role of Ca-organic interactions in soil aggregate stability. III. Mechanisms and models. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v.27, p.411-423, 1989.

OLIVEIRA, E.L.; PAVAN, M.A. Redução da acidez do solo pelo uso de calcário e gesso e resposta da soja cultivada em plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 21., Petrolina, 1994. **Anais...** Petrolina: SBCS/EMBRAPA-CPATSA, 1994. p.178.

OLIVEIRA, E.L.; PAVAN, M.A. Control of soil acidity in no-tillage system for soybean production. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.38, p.47-57, 1996.

OLIVEIRA, E.L.; PAVAN, M.A.; SANTOS, J.C.F. Effects of addition of crops residues on the leaching of Ca and Mg in Oxisols. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW pH, 4., Belo Horizonte, 1996. **Abstracts...** Sete Lagoas: SBCS/EMBRAPA-CPAC, 1996. p.142.

PASSIOURA, J.B.; GARDNER, P.A. Control of leaf expansion in wheat seedlings growing in drying soil. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v.17, p.149-157, 1990.

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T.; PRATT, P.F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium and aluminum following lime or gypsum applications to a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.48, p.33-38, 1984.

PAVAN, M.A. Ciclagem de nutrientes e mobilidade de íons no solo sob plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v.41, p.8-12, 1997.

PERFECT, E.; KAI, B.D.; VAN LOON, W.K.P.; SHEARD, R.W.; POJASOK, T. Rates change in soil structural stability under forages and corn. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.54, p.179-186, 1990.

PETRERE, C.; ANGHINONI, I. Alteração de atributos químicos no perfil do solo pela calagem superficial em campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.885-895, 2001.

PÖTTKER, D.; BEN, J.R. Calagem em solos sob plantio direto e em campos nativos do Rio Grande do Sul. In: NUERNBERG, N.J. (Ed.) **Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto**. Lages, SC: SBCS-Núcleo Regional Sul, 1998a. p.77-92.

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

PRASAD, R.; POWER, J.F. Crop residue management. **Advances in Soil Science**, New York, v.15, p.205-251, 1991.

REEVES, D.W. Soil management under no-tillage: soil physical aspects. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, Passo Fundo, 1995. **Resumos...** Passo Fundo: EMBRAPA - CNPT, 1995. p.127-130.

REID, J.B.; GOSS, M.J. Effect of living roots of different plant species on the aggregate stability of two arable soils. **Journal of Soil Science**, London, v.32, p.521-541, 1981.

REINERT, D.J.; MUTTI, L.S.M.; ZAGO, A.; AZOLIN, M.A.D.; HOFFMANN, C.L. Efeito de diferentes métodos de preparo do solo sobre a estabilidade de agregados em solo Podzólico Vermelho-amarelo. **Revista do Centro de Ciências Rurais**, Santa Maria, v.14, p.19-25, 1984.

REINERT, D.J. **Soil structural form and stability induced by tillage in Typic Hapludalf**. East Lansing, MI, 1990. 129f. (PhD in Agronomy). Michigan State University, Michigan, 1990.

RITCHEY, K.D.; SILVA, J.E.; COSTA, U.F. Calcium deficiency in clayey B horizons of savanna Oxisols. **Soil Science**, Baltimore, v.133, p.378-382, 1982.

ROTH, C.H.; CASTRO, F.C.; MEDEIROS, G.B. Análises de fatores físicos e químicos relacionados com a agregação de um Latossolo Roxo distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, p.241-248, 1991.

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

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.

SÁ, J.C. Calagem no sistema plantio direto. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v.41, p.18-22, 1997.

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

SALET, R.L. **Toxidez de alumínio no sistema plantio**. Porto Alegre, 1998. 109f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

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

SANTOS, E.J.S. **Aplicação de calcário em solos arenosos sob sistema plantio direto e campo nativo**. Santa Maria, 1997. 67f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1997.

SHAFFER, R.L.; JOHNSON, C.E. Changing soil condition: The dynamic of tillage. In: PREDICTING TILLAGE EFFECTS ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND PROCESSES. **Proceedings...** Madison: American Society of Agronomy, 1982. p.151-178.

SIDIRAS, N.; VIEIRA, S.R.; ROTH, C.H. Determinação de algumas características físicas de um Latossolo Roxo distrófico sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.8, p.265-268, 1984.

SIDIRAS, N.; PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.9, p.249-254, 1985.

SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; CAMARGO, O.A. A influência da compactação nas propriedades físicas de dois latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, p.91-95, 1986.

SILVA, A.S. **Formação, estabilidade e qualidade de agregados do solo afetados pelo uso agrícola**. Porto Alegre, 1993. 126f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1993.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilidade de agregados do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.113-117, 1997a.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.313-319, 1997b.

SKIDMORE, E.L.; POWERS, D.H. Dry soil-aggregate stability: energy-based index. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.46, p.1274-1279, 1982.

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

TEDESCO, M.J.; VOLKWEISS, S.J.; BOHNEN, H. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. 188p.

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

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.17, p.429-441, 1979.

TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, London, v.33, p.141-163, 1982.

VEIGA, M.; CABEDA, M.S.V.; REICHERT, J.M. Erodibilidade em entressulcos de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, p.121-128, 1993.

VOMOCIL, J.A.; FLOCKER, W.J. Effect of soil compaction on storage and movement of soil air and water. **Transaction of the American Society of Agricultural Engineering**, Saint Joseph, v.4, p.242-246, 1961.

WILSON, H.A.; GISH, R.; BROWNING, G.M. Cropping systems and season as factors affecting aggregate stability. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.12, p.36-38, 1947.

## **7. APÊNDICES**

APÊNDICE 1. Resumo da análise de variância dos resultados referentes aos atributos físicos do solo, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.

Causas da variação	Variáveis					
	Dens.	P. total	Macrop.	Microp.	IEA	Carbono
	Prob.>F					
Sist. de manejo (S)	0,124	0,015	0,034	0,168	0,001	0,010
Profundidade (P)	0,004	0,001	0,000	0,005	0,071	0,001
S*P	0,036	0,036	0,710	0,002	0,000	0,000
CV (%)	3,05	4,00	14,77	2,63	4,83	4,34

APÊNDICE 2. Resumo da análise de variância dos resultados referentes aos atributos físicos do solo, em diferentes épocas de avaliação (tempo), no sistema de manejo convencional por doze anos.

Causas da variação	Variáveis					
	Dens.	P. total	Macrop.	Microp.	IEA	Carbono
	Prob.>F					
Tempo (T)	0,385	0,413	0,187	0,045	0,223	0,103
Profundidade (P)	0,058	0,001	0,001	0,803	0,049	0,060
T*P	0,109	0,530	0,216	0,015	0,706	0,954
CV (%)	2,72	5,44	15,03	2,27	9,55	6,47

APÊNDICE 3. Resumo da análise de variância dos resultados referentes aos atributos físicos do solo, em diferentes épocas de avaliação (tempo), no sistema plantio direto com revolvimento do solo a cada quatro anos.

Causas da variação	Variáveis					
	Dens.	P. total	Macrop.	Microp.	IEA	Carbono
	Prob.>F					
Tempo (T)	0,052	0,028	0,048	0,020	0,009	0,128
Profundidade (P)	0,003	0,001	0,001	0,095	0,013	0,001
T*P	0,900	0,269	0,135	0,062	0,943	0,002
CV (%)	4,57	5,38	22,91	4,73	7,55	3,18

APÊNDICE 4. Resumo da análise de variância dos resultados referentes aos atributos físicos do solo, em diferentes épocas de avaliação (tempo), no sistema plantio direto por oito anos.

Causas da variação	Variáveis					
	Dens.	P. total	Macrop.	Microp.	IEA	Carbono
	Prob.>F					
Tempo (T)	0,702	0,070	0,433	0,082	0,041	0,819
Profundidade (P)	0,002	0,000	0,001	0,006	0,010	0,010
T*P	0,133	0,303	0,260	0,962	0,084	0,735
CV (%)	2,23	5,16	16,62	3,28	8,67	10,85

APÊNDICE 5. Resumo da análise de variância dos resultados referentes aos atributos físicos do solo, em diferentes épocas de avaliação (tempo), no sistema plantio direto por doze anos.

Causas da variação	Variáveis					
	Dens.	P. total	Macrop.	Microp.	IEA	Carbono
	Prob.>F					
Tempo (T)	0,141	0,002	0,059	0,015	0,708	0,284
Profundidade (P)	0,007	0,000	0,001	0,002	0,003	0,000
T*P	0,913	0,157	0,458	0,430	0,320	0,060
CV (%)	4,27	5,19	23,13	4,16	6,81	5,72

APÊNDICE 6. Resumo da análise de variância dos resultados referentes aos atributos químicos do solo, quatro anos após a segunda reaplicação de calcário.

Causas da variação	Variáveis					
	PH	Al	NC	CTCe	Ca	Mg
	Prob.>F					
Sist. de manejo (S)	0,139	0,3004	0,516	0,011	0,019	0,070
Profundidade (P)	0,542	0,076	0,699	0,008	0,027	0,010
S*P	0,043	0,022	0,003	0,000	0,000	0,000
CV (%)	2,02	30,44	7,43	3,03	4,06	5,26

APÊNDICE 7. Resumo da análise de variância dos resultados referentes aos atributos químicos do solo, em diferentes épocas de avaliação (tempo), no sistema de manejo convencional por doze anos.

Causas da variação	Variáveis					
	pH	Al	NC	CTCe	Ca	Mg
	Prob.>F					
Tempo (T)	0,046	0,124	0,026	0,060	0,019	0,007
Profundidade (P)	0,525	0,080	0,031	0,575	0,307	0,387
T*P	0,802	0,031	0,284	0,713	0,689	0,437
CV (%)	1,43	8,88	12,81	4,23	4,94	5,13

APÊNDICE 8. Resumo da análise de variância dos resultados referentes aos atributos químicos do solo, em diferentes épocas de avaliação (tempo), no sistema plantio direto com revolvimento do solo a cada quatro anos.

Causas da variação	Variáveis					
	pH	Al	NC	CTCe	Ca	Mg
	Prob.>F					
Tempo (T)	0,002	0,002	0,002	0,008	0,016	0,016
Profundidade (P)	0,244	0,182	0,010	0,576	0,548	0,209
T*P	0,980	0,339	0,095	0,240	0,281	0,053
CV (%)	3,09	17,09	8,51	6,94	9,25	4,71

APÊNDICE 9. Resumo da análise de variância dos resultados referentes aos atributos químicos do solo, em diferentes épocas de avaliação (tempo), no sistema plantio direto por oito anos.

Causas da variação	Variáveis					
	pH	Al	NC	CTCe	Ca	Mg
	Prob.>F					
Tempo (T)	0,193	0,155	0,032	0,072	0,064	0,103
Profundidade (P)	0,001	0,117	0,120	0,002	0,003	0,005
T*P	0,012	0,027	0,073	0,004	0,006	0,168
CV (%)	3,38	15,68	18,54	4,43	6,78	5,01

APÊNDICE 10. Resumo da análise de variância dos resultados referentes aos atributos químicos do solo, em diferentes épocas de avaliação (tempo), no sistema plantio direto por doze anos.

Causas da variação	Variáveis					
	pH	Al	NC	CTCe	Ca	Mg
	Prob.>F					
Tempo (T)	0,020	0,055	0,000	0,001	0,005	0,002
Profundidade (P)	0,003	0,042	0,044	0,001	0,001	0,003
T*P	0,001	0,529	0,006	0,001	0,001	0,011
CV (%)	1,56	43,00	8,23	2,57	3,81	6,24

APÊNDICE 11. Resumo da análise de variância dos resultados referentes aos rendimentos de matéria seca e grãos de milho e de matéria seca de aveia + ervilhaca. EEA/UFRGS - safra 1999/2000.

Causa da variação	Variáveis		
	Milho		Aveia + ervilhaca
	Matéria seca	Grãos	Matéria seca
	Prob.>F		
Sistema de manejo	0,207	0,045	0,930
CV (%)	11,68	5,69	8,15

APÊNDICE 12. Resumo da análise de variância dos resultados referentes aos rendimentos de matéria seca e grãos de milho e de matéria seca de aveia + ervilhaca. EEA/UFRGS - safra 2000/2001.

Causa da variação	Variáveis		
	Milho		Aveia + ervilhaca
	Matéria seca	Grãos	Matéria seca
	Prob.>F		
Sistema de manejo	0,513	0,990	0,697
CV (%)	13,61	7,35	12,44

## **8. RESUMO BIOGRÁFICO**

Alaerto Luiz Marcolan, filho de Luiz Marcolan Primo e Lourdes Largo Marcolan, nasceu em 10 de agosto de 1976, em Constantina, Rio Grande do Sul. Em 1989, completou seus estudos de primeiro grau na Escola Estadual de 1º e 2º Graus São José, em Constantina. Em 1990, ingressou no Colégio agrícola de Frederico Westphalen - UFSM, recebendo o título de Técnico em Agropecuária em dezembro de 1993. Em 1995, ingressou no Curso de Agronomia da Universidade Federal de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul, graduando-se como Engenheiro Agrônomo em janeiro de 2000. Durante os cinco anos de graduação atuou como bolsista de iniciação científica na área de Fertilidade do Solo sob a orientação do professor Doutor Carlos Alberto Ceretta. Em março de 2000, iniciou seus estudos de Mestrado em Ciência do Solo no Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Atualmente, é membro da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.