

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

VALTER YASSUO ASAMI

ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO MANEJADO NO SISTEMA PLANTIO
DIRETO EM FUNÇÃO DA CALAGEM SUPERFICIAL, MANEJO DA COBERTURA
VEGETAL E ADUBAÇÃO NITROGENADA

PONTA GROSSA

2010

VALTER YASSUO ASAMI

ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO MANEJADO NO SISTEMA PLANTIO
DIRETO EM FUNÇÃO DA CALAGEM SUPERFICIAL, MANEJO DA COBERTURA
VEGETAL E ADUBAÇÃO NITROGENADA

Dissertação apresentada à Universidade Estadual
de Ponta Grossa para a obtenção do título de
Mestre em Agronomia - Área de Concentração
em Agricultura. Ênfase em Uso e Manejo do
Solo.

Orientador: Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca.
Co-Orientadora: Prof. Dra. Neyde Fabíola
Balarezo Giarola.

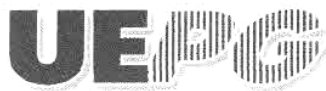
PONTA GROSSA

2010

Ficha Catalográfica Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

- A798a Asami, Valter Yassuo
Atributos químicos e físicos do solo manejado no sistema plantio direto em função da calagem superficial, manejo da cobertura vegetal e adubação nitrogenada. / Valter Yassuo Asami. Ponta Grossa, 2010.
61f.
Dissertação (Mestrado em Agronomia – Área de Concentração : Agricultura. Ênfase em Uso e Manejo do Solo), Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Orientador : Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca
Co-orientadora : Profa. Dra. Neyde Fabíola Balarezo Giarola
1. Atributos eletroquímicos. 2. Solo tropical. 3. Calcário dolomítico. 4. Agricultura conservacionista. I. Fonseca, Adriel Ferreira da. II. Giarola, Neyde Fabíola Balarezo. III. T.

CDD: 631.4



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE MESTRADO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação: “ATRIBUTOS QUÍMICOS E FÍSICOS DO SOLO MANEJADO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO EM FUNÇÃO DA CALAGEM SUPERFICIAL, MANEJO DA COBERTURA VEGETAL E ADUBAÇÃO NITROGENADA”.

Nome: Valter Yassuo Asami

Orientador: Adriel Ferreira da Fonseca

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca

Prof. Dr. Fernando José Garbino

Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires

Data da Realização: 29 de outubro de 2010.

DEDICO

A minha família, Tereza Emiko Suguiyama Asami, Yassumassa Asami, Erika Yumi Asami e
Thiago Seiji Asami pelo apoio absoluto ao estudo como forma de alcançar o sucesso.
A minha noiva Priscila Luiza Motta, pelo apoio e dedicação.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela vida e oportunidades concedidas.

À Universidade Estadual de Ponta Grossa e ao Programa de Pós Graduação (Mestrado) em Agronomia, por permitirem o meu aprimoramento profissional.

À Fundação Agrisus, pela concessão de bolsa de estudos e apoio financeiro nas diversas etapas do projeto PA 568/09.

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

Ao Orientador e amigo, Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca, pela credibilidade desde o princípio, amizade e dedicação científica em todos os momentos.

A Co-orientadora e amiga, Dra. Neyde Fabiola Balarezo Giarola pelo suporte técnico e científico.

Ao Prof. Dr. Eduardo Fávero Caires, por permitir utilizar seus experimentos, constituir-se no grande mentor deste trabalho e ser um dos visionários da UEPG.

As equipes de trabalho dos Laboratórios de Fertilidade do Solo, Nutrição de Plantas, Matéria Orgânica do Solo e Física do Solo: Flávia Biassio, Rodrigo de Oliveira, Adriano Haliski, Angelo Bini, Hélio Woods, Danilo Scharr, Jéssica dos Santos, Jaqueline Gonçalves, Dirce, Verônica, Marina Bavoso, Sérgio Damaso e Sérgio.

A família Motta, Sr. João Motta, Sra. Vera Motta, Priscila Motta, Thiago Motta, Everton Motta e Mônica Motta, pelo apoio e conforto familiar.

Aos meus avós (*In Memoriam*), por ter me ensinado o valor do trabalho e humildade.

À todas pessoas que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste trabalho.

ASAMI, Valter Yassuo. **Atributos químicos e físicos do solo manejados no sistema plantio direto em função da calagem superficial, manejo da cobertura vegetal e a adubação nitrogenada**. 2010. Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

RESUMO

A aplicação superficial de calcário, no sistema plantio direto (SPD), resulta em um gradiente entre a superfície e camadas subsuperficiais do solo na correção da acidez. A calagem e a fertilização nitrogenada proporcionam modificações químicas no perfil do solo capaz de influenciar a qualidade (biológica, física e química) do solo. O objetivo desse trabalho foi verificar a magnitude das alterações químicas, eletroquímicas e físicas do solo devido à calagem superficial, manejo da cobertura vegetal e adubação nitrogenada. O delineamento experimental empregado foi o de blocos completos ao acaso com parcelas subdivididas em um Latossolo Vermelho textura média manejado há 30 anos no SPD no Paraná, Brasil. As parcelas receberam calagem superficial (controle, 4, 8 e 12 Mg ha⁻¹ de calcário) em maio de 2004. Nas subparcelas, foram estabelecidos os seguintes tratamentos: sem cobertura de aveia (SCA); com cobertura de aveia (CCA) e com cobertura de aveia fertilizada anualmente com 180 kg ha⁻¹ de nitrogênio mineral (nitrato de amônio) (CCA+N). Em maio de 2009 (60 meses após a calagem), amostras de solo das camadas de 0 - 5, 5 - 10 e 10 - 20 cm foram coletadas para determinação de: pH, ponto de efeito salino nulo (PESN), delta pH (Δ pH), condutividade elétrica (CE), acidez total; teores trocáveis de alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K); capacidade de troca catiônica efetiva (CTCe), fósforo disponível (P Mehlich-1), nitrogênio total (NT) e carbono orgânico total (COT). Amostras de solo indeformados das camadas de 0 - 10 e 10 - 20 cm foram coletadas, na mesma ocasião, visando à determinação dos atributos: macroporosidade, microporosidade, porosidade total (PT) e densidade do solo (Ds). Blocos de solo foram coletados para quantificar a resistência tênsl (RT) de agregados. A calagem superficial, após 5 anos de sua aplicação em solo manejado há 30 anos no SPD proporcionou correção da acidez, aumento de Ca e Mg trocáveis em todas as camadas estudadas. Quando altas doses de nitrato de amônio foram aplicadas na aveia preta, ocorreu aumento da acidificação do solo e redução dos teores de Ca e Mg trocáveis na camada de 0 - 5 e 5 - 10 cm. A calagem e a cobertura de aveia preta, sem e com aplicação de N, favoreceram o acúmulo de COT e NT em todas as camadas estudadas. Os tratamentos com aveia preta proporcionaram incremento de pH, CE, Ca, Mg e NT na camada de 10 - 20 cm, evidenciando importância da cobertura vegetal para a melhoria da fertilidade do solo. A cobertura de aveia preta aliada à calagem superficial sob SPD consolidado pouco alteraram os atributos PESN, Δ pH e CE, porém os valores dos atributos eletroquímicos obtidos foram adequados ao manejo do solo no SPD. Os tratamentos com aveia preta aliada a calagem superficial reduziu a macroporosidade e contribuiu para o aumento da RT na camada de 0 - 10 cm. Verificou-se que na dose de 8 Mg ha⁻¹ de calcário (saturação por bases estimada de 65%) aliado aos tratamentos com e sem aveia preta favoreceram os maiores valores de microporosidade na camada de 0 - 10 cm. A calagem associado aos tratamentos da aveia preta reduziu a macroporosidade e aumento da microporosidade na camada de 10 - 20 cm do solo.

Palavras-chave: atributos eletroquímicos, solo tropical, calcário dolomítico, agricultura conservacionista.

SUMARY

Surface application of lime in no-till system (NTS), result in a gradient between surface and subsurface soil layers due to acidity amelioration. Liming and nitrogen fertilization can change chemical soil profile and modify soil quality (biological, physical and chemical). The aim of this study was to investigate the magnitude of the chemical and physical changes of soil due to surface liming, cover crop management and nitrogen fertilization. The experimental design was a complete randomized block, in a split-plot on loamy, kaolinitic, thermic Typic Hapludox in Ponta Grossa, Parana State, Brazil, and 30 years under NTS. The main plots consisted of dolomite lime applied on soil surface without incorporation (control, 4, 8 and 12 Mg ha⁻¹ of lime) in May 2004. The subplots were represented by winter crop management: without black oat cover crop (SCA); with black oat cover crop (CCA) and black oat fertilized with 180 kg ha⁻¹ of N (CCA+N). After corn (*Zea mays* L.) harvest, in May 2009 (60 months after liming application), samples of soil layers 0 - 5, 5 - 10 and 10 - 20 cm were collected for determination of: pH; point of zero salt effect (PZSE), Δ pH, electrical conductivity (EC), total acidity (H+Al); content of exchangeable aluminum (Al), calcium (Ca), magnesium (Mg) and potassium (K); effective cation exchange capacity (CECE), available phosphorus (P), total nitrogen (TN) and total organic carbon (TOC). In this occasion, samples undisturbed were taken from 0-10 and 10-20 cm layers and performed to macroporosity, microporosity, total porosity (TP) and bulk density (BD). Samples blocks of soil were also collected to measure the tensile strength of aggregates (TS). The surface liming, after five years of its use in soil managed for 30 years in NTS provides increase of Ca and Mg in all layers studied. When high levels of ammonium nitrate were applied on black oat, had an increase of soil acidification and reduction of Ca and Mg in the layer 0 - 5 and 5 - 10 cm. The liming and cover crop of black oat, with and without N application favored the accumulation of TOC and TN in all layers studied. Treatments with black oat provided increment of pH, EC, Ca, Mg, and TN in the layer 10 - 20 cm, showing the importance of vegetation for the improvement of soil fertility. The cover crop of black oat allied to liming under NTS consolidated had little change in the attributes PZSE, Δ pH and EC, but the values of the electrochemical properties obtained were adequate to the soil managed in the NTS. The treatments with black oat combined with liming reduced the macroporosity and contributed to the increase in RT at 0 - 10 cm. It was found that the lime in the level of 8 Mg ha⁻¹ combined with lime and without black oat increased the microporosity at the layer 0 - 10 cm of the soil. In the layer 10 - 20 cm, the limestone associated with treatments of oat reduced macroporosity and increase microporosity of the soil.

Key-words: electrochemical properties, tropical soil, dolimitic lime, agriculture conservationist.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Influência das doses de calcário e dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos: pH (CaCl_2 0,01 mol L⁻¹), acidez total (H+Al) e Alumínio trocável (Al) no solo. (●): sem cobertura de aveia – SCA. (■): com cobertura de aveia – CCA. (▲): com cobertura de aveia + 180 kg ha⁻¹ de N – CCA+N. Pontos são médias de três repetições. *: $p < 0,05$. **: $p < 0,01$. 29
- Figura 2.** Influência das doses de calcário e dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos: ponto de efeito salino nulo (PESN), ΔpH ($\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) e condutividade elétrica (CE) no solo. (●): sem cobertura de aveia – SCA. (■): com cobertura de aveia – CCA. (▲): com cobertura de aveia + 180 kg ha⁻¹ de N – CCA+N. Pontos são médias de três repetições. *: $p < 0,05$. **: $p < 0,01$. 32
- Figura 3.** Influência das doses de calcário e dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos: cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) trocável e capacidade de troca catiônica efetiva (CTCe) no solo. (●): sem cobertura de aveia – SCA. (■): com cobertura de aveia – CCA. (▲): com cobertura de aveia + 180 kg ha⁻¹ de N – CCA+N. Pontos são médias de três repetições. *: $p < 0,05$. **: $p < 0,01$. 35
- Figura 4.** Influência das doses de calcário e dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos: fósforo disponível (P Mehlich-1), carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) no solo. (●): sem cobertura de aveia – SCA. (■): com cobertura de aveia – CCA. (▲): com cobertura de aveia + 180 kg ha⁻¹ de N – CCA+N. Pontos são médias de três repetições. *: $p < 0,05$. **: $p < 0,01$. 38
- Figura 5.** Influência das doses de calcário e dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos: macroporosidade, microporosidade e porosidade total. (●): sem cobertura de aveia – SCA. (■): com cobertura de aveia – CCA. (▲): com cobertura de aveia + 180 kg ha⁻¹ de N – CCA+N. Pontos são médias de três repetições. *: $p < 0,05$. **: $p < 0,01$. 49
- Figura 6.** Influência das doses de calcário e dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos: densidade do solo (Ds) e resistência tênsil de agregados (RT) do solo. (●): sem cobertura de aveia – SCA. (■): com cobertura de aveia – CCA. (▲): com cobertura de aveia + 180 kg ha⁻¹ de N – CCA+N. Pontos são médias de três repetições. *: $p < 0,05$. **: $p < 0,01$. 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Valores de F dos atributos químicos do solo, 60 meses após a calagem superficial submetido aos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada em cobertura no perfilhamento da aveia (180 kg ha ⁻¹ de N).	27
Tabela 2.	Influência dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos químicos do solo.	28
Tabela 3.	Valores de F dos atributos físicos do solo, 60 meses após a calagem superficial submetido aos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada em cobertura no perfilhamento da aveia (180 kg ha ⁻¹ de N)	47
Tabela 4.	Influência dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos físicos do solo.	48

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO -----	11
2.	REVISÃO DE LITERATURA -----	13
2.1	Sistema de preparo e qualidade do solo -----	13
2.2.	Acidez dos solos tropicais e sua correção em sistema plantio direto ----	14
2.3.	Eletroquímica dos solos com cargas elétricas variáveis -----	15
3.	QUALIDADE QUÍMICA DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO APÓS CALAGEM SUPERFICIAL, COBERTURA VEGETAL E FERTILIZAÇÃO NITROGENADA-----	18
3.1.	RESUMO -----	18
3.2.	SUMARY -----	19
3.3.	INTRODUÇÃO -----	20
3.4.	MATERIAL E MÉTODOS -----	21
3.5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO -----	24
3.5.1.	Acidez ativa, total e trocável-----	24
3.5.2.	Ponto de efeito salino nulo, delta pH e condutividade elétrica-----	30
3.5.3.	Cálcio, magnésio e potássio trocável e capacidade de troca catiônica efetiva-----	33
3.5.4.	Fósforo disponível, carbono orgânico total e nitrogênio total-----	36
3.6.	CONCLUSÕES -----	39
4.	QUALIDADE FÍSICA DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO APÓS CALAGEM SUPERFICIAL, COBERTURA VEGETAL E FERTILIZAÇÃO NITROGENADA-----	40
4.1.	RESUMO -----	40

4.2.	ABSTRACT -----	41
4.3.	INTRODUÇÃO -----	42
4.4.	MATERIAL E MÉTODOS -----	43
4.5.	RESULTADOS -----	46
4.6.	DISCUSSÃO -----	51
4.7.	CONCLUSÕES -----	54
5.	CONCLUSÕES GERAIS -----	55
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	56

1. INTRODUÇÃO

Os solos das regiões tropicais e subtropicais apresentam, em suas condições naturais, altos teores de alumínio (Al) trocável e baixas concentrações trocáveis de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K). Esses solos também podem apresentar, em subsuperfície, concentrações fitotóxicas de Al (PAVAN et al., 1982) e deficiência de Ca (RITCHEY et al., 1982), resultando em menor crescimento radicular e queda no rendimento das culturas (RAIJ, 1988).

Os solos dos trópicos, quando comparados àqueles de regiões temperadas, apresentam menores concentrações de matéria orgânica (monitorada pela determinação das concentrações de carbono orgânico total – COT) (MACHADO, 2005). Essa menor concentração de COT nos solos dos trópicos se deve às altas temperaturas e precipitação pluvial que proporcionam condições para maior atividade microbiana e aumento na taxa de decomposição do material orgânico (SIX et al., 2002). Além disso, o sistema de preparo convencional acentuou, ao longo dos anos, a queda nas concentrações de COT, resultando em diminuição na qualidade do solo e aumento da degradação ambiental (LAL, 2009).

O problema relacionado às baixas concentrações de COT nos solos dos trópicos foi bastante amenizado com a adoção do sistema plantio direto (SPD). Esse sistema tem sido difundido em diversos países pelo fato de proporcionar incremento da produção agrícola, redução de custos de produção, aumento da qualidade ambiental, melhoria de atributos biológicos, físicos e químicos do solo, devido ao incremento de carbono orgânico (LAL, 2006). Depois de adotado o SPD, a baixa fertilidade natural associada à alta acidez têm sido os principais limitantes químicos (do solo) ao rendimento das culturas nos trópicos. Embora o SPD contribuir para menor acidificação do solo (SIDIRAS & PAVAN, 1985), a prática da

calagem tem sido usual e recomendada para este sistema de cultivo, pelo fato de proporcionar melhoria nos atributos do solo e incremento no rendimento de grãos (CAIRES et al., 2005).

O principal insumo utilizado para a correção da acidez dos solos é o calcário. Esse insumo ocasiona aumento no pH, precipitação do Al^{3+} na forma de hidróxido, aumento da saturação por bases (V) e na capacidade de troca catiônica efetiva (CTC_e). Devido à sua baixa solubilidade em água [14 mg L^{-1} a 25°C , segundo ALCARDE (1992)], o calcário necessita de adequado contato com as partículas do solo para melhor reatividade (RAIJ, 1991). Porém, no SPD consolidado, a calagem é feita na superfície e sem incorporação, pelo fato de este sistema implicar no mínimo de perturbação (apenas movimentação na linha de semeadura e adubação) do solo. A calagem superficial no SPD resulta em correção gradual de camadas do solo (CAIRES et al., 2002) e, desse modo, a melhoria das condições de acidez abaixo do local de aplicação do corretivo é lenta (ERNANI et al., 2001). Essa correção gradual nas camadas do solo pode ser incrementada pelo manejo de fertilizantes nitrogenados e pela cobertura vegetal.

Em solos bem drenados, o íon amônio (NH_4^+) pode sofrer rápida nitrificação, formando NO_3^- (SANGOI et al., 2003) e acidificar o solo. Nesse sentido, a acidificação gerada pelo fertilizante amoniacal pode solubilizar o calcário e formar o par iônico $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2^0$. O $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2^0$ acompanha o movimento da solução no solo e, assim, pode atingir camadas mais profundas (FOLONI et al., 2006). Essa maior mobilidade do par iônico permite distribuir o Ca e aumentar o pH da solução (mediante a absorção do NO_3^- pelas raízes) em maiores profundidades (MARSCHNER, 1995). Adicionalmente, a cobertura vegetal desempenha importante papel, produzindo compostos orgânicos de baixo, médio ou alto peso molecular, em diferentes proporções. Esses ligantes orgânicos podem formar complexos com o Ca^{2+} e carregá-lo ao longo do perfil; ainda, podem também formar complexos com o Al^{3+} ,

amenizando o efeito da acidez do solo (FRANCHINI et al., 1999; MIYAZAWA et al., 2002; ALLEONI et al., 2010).

A medida que aumenta o teor de carbono orgânico no solo, cátions atuam como fatores importantes na estabilidade das estruturas do solo. As substâncias orgânicas e cátions polivalentes trocáveis são essenciais na formação e estabilização dos agregados do solo (CASTRO FILHO et al., 2002). No sistema plantio direto, o aporte contínuo de carbono aliado a calagem superficial podem contribuir para a melhoria da estruturação do solo (BRONICK & LAL, 2004), porém, efeitos contraditórios têm demonstrado que a calagem pode ocasionar dispersão dos colóides (SPERA et al., 2008), favorecendo a desagregação das estruturas do solo. No sistema plantio direto longa duração pouco são as informações sobre os efeitos da calagem superficial e da cobertura de aveia preta, sem e com adubação nitrogenada sobre a estruturação do solo, principalmente devido ao efeito gradual do calcário.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Sistema de preparo e qualidade do solo

O uso intensivo do solo por meio do preparo convencional (PC), caracterizado pelo revolvimento contínuo, gerou ao longo dos anos degradação e empobrecimento do solo. Como consequência, acarretou em diminuição da produtividade agrícola, erosão, compactação do solo e baixa infiltração da água das chuvas. Para mitigar esses problemas, o SPD surgiu no Estado do Paraná no início dos anos 1970. Inicialmente, esse sistema foi adotado pelo produtor Herbert Bartz, no município de Rolândia e, no ano de 1976, os agricultores Manoel Henrique Pereira e Frank Dijkstra iniciaram a conversão das suas terras para o SPD, na região dos Campos Gerais (FEBRAPDP, 2009). O SPD caracteriza-se pelo não revolvimento do solo e manutenção dos resíduos vegetais em superfície que reduz a

erosão laminar e conserva a umidade do solo. Atualmente a área sob SPD no Brasil corresponde a cerca de 25 milhões de hectares (FEBRAPDP, 2009).

A qualidade do solo é caracterizada pela capacidade de exercer suas funções, seja ela em condições naturais ou submetidas ao manejo de cultivo (FRIEDMAN et al., 2001). Diversos trabalhos sobre qualidade do solo procedem à comparação entre campo nativo e sistema de manejo (SIX et al., 1999; WENDLING et al., 2005; RABARY et al., 2008). Subtende-se que em condições naturais os solos apresentam condições ideais para avaliar a qualidade do solo, servindo como parâmetro para relacionar as modificações nos sistemas de manejo. Em solos sob sistemas de cultivos, a qualidade do solo é avaliada pelas modificações nos atributos físicos, químicos e biológicos influenciados pelo sistema de cultivo acondicionado à melhoria da produção agrícola (FRIEDMAN et al., 2001).

No SPD, a agregação do solo é preservada ao longo dos anos, devido à contínua manutenção de resíduos vegetais na superfície (SIX et al. 2002). A cobertura do solo reduz o impacto das gotas de chuva sobre o solo e diminui a velocidade de escoamento, favorecendo a infiltração e a manutenção da estrutura do solo (LAL, 2005). Alterações nos atributos do solo decorrentes das reações dos insumos agrícolas no SPD resultam em mudanças na dinâmica dos nutrientes (BOER et al., 2007), sendo que algumas ainda não são bem compreendidas pela ciência. Daí a importância de se estudar o aporte de corretivos e fertilizantes sobre a dinâmica dos nutrientes em SPD e sua relação com a qualidade do solo, nutrição e rendimento de culturas.

2.2. Acidez dos solos e sua correção em sistema plantio direto

Os solos tropicais e subtropicais, em específico os solos brasileiros, caracterizam-se por apresentar, em condições naturais, elevada acidez e altas concentrações disponíveis de alumínio (Al) e manganês (Mn) (BRADY, 1989). Esses solos também apresentam baixas

concentrações trocáveis de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K), como consequência do acentuado processo de intemperização (MIYAZAWA et al., 2002).

A alta acidez natural dos solos brasileiros, associada à baixa disponibilidade de nutrientes, tem sido fator limitante à produção agrícola. Elevadas concentrações de Al^{3+} na solução inibem o crescimento radicular (MUZILLI et al., 1989), diminuindo a absorção de água e nutrientes (CAIRES et al., 2006). Portanto, torna-se importante o desenvolvimento de estratégias de correção e manejo do solo visando o uso sustentável deste recurso natural.

Ao longo das últimas décadas, têm sido bastante estudadas estratégias de correção da acidez do solo, no entanto, para o SPD, os estudos são relativamente recentes. No SPD, a calagem é uma prática indispensável para o aumento do rendimento de grãos e tem sido realizada na superfície do solo, sem incorporação (CAIRES et al., 2004). Nesse sistema, os efeitos mais expressivos da calagem têm sido observados na camada superficial do solo (GATIBONI et al., 2003), devido à baixa solubilidade do corretivo (ALCARDE, 1992). Porém, com o passar dos anos, o calcário aplicado na superfície do solo no SPD pode proporcionar melhoria da acidez do solo abaixo do ponto de sua aplicação, devido aos seguintes fatores: (i) movimentação de partículas finas de calcário ocasionada pela melhor estruturação do solo (AMARAL, et al., 2004); (ii) ânions inorgânicos (MARSCHNER, 1995); (iii) compostos orgânicos hidrossolúveis (FRANCHINI et al. 1999; CIOTTA et al., 2004).

2.3. Eletroquímica dos solos com cargas elétricas variáveis

Do ponto de vista eletroquímico, os solos tropicais e subtropicais apresentam cargas elétricas variáveis. Portanto, alterações no pH, concentração eletrolítica e reações de adsorção específica na superfície dos coloides governam a geração de cargas elétricas desses solos (BOLAN et al., 1999). A maioria dessas propriedades está relacionada direta ou indiretamente ao balanço de cargas elétricas na superfície das partículas coloidais (FONTES et al., 2001).

Nos solos altamente intemperizados, com predomínio de óxidos de ferro e alumínio (BRADY 1989), os efeitos da floculação e dispersão são mais expressivos nas propriedades físico-química dos minerais de argila 1:1 (CHAVES et al., 1997; ALBUQUERQUE et al., 2003). Essas modificações são observadas na dupla camada difusa, onde as cargas elétricas presentes na superfície coloidal apresentam maiores variações decorrentes de alterações químicas do solo (SPARKS 1999).

A aplicação superficial de calcário, no SPD, resulta em um gradiente entre a superfície e camadas subsuperficiais do solo na correção da acidez (GATIBONI et al., 2003), gerando uma frente de alcalinização no solo. Com a calagem, os ânions bicarbonato (HCO_3^-) e hidroxila (OH^-) irão neutralizar o hidrogênio (H^+) e consequentemente o Al^{3+} será precipitado na forma de $\text{Al}(\text{OH})_3$. O Ca^{2+} , proveniente da calagem, será adsorvido nos sítios de troca provocando desequilíbrio das cargas superficiais dos colóides decorrentes da substituição entre Al e Ca (ALBUQUERQUE et al., 2003; SPERA et al., 2008). Logo, as hidroxilas presentes nas ligações de face-borda dos minerais de argila 1:1 serão responsáveis pela geração de cargas negativas conseqüente da liberação de H^+ para a solução no solo, devido ao aumento do pH (FONTES et al., 2001). Esses efeitos podem alterar as propriedades físico-químicas, desestabilizando as estruturas físicas do solo (ALBUQUERQUE et al., 2003), principalmente o efeito gradual do carbonato de cálcio.

Segundo Spera et al. (2008), a calagem superficial, em Latossolo Vermelho distrófico, pode (i) diminuir e aumentar a macro e a microporosidade, respectivamente; (ii) aumentar a densidade e a dispersão dos microagregados, formando uma zona de compactação no solo devido ao rearranjo dos agregados e à redução dos espaços porosos responsáveis pela permeabilidade do solo. Assim, alterações físico-químicas provenientes da calagem são evidenciadas por alterações no pH, na força iônica, e nos íons que são adicionados ao solo (ALLEONI & CAMARGO 1994).

Diante do exposto, há necessidade de se ampliar os estudos relacionados ao manejo e estabilidade dos solos agrícolas, especialmente na região dos Campos Gerais do Paraná, pioneira na adoção do SPD, enfocando temas relacionados à qualidade do solo, calagem superficial, manejo da cobertura vegetal e fertilizantes nitrogenados.

3. QUALIDADE QUÍMICA DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO APÓS CALAGEM SUPERFICIAL, COBERTURA VEGETAL E FERTILIZAÇÃO NITROGENADA

3.1. RESUMO

O manejo das culturas e dos insumos agrícolas no sistema plantio direto (SPD) acarreta em alterações nos atributos químicos do solo capazes de promover estabilidade ou perturbação da qualidade do solo. O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da calagem superficial e da cultura de aveia preta [*Avena strigosa* (Schreb)] sem e com fertilização nitrogenada, sobre os atributos químicos do solo no SPD consolidado. O delineamento experimental empregado foi o de blocos completos ao acaso com parcelas subdivididas em um Latossolo Vermelho distrófico com textura média, manejado a 30 anos no SPD no Paraná, Brasil. As parcelas receberam calagem (controle, 4, 8 e 12 Mg ha⁻¹) em maio de 2004. Nas subparcelas foram consideradas os tratamentos: sem cobertura de aveia (SCA); com cobertura de aveia (CCA) e com cobertura de aveia mais 180 kg ha⁻¹ de N na forma de nitrato de amônio (CCA+N). Em maio de 2009, amostras de solo das camadas de 0 - 5, 5 - 10 e 10 - 20 cm foram coletadas para determinação de: pH, ponto de efeito salino nulo, ΔpH, condutividade elétrica (CE), acidez total; teores trocáveis de alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K); capacidade de troca catiônica efetiva (CTCe), fósforo disponível (P), nitrogênio total (NT) e carbono orgânico total (COT). A calagem superficial no sistema plantio direto proporcionou correção da acidez, aumento de Ca e Mg trocáveis em todas as camadas estudadas, evidenciando ser uma prática importante para garantir a qualidade química do solo. Altas doses de nitrato de amônio promoveram acidificação do solo e redução dos teores de Ca e Mg trocáveis na camada de 0 - 5 e 5 - 10 cm. A calagem e a cobertura de aveia preta, sem e com aplicação de N, favoreceram o acúmulo de COT e NT em todas as camadas estudadas. Os tratamentos com aveia preta proporcionaram incremento de pH, CE, Ca, Mg e NT na camada de 10-20 cm, evidenciando importância da cobertura vegetal para a melhoria da fertilidade do solo. Os atributos PESN, ΔpH e CE, pouco variaram, porém os valores dos atributos eletroquímicos obtidos foram adequados ao manejo do solo no SPD.

Palavras-chave: atributos eletroquímicos, solo tropical, calcário dolomítico, agricultura conservacionista.

SOIL CHEMICAL QUALITY UNDER NO-TILL SYSTEM AS AFFECTED BY SURFACE LIMING, COVER CROP AND NITROGEN FERTILIZATION

3.2. SUMMARY

Crops management and agricultural inputs in no-tillage system (NTS) changes soil chemical attributes, which promotes stability or disturbance of soil quality. The objectives of this paper, were to assess the effects of liming and black oats [*Avena strigosa* (Schreb)] management according to nitrogen fertilization on soil chemical attributes in NTS. The experimental design was a complete randomized block, in a split-plot on a loamy, Oxisol in Parana State, Brazil, managed during 30 years in NT. The main plots consisted of dolomite lime applied on soil surface without incorporation (control, 4, 8 and 12 Mg ha⁻¹) in May 2004. The subplots were represented by winter crop management: without black oat cover crop (SCA); with black oat cover crop (CCA) and black oat fertilized with 180 kg of N ha⁻¹ (CCA+N). In May 2009, samples of soil layers 0 - 5, 5 - 10 and 10 - 20 cm were collected for determination of: pH, point of zero salt effect (PZSE), Δ pH, electrical conductivity (EC), total acidity (H+Al); content of exchangeable aluminum (Al), calcium (Ca), magnesium (Mg) and potassium (K); effective cation exchange capacity (CECe), available phosphorus (P), total nitrogen (TN) and total organic carbon (TOC). The surface liming, after five years of its use in soil managed for 30 years in no-tillage system provides increase of Ca and Mg in all layers studied. When high levels of ammonium nitrate were applied on black oat, had an increase of soil acidification and reduction of Ca and Mg in the layer 0 - 5 and 5 - 10 cm. The liming and cover crop of black oat, with and without N application favored the accumulation of TOC and TN in all layers studied. Treatments with black oat provided increment of pH, EC, Ca, Mg, and TN in the layer 10 - 20 cm, showing the importance of vegetation for the improvement of soil fertility. The cover crop of black oat allied to liming under NTS consolidated had little change in the attributes PESN, Δ pH and CE, but the values of the electrochemical properties obtained were adequate to the soil managed in the NTS.

Key-words: electrochemical attributes, tropical soil, dolomite lime, agriculture conservationist.

3.3. INTRODUÇÃO

As cargas elétricas variáveis, características dos solos tropicais e subtropicais, são influenciadas por mudanças nos valores de pH, concentração eletrolítica da solução e reações de adsorção específica nos grupos funcionais (BOLAN et al., 1999). Alteração nesses atributos reflete no balanço de cargas elétricas na superfície das partículas coloidais (FONTES et al., 2001).

A adoção do sistema plantio direto (SPD) e o adequado manejo das plantas de cobertura e da palhada têm resultado, ao longo dos anos, em incremento nos teores de carbono orgânico do solo (COT) (BAYER et al., 2006). Esse aumento nas concentrações de COT tem diminuído o ponto de efeito salino nulo (PESN) (ALLEONI & CAMARGO, 1994) e alterado a quantidade de cargas elétricas negativas no solo (SPARKS, 2003).

A alta acidez natural dos solos brasileiros associada à extração de nutrientes pelas plantas, aumento da concentração de COT e uso de fertilizantes nitrogenados tem implicado no uso de calcário para manter ou aumentar os rendimentos agrícolas (FOLONI et al., 2006), sobretudo no SPD (CAIRES et al., 2005). Nesse sistema, a calagem é realizada na superfície, sem incorporação e os efeitos são mais expressivos nas camadas superficiais do solo, porém, haver melhoria da acidez do solo abaixo do ponto de aplicação do corretivo no solo (OLIVEIRA & PAVAN 1996, CAIRES & DA FONSECA 2000).

A calagem, a aplicação de fertilizantes nitrogenados e a cobertura vegetal, podem influenciar a reação do solo. O uso de nitrogênio mineral nas plantas de cobertura do solo pode favorecer a dissolução do calcário aplicado na superfície e, ainda, incrementar o rendimento de fitomassa. Com o passar do tempo, isso pode resultar em gradiente de acidez e de COT no solo e influenciar a qualidade química do solo. O objetivo do presente trabalho foi

verificar os efeitos da calagem superficial e da cobertura de aveia preta, sem e com nitrogênio, na qualidade do solo sob SPD.

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em maio/2004 na Fazenda Estância dos Pinheiros (latitude: 25°05'58"S; longitude: 50°09'30"W; altitude: 970 m), município de Ponta Grossa (PR), em um Latossolo Vermelho distrófico manejado há 30 anos no SPD. O clima do local, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfb, caracterizado por apresentar médias anuais de temperatura e precipitação de 18°C e 1550 mm, respectivamente (CAVIGLIONI et al., 2000).

Por ocasião da instalação do experimento o solo possuía os seguintes atributos na camada de 0 - 20 cm: pH (CaCl_2) de 4,1; 110,0; 12,0; 5,0; 5,0; 1,7 e 121,7 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de acidez total (H^+Al), alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0, respectivamente; saturação por bases de 9,6 %; 18,0 g dm^{-3} de Carbono orgânico total (COT); 295,0, 240,0 e 465,0 g kg^{-1} de argila, silte e areia, respectivamente. A fração argila apresentava 265,8; 2,4 e 26,8 g kg^{-1} de caulinita, hematita e goethita, respectivamente (CAIRES et al., 2005).

O delineamento experimental empregado foi o de blocos completos casualizados em parcelas subdivididas com três repetições. Nas parcelas (6,5 x 32,0 m), foram empregados os tratamentos controle (sem calcário), 4, 8 e 12 Mg ha^{-1} de calcário dolomítico [que apresentava 31,0 e 23,0 g kg^{-1} de óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), respectivamente e poder relativo de neutralização total (PRNT) de 85%] visando elevar a saturação por bases a aproximadamente 40, 65 e 90% na camada de 0 - 20 cm. Nas subparcelas (6,5 x 6,4 m) foram empregados os seguintes tratamentos: (i) sem cobertura de aveia preta (SCA), (i) com

cobertura de aveia preta (CCA) e (iii) com cobertura de aveia preta adubada com 180 kg ha^{-1} de N na forma de NH_4NO_3 (CCA+N).

O calcário foi aplicado em uma única vez, no mês de maio/2004, a lanço na superfície do solo e sem incorporação. A adubação nitrogenada da aveia preta foi realizada anualmente, (180 kg ha^{-1} de N) em cobertura, por ocasião do perfilhamento da cultura (aproximadamente 30 dias após a emergência). O fertilizante nitrogenado utilizado na cultura de inverno foi o nitrato de amônio na dose de 545 kg ha^{-1} a fim de promover potencial de acidificação do solo através do processo de nitrificação do amônio do $(\text{NH}_4)_2\text{NO}_3$.

Após a aplicação do calcário, procederam-se os seguintes cultivos de aveia preta [*Avena strigosa* (Schreb)] no outono-inverno dos anos de 2004 - 2008; milho (*Zea mays* L.) no período de primavera-verão dos anos de 2004/05 e 2008/09; soja [*Glycine max* (L.) Merr.] na primavera-verão dos anos de 2005/06, 2006/07 e 2007/08. As adubações foram realizadas de acordo com as análises de solo, totalizando-se apenas na primavera verão 273, 310 e 285 kg ha^{-1} de N, P_2O_5 e K_2O , respectivamente, durante o período de 2004 a 2008, de modo a permitir adequado desenvolvimento das culturas.

No mês de maio/2009, 60 meses após a calagem, 12 amostras simples por unidade experimental foram coletadas (mediante o uso de trado calador) para formar uma amostra composta de solo das camadas de 0 - 5, 5 - 10 e 10 - 20 cm. Depois de coletadas, as amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 40°C durante 48 horas, destorroadas e peneiradas em peneira de malha de 2,0 mm, obtendo-se a terra fina seca em estufa (TFSE).

Amostras de TFSE foram destinadas às determinações analíticas de: (i) pH em solução de cloreto de cálcio (CaCl_2) $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ e acidez total (H^+Al) em solução tampão SMP, por potenciometria, (ii) concentrações de alumínio (Al), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) trocáveis, obtidas mediante extração com solução de cloreto de potássio (KCl) $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ e quantificadas por titulometria, com solução de hidróxido de sódio (NaOH) $0,025 \text{ mol L}^{-1}$, para

Al, e complexometria do etilenodiaminotetraacético $0,025 \text{ mol L}^{-1}$, para Ca e Mg; (iii) potássio (K) trocável e fósforo (P) disponível, obtidos mediante extração com solução Mehlich-1 [ácido clorídrico $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ + ácido sulfúrico $0,025 \text{ mol L}^{-1}$] quantificadas por espectrofotometria de emissão em chama e espectrofotometria de absorção molecular para K e P, respectivamente; (iv) COT por meio do método Walkey-Black; (v) NT mediante digestão sulfúrica e destilação pelo método semi-micro-Kjeldahl (Cantarella et al., 2001); (vi) ponto de efeito salino nulo (PESN), obtido por titulação potenciométrica com soluções combinadas de HCl e NaOH, utilizando-se como eletrólito suporte de solução de cloreto de potássio (KCl) $0,1$, $0,01$ e $0,001 \text{ mol L}^{-1}$ (Alleoni & Camargo, 1994); (vii) delta pH ($\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{H_2O}$), a partir dos valores de pH em água e em solução KCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, obtidos por potenciometria (Camargo et al., 1986); (viii) condutividade elétrica (CE) no extrato aquoso obtido pela TFSE e água ultrapura na relação 2,5 para 1 com agitação, através de condutivimetria. Foram empregados os métodos sugeridos por Pavan et al. (1992) para proceder as determinações de pH, H+Al, Ca, Mg, K, P, e COT.

Os resultados foram submetidos à análise estatística univariada de acordo com o modelo de experimento em blocos completos casualizados em parcelas subdivididas. Equações de regressão (lineares ou quadráticas) foram ajustadas aos atributos químicos do solo de acordo com as doses de calcário (0 , 4 , 8 e 12 Mg ha^{-1}), adotando-se a magnitude do coeficiente de determinação ($p < 0,05$) como critério de escolha de modelo. Os efeitos dos tratamentos secundários (SCA, CCA e CCA+N) foram comparados pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Quando não houve interação significativa entre calagem e tratamentos secundários para os atributos avaliados, os efeitos dos tratamentos foram comparados pela média das observações. Todas as análises estatísticas foram realizadas mediante o emprego do programa estatístico SAS Versão 9.1 (SAS, 2004).

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1. Acidez ativa, total e trocável

Foram observadas interações significativas entre os tratamentos de cobertura de aveia, sem e com adubação nitrogenada (SCA, CCA e CCA+N), e a calagem superficial para o pH (em CaCl_2), 60 meses após a calagem (Tabela 1). Na camada de 0 - 5 cm, o pH aumentou de forma quadrática nos tratamentos SCA e CCA enquanto que no tratamento CCA+N o pH aumentou de forma linear com o incremento das doses de calcário (Figura 1). Nas camadas de 5 - 10 e 10 - 20 cm, a calagem proporcionou aumento linear do pH em SCA, CCA e CCA+N. Os aumentos de pH ocorreram em maior magnitude nas camadas superficiais do solo, o que esta de acordo com resultados de outros estudos relacionados em SPD (CAIRES et al., 2004, 2005)

Nas camadas de 0 - 5 e 5 - 10 cm, o tratamento CCA+N apresentou os menores valores de pH (Figura 1), resultando em aumento linear do pH conforme o incremento das doses de calcário. A nitrificação do NH_4^+ a NO_3^- , produz 2H^+ a cada unidade de NH_4^+ mineral adicionado ao solo (RAIJ, 1991), acidifica o meio favorecendo a dissolução do calcário. O excesso de nitrato não adsorvido nos coloides ou não absorvido pelas plantas podem formar complexos com o Ca^{2+} e Mg^{2+} , lixiviando os pares iônicos $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2^0$ e $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ para camadas subsuperficiais (GEBRIM et al., 2008). Isso pode contribuir, na sequencia, para a exposição dos sítios de adsorção às ligações do H^+ , promovendo maior acidificação do solo. No presente estudo, o efeito acidificante da nitrificação foi mais expressivo na camada de 0 - 5 cm. Esse fato está coerente com as observações de Rosolem et al. (2003). Esses autores observaram que o efeito acidificante da nitrificação ocorreu rapidamente nas camadas superficiais do solo.

A calagem aliado aos tratamentos da aveia preta, com e sem nitrogênio apresentaram interação sobre a acidez total (H+Al) nas camadas de 0 - 5 e 10 - 20 cm (Tabela 1). Na camada de 0 - 5 cm, os tratamentos SCA, CCA e CCA+N apresentaram comportamento quadrático com as doses de calcário (Figura 1). O tratamento CCA+N tem menor ação sobre a redução de H+Al nos tratamentos controle, 4,0 e 8,0 Mg ha⁻¹ devido poder acidificante do adubo nitrogenado aliado ao menor potencial de neutralização da acidez nas doses de calcário para elevação da saturação por bases a 40 e 65 %. Na camada de 5 - 10 cm, não houve interação entre os tratamentos principais e secundários, demonstrando efeito da calagem sobre a redução de H+Al, independentemente dos tratamentos de aveia preta (Figura 1). Apesar de não apresentar interação, o sistema CCA+N apresentou o maior teor médio de H+Al de 78,9 mmol_c dm⁻³ quando comparados aos tratamentos SCA e CCA, que apresentaram 69,3 e 70,2 mmol_c dm⁻³, respectivamente (Tabela 2). Na camada de 10 - 20 cm, foram observadas interações entre as doses de calcário e dos tratamentos de aveia preta (Tabela 1). Houve redução linear nas concentrações de H+Al (Figura 1). No tratamento controle (0 Mg ha⁻¹), o tratamento CCA+N apresentou maior H+Al devido maior acidez observada nos valores de pH na camada de 10 - 20 cm.

Os teores de Al trocável foram influenciados pela interação entre doses de calcário e os tratamentos de cobertura de aveia para as camadas de 0 - 5 e 5 - 10 cm (Tabela 1). O sistema CCA+N apresentou os maiores teores de Al devido o poder acidificante do fertilizante nitrogenado (Figura 1). O tratamento CCA apresentou maiores teores de Al em relação ao SCA. Os maiores teores de Al no tratamento CCA em relação ao SCA podem ser atribuídos às extrações de nutrientes do solo pela aveia preta e o poder acidificante da cobertura vegetal (Figura 1). Na camada de 10 - 20 cm, não houve interação entre doses de calcário e os tratamentos da aveia preta (Tabela 1). A calagem diminuiu linearmente os teores de Al trocável no solo. Menor concentração de Al na camada de 10 - 20 cm foi observado no

tratamento CCA ($8,02 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) enquanto nos tratamentos SCA e CCA apresentaram 9,56 e $8,38 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ respectivamente. Esse efeito pode ser atribuído à capacidade dos compostos orgânicos da aveia preta em complexar o Al, mesmo nas camadas subsuperficiais do solo (FRANCHINI et al., 1999).

A calagem contribuiu para redução do Al trocável no solo, porém, não foram suficientes em aumentar o pH até a faixa de precipitação e complexação total do Al trocável (pH água $\sim 5,5$) (BROWN et al., 2008) na camada de 10 - 20 cm (Figura 2). Por consequência do aumento do pH, ocorre precipitação do Al na forma de hidróxidos de alumínio, proporcional a concentração de H^+ , ou seja, diminui a atividade do Al com a elevação do pH, diminuindo a acidez trocável e total. Esses resultados estão de acordo com observações realizadas por Caires et al. (2005, 2006) e Zambrosi et al. (2007). Os aumentos unitários de pH foram eficientes em reduzir os teores de Al trocável. Por se tratar de valores logarítmicos (escala Log) observa-se reduções expressivas na atividade do Al em todas as camadas estudadas, conforme apresentado por Lindsay (1979).

TABELA 1 - Valores de F dos atributos químicos do solo, 60 meses após a calagem superficial submetido aos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada em cobertura no perfilhamento da aveia (180 kg ha⁻¹ de N)

Camada (cm)	Varição	pH (CaCl ₂)	Acidez total	Alumínio trocável	PESN ⁽⁴⁾	ΔpH ⁽³⁾	Condutividade elétrica	Cálcio trocável	Magnésio trocável	Potássio trocável	CTCe ⁽⁵⁾	Fósforo disponível	Nitrogênio total	Carbono orgânico total
0-5	TP ⁽¹⁾	485,83**	774,55**	530,69**	1,02 ^{NS}	3,77 ^{NS}	68,71**	110,88**	1433,18**	1,30 ^{NS}	114,41**	4,84 ^{NS}	14,92**	12,58**
	TS ⁽²⁾	113,18**	169,74**	31,22**	3,83 ^{NS}	1,78 ^{NS}	15,27**	241,87**	44,67**	3,88*	94,63**	19,76**	117,71**	4,98*
	TP vs. TS	8,72**	10,65**	16,85**	3,20 ^{NS}	3,58 ^{NS}	11,13**	47,98**	16,80**	1,04 ^{NS}	20,82**	5,90 ^{NS}	23,10**	1,35 ^{NS}
5-10	TP ⁽¹⁾	948,26**	142,23**	1759,80**	11,17 ^{NS}	48,81**	4,54 ^{NS}	166,51**	260,88**	1,71 ^{NS}	131,52**	15,51**	3,10 ^{NS}	1,55 ^{NS}
	TS ⁽²⁾	23,77**	19,27**	42,01**	0,27 ^{NS}	11,31**	55,99**	16,34**	17,99**	8,49**	9,43**	2,70 ^{NS}	45,44**	3,10 ^{NS}
	TP vs. TS	6,07**	2,64 ^{NS}	10,20**	1,40 ^{NS}	1,20 ^{NS}	7,43 ^{NS}	3,31*	3,47*	1,61 ^{NS}	1,5 ^{NS}	9,36**	17,98**	7,48 ^{NS}
10-20	TP ⁽¹⁾	94,13**	40,76**	34,85**	2,23 ^{NS}	130,67**	3,95 ^{NS}	42,37**	189,19**	5,39*	16,83**	3,05 ^{NS}	3,84**	13,25**
	TS ⁽²⁾	16,53**	12,14**	5,14*	5,23 ^{NS}	2,88 ^{NS}	58,94**	8,94**	27,27**	5,54*	14,06**	0,39 ^{NS}	7,92**	0,24 ^{NS}
	TP vs. TS	4,50**	3,96*	2,58 ^{NS}	4,55 ^{NS}	1,74 ^{NS}	6,36 ^{NS}	9,07**	15,88**	2,20 ^{NS}	4,11*	1,02 ^{NS}	1,28 ^{NS}	1,57 ^{NS}

⁽¹⁾ TP: tratamento principal (0, 4, 8, 12 Mg ha⁻¹ de calcário)

⁽²⁾ TS: tratamento secundário (sem cobertura de aveia preta, com cobertura de aveia preta, com cobertura de aveia preta adubada com 180 kg ha⁻¹ de nitrogênio mineral)

⁽³⁾ delta pH ($\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{H_2O}$)

⁽⁴⁾ PESN: ponto de efeito salino nulo

⁽⁵⁾ CTCe: capacidade de troca catiônica efetiva (CTCe = Ca + Mg + K + Al)

**: $p < 0,01$

*: $p < 0,05$

^{NS}: não significativo

TABELA 2 - Influência dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos químicos do solo.

Camada (cm)	Tratamento	pH (CaCl ₂)	Acidez total	Alumínio trocável	PESN ⁽⁴⁾	$\Delta pH^{(5)}$	Condutividade elétrica	Cálcio trocável	Magnésio trocável	Potássio trocável	CTCe ⁽⁶⁾	Fósforo disponível	Nitrogênio total	Carbono orgânico total
			---mmol _c dm ⁻³ ---				μS cm ⁻¹		-----mmol _c dm ⁻³ -----			-----mg dm ⁻³ -----		g dm ⁻³
0-5	<i>Cobertura vegetal</i>													
	SCA ⁽¹⁾	5,78	45,38	1,51	3,56	-0,84	127,35	37,13	20,39	4,06	63,09	10,99	1466,26	20,53
	CCA ⁽²⁾	5,60	46,60	2,06	3,61	-0,86	135,26	36,23	19,83	3,94	62,05	8,49	1580,10	22,63
	CCA+N ⁽³⁾	5,11	61,69	3,63	3,47	-0,83	142,39	27,12	15,15	4,50	50,40	9,56	1715,39	21,27
	DMS (α= 0,05)	0,12	2,59	0,72	0,29	0,07	7,03	2,69	1,83	0,55	2,38	1,03	41,95	1,74
	CV (%)	2,07	4,80	28,49	7,75	-7,86	4,94	7,61	9,40	12,57	3,87	10,09	2,51	7,70
5-10	<i>Cobertura vegetal</i>													
	SCA ⁽¹⁾	4,72	69,33	4,17	3,57	-0,91	85,82	20,08	14,51	1,05	39,80	12,36	1133,28	17,65
	CCA ⁽²⁾	4,72	70,23	4,38	3,52	-0,91	100,84	19,51	14,09	1,18	39,16	11,45	1254,47	18,67
	CCA+N ⁽³⁾	4,53	78,95	7,03	3,52	-0,81	104,84	15,07	10,04	1,47	33,60	12,64	1308,39	17,49
	DMS (α= 0,05)	0,08	4,42	0,90	0,25	0,09	4,89	3,45	2,12	0,27	3,79	1,52	48,55	1,32
	CV (%)	1,71	5,76	16,38	6,85	-10,35	4,78	18,00	15,65	20,86	9,59	11,84	3,74	7,00
10-20	<i>Cobertura vegetal</i>													
	SCA ⁽¹⁾	4,28	83,98	8,38	3,65	-0,89	75,93	7,65	7,33	0,61	23,97	4,86	920,46	16,37
	CCA ⁽²⁾	4,37	80,63	8,02	3,69	-0,89	89,02	9,60	9,90	0,69	28,20	4,63	1006,19	16,04
	CCA+N ⁽³⁾	4,24	87,89	9,56	3,54	-0,82	98,08	8,08	6,32	0,86	24,82	4,84	1034,63	16,23
	DMS (α= 0,05)	0,06	3,81	1,30	0,25	0,10	5,29	1,51	1,81	0,20	2,16	0,66	77,05	1,21
	CV (%)	1,33	4,29	14,22	6,67	-10,72	5,73	16,93	21,92	25,77	7,99	13,18	7,41	7,11

⁽¹⁾ SCA: sem cobertura de aveia preta⁽²⁾ CCA: com cobertura de aveia preta⁽³⁾ CCA+N: com cobertura de aveia preta mais 180 kg ha⁻¹ de N na forma de nitrato de amônio, em cobertura no perfilhamento da aveia preta.⁽⁴⁾ delta pH: ($\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{H_2O}$)⁽⁵⁾ PESN: ponto de efeito salino nulo⁽⁶⁾ CTCe: capacidade de troca catiônica efetiva (CTCe = Ca + Mg + K + Al)

CV: coeficiente de variação

DMS: diferença mínima significativa

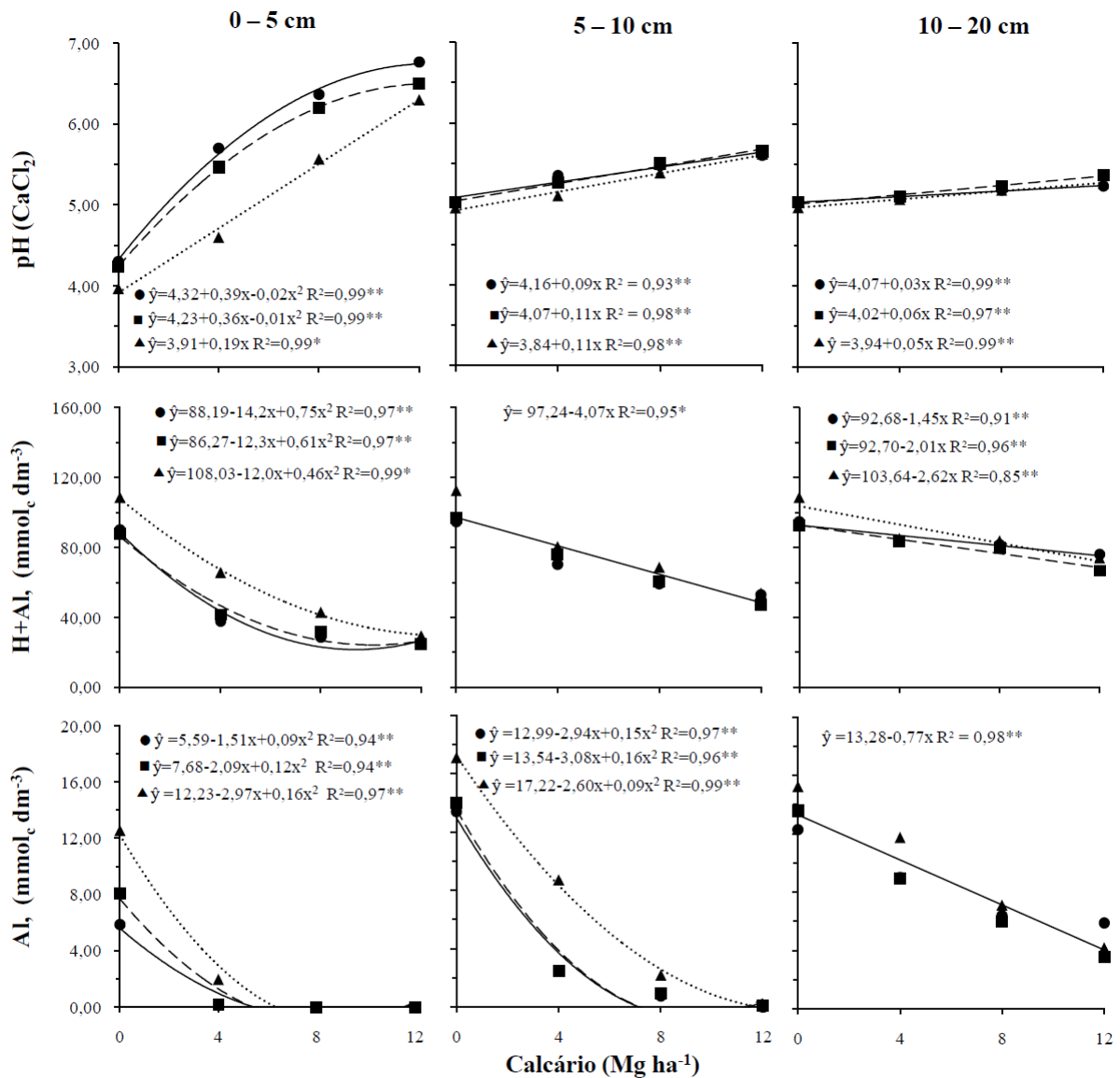


Figura 1 - Influência das doses de calcário e dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos pH (CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹), acidez total (H+Al) e acidez trocável (Al) no solo. (●): sem cobertura de aveia – SCA. (■): com cobertura de aveia – CCA. (▲): com cobertura de aveia + 180 kg ha⁻¹ de N – CCA+N. Pontos são médias de três repetições. *: $p < 0,05$. **: $p < 0,01$.

3.5.2. Ponto de efeito salino nulo, delta pH e condutividade elétrica

Com relação ao ponto de efeito salino nulo (PESN), não houve interação entre doses de calcário e os tratamentos da aveia preta (Tabela 1). O PESN foi mais baixo que os valores de referência para o mineral de argila predominante no solo caulinita com PESN de 4,6, conforme Sparks (2003). Por se tratar de um solo há 30 anos sob SPD, os baixos valores do PESN parecem ser reflexos da melhoria da qualidade do solo proporcionado pelo acréscimo de COT ao longo dos anos, devido ao SPD. O PESN nas camadas de 0 - 5, 5 - 10 e 10 - 20 cm foi de 3,55, 3,54 e 3,63 respectivamente (Figura 2). Esse efeito pode ser atribuído ao incremento das concentrações de COT, que pode ter contribuído a diminuir o PESN (RAIJ, 1973).

Não foram observadas interações entre a calagem e os tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada para o balanço de cargas (Δ pH) (Tabela 1). Houve predomínio de Δ pH negativo nas camadas estudadas (Figura 2). Nas camadas de 0 - 5 cm não houve efeito da calagem sobre o Δ pH. Nas camadas de 5 - 10 e 10 - 20 cm houve acréscimo do Δ pH negativo com o aumento das doses de calcário, efeito linear (Figura 2). O aumento do Δ pH negativo pode ser atribuído à diminuição da acidez ativa e pelo aumento de COT no solo. Nas camadas de 0 - 5 e 10 - 20 cm, não foram observados diferenças significativas entre os tratamentos da aveia preta. Por outro lado, na camada de 5 - 10 cm o tratamento CCA+N obteve o menor valor de Δ pH (-0,81) quando comparados as médias de -0,91 para os tratamentos SCA e CCA (Tabela 2). O menor valor de Δ pH no tratamento CCA+N é atribuído à maior acidez proporcionado pelo uso de altas doses de nitrogênio (180 kg ha^{-1} de N na forma de NH_4NO_3).

Para o atributo condutividade elétrica (CE), foram observadas interações entre as doses de calcário e dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada na camada de 0 - 5 cm (Tabela 1). Na camada de 0 - 5 cm, os tratamentos SCA, CCA e CCA+N

apresentaram comportamento quadrático. No solo sem calcário, o tratamento CCA+N apresentou a maior CE quando comparados aos tratamentos SCA e CCA. Esse efeito pode ser atribuído à adubação nitrogenada devido índice salino do NH_4NO_3 , aproximadamente 105 (ALCARDE, 2007).

Nas camadas de 5 - 10 e 10 - 20 cm não foram observados efeitos da calagem em alterar a CE (Tabela 1). Foi observado efeito dos tratamentos SCA, CCA e CCA+N, independente das doses de calcário em todas as camadas estudadas (Tabela 2). Os maiores valores de CE no tratamento CCA+N pode ser atribuído ao uso do fertilizante nitrogenado na dose de 180 kg ha^{-1} de N. Na camada de 10 - 20 cm não foram observados diferenças na CE com as variáveis estudadas.

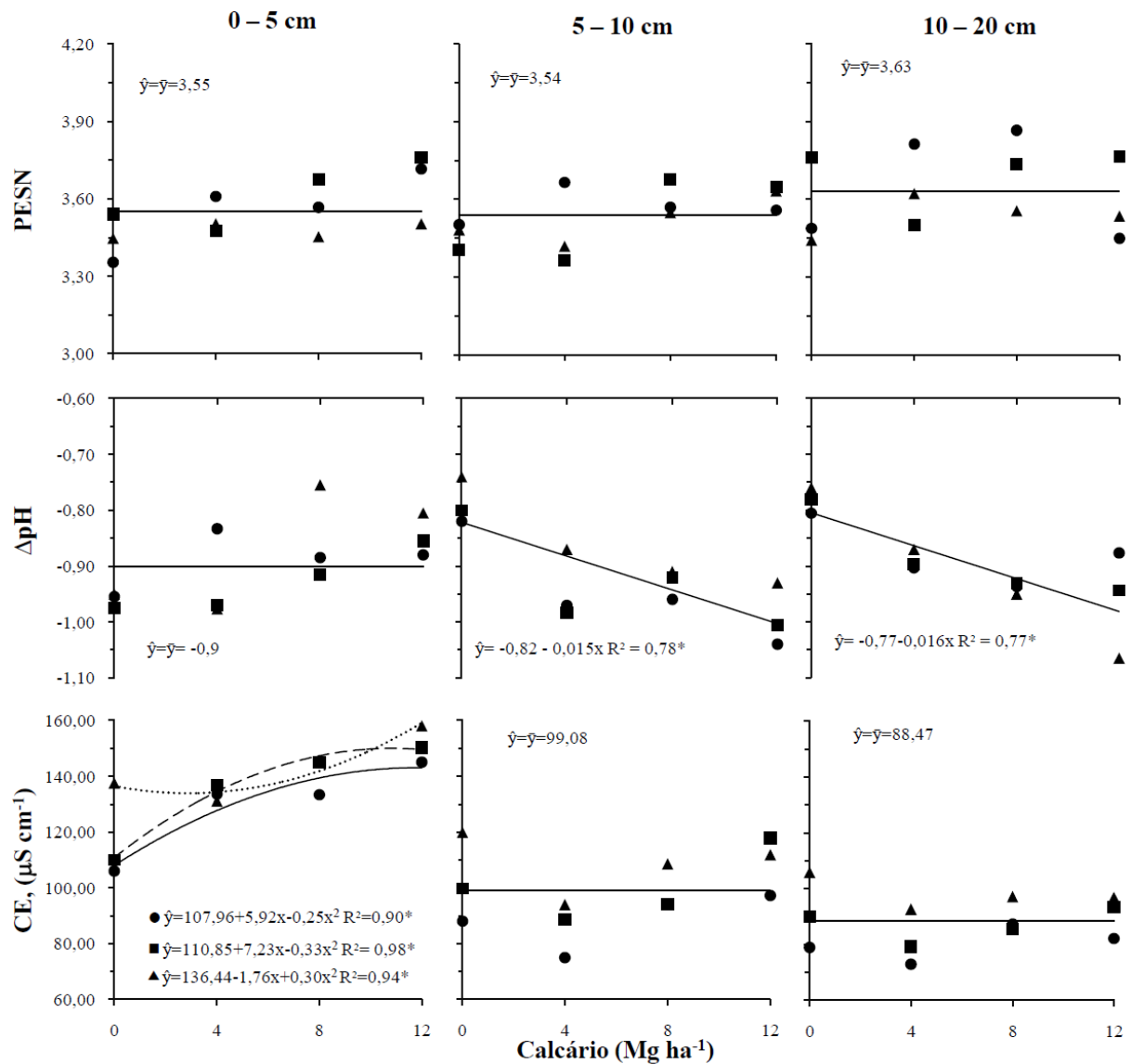


Figura 2 - Influência das doses de calcário e dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos o ponto de efeito salino nulo (PESN), ΔpH ($\Delta pH = pH_{KCl} - pH_{H_2O}$) e condutividade elétrica (CE) no solo. (●): sem cobertura de aveia – SCA. (■): com cobertura de aveia – CCA. (▲): com cobertura de aveia + 180 kg ha⁻¹ de N – CCA+N. Pontos são médias de três repetições. *: $p < 0,05$. **: $p < 0,01$.

3.5.3. Cálcio, magnésio e potássio trocável e capacidade de troca catiônica efetiva

Foram observadas interações entre as doses de calcário e os tratamentos de cobertura vegetal, com e sem adubação nitrogenada (SCA, CCA e CCA+N) para o atributo cálcio trocável (Ca) (Tabela 1). Nas camadas de 0 - 5 e 5 - 10 cm os teores de Ca nos tratamentos SCA e CCA apresentaram efeito quadrático enquanto o tratamento CCA+N apresentou comportamento linear positivo com o aumento das doses de calcário. Na camada de 10 - 20 cm os tratamentos SCA, CCA e CCA+N apresentaram aumento nos teores de Ca trocável com o aumento das doses de calcário, efeito linear positivo.

O tratamento CCA+N apresentou os menores teores de Ca trocável com o aumento das doses de calcário nas camadas de 0 - 5 e 5 - 10 cm. Possivelmente, a acidificação proporcionado pelo processo de nitrificação do NH_4^+ do adubo NH_4NO_3 favoreceu a solubilização do corretivo e da formação de par iônico CaNO_3^0 e MgNO_3^0 , lixiviando Ca e Mg para camadas subsuperficiais. Na camada de 10 - 20 cm, os tratamentos SCA, CCA e CCA+N contribuíram positivamente para o aumento de Ca e Mg (Figura 3).

Por se tratar de um solo sob SPD a movimentação vertical do Ca e Mg podem estar relacionados aos seguintes fatores: (i) ácidos orgânicos de baixo peso molecular dos resíduos vegetais formando complexos orgânicos hidrossolúveis capazes de serem lixiviados. (MIYAZAWA et al., 2002); (ii) a fertilização nitrogenada podendo lixiviar Ca e Mg na forma de nitrato de cálcio e nitrato de magnésio (FOLONI et al., 2006).

Com relação aos teores de K, não houve interação entre as doses de calcário e os tratamentos da aveia preta (Tabela 1). A calagem não alterou os teores de K nas camadas de 0 - 5 e 5 - 10 cm, mas diminuiu linearmente as concentrações deste nutriente na camada de 10 - 20 cm (Figura 3). Na camada de 0 - 5 cm o tratamento CCA+N apresentou o maior teor de K ($4,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em relação aos tratamentos SCA ($4,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e CCA ($3,9 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Tabela 2). Comportamento similar foi observado na camada de 5 - 10 cm, tendo o tratamento

CCA+N maior teor de K ($1,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) enquanto os tratamentos SCA ($1,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e CCA ($1,2 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (tabela 2). Na camada de 10 - 20 cm observou-se redução dos teores de K em função do aumento das doses de calcário, efeito linear negativo. Apesar de os teores de K diferirem entre os tratamentos, observa-se a mesma faixa de fertilidade para cada camada estudada, não contribuindo para alterações agronômicas significativas.

Em relação ao atributo capacidade de troca catiônica (CTCe), foram observadas interações entre as doses de calcário e os tratamentos SCA, CCA e CCA+N para as camadas de 0 - 5 e 10 - 20 cm (Tabela 1). Na camada de 0 - 5 cm, os sistemas SCA e CCA apresentaram comportamento quadrático da CTCe com as doses de calcário (Figura 3). Esses efeitos podem ser atribuídos a menor reatividade do calcário nas doses 8 e 12 Mg ha^{-1} , devido redução do potencial de solubilização do calcário com aumento do pH. O tratamento CCA+N apresentou efeito linear positivo (Figura 3), devido diminuição de Ca e Mg trocáveis e potencial de acidificação gerado pelo adubo nitrogenado nas doses intermediárias de calcário. Na camada de 5 - 10 cm houve aumento linear da CTCe devido a calagem (Figura 3). Na camada de 5 - 10 cm, o tratamento CCA+N apresentou a menor CTCe de $33,60 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$, quando comparados aos tratamentos SCA ($39,80 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e CCA ($39,16 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Tabela 2). Na camada de 10 - 20 cm, a CTCe dos tratamentos CCA e CCA+N apresentaram efeito quadrático em função da calagem (Figura 3). A aveia preta favoreceu aumento da CTCe devido ao aumento e manutenção de COT no solo. Por outro lado, no sistema SCA, a CTCe não foi afetada pela calagem. Isso pode ser atribuído ao menor potencial de mobilidade dos produtos da reação do calcário em solos com menor aporte de COT (AMARAL et al., 2004).

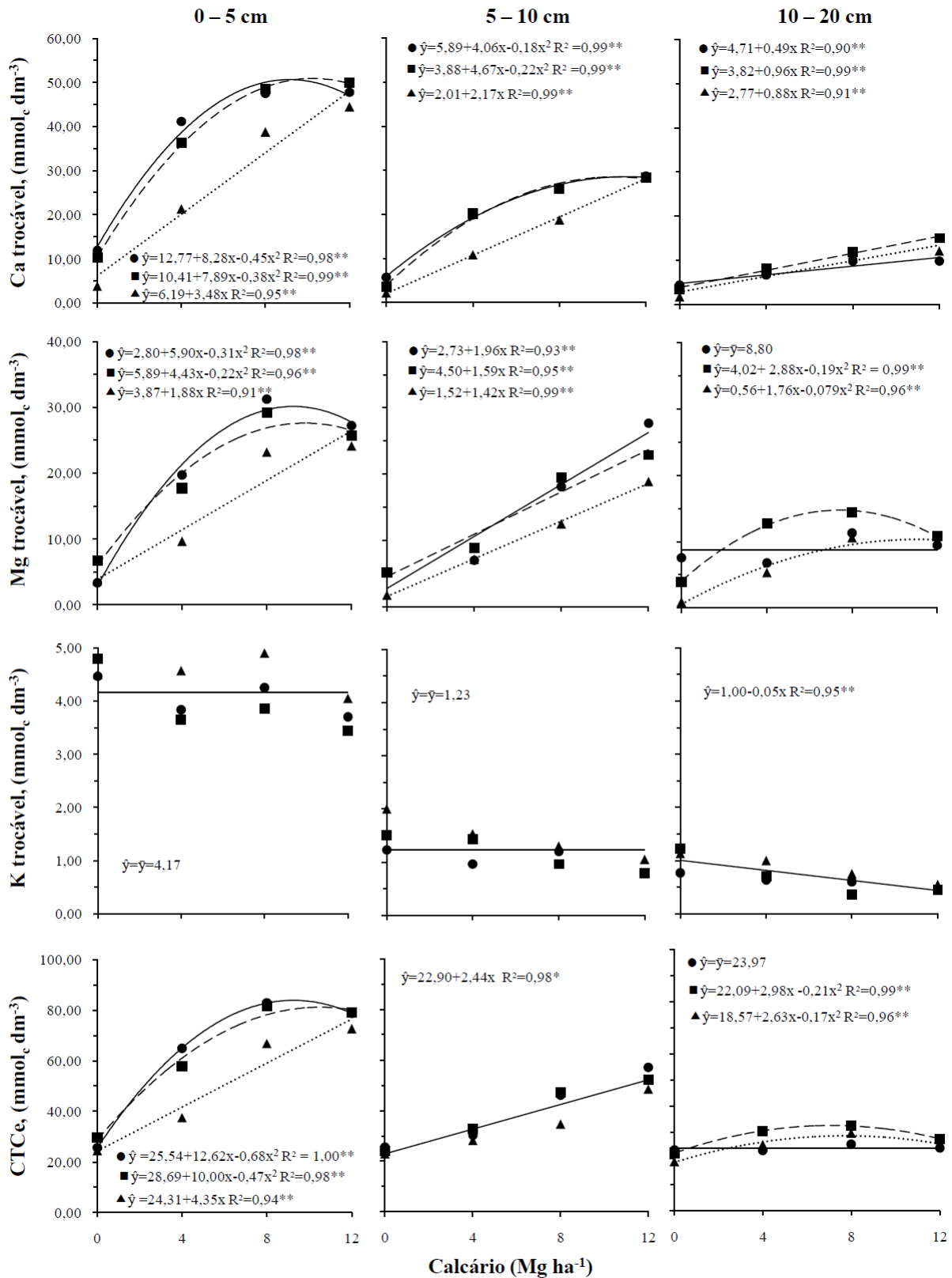


Figura 3 - Influência das doses de calcário e dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) trocável e capacidade de troca catiônica efetiva (CTCe) no solo. (●): sem cobertura de aveia – SCA. (■): com cobertura de aveia – CCA. (▲): com cobertura de aveia + 180 kg ha⁻¹ de N – CCA+N. Pontos são médias de três repetições. *: $p < 0,05$. **: $p < 0,01$.

3.5.4. Fósforo disponível, carbono orgânico total e nitrogênio total

Foram observadas interações entre as doses de calcário e os tratamentos SCA, CCA e CCA+N para o atributo fósforo (P) disponível na camada de 5 - 10 cm. Na camada de 5 - 10 cm, os tratamentos SCA e CCA+N apresentaram comportamento quadrático e linear negativo, respectivamente (Figura 4). Nas camadas de 0 - 5 e 10 - 20 cm não houve alterações nos teores de P em função das doses de calcário (Tabela 1).

Na camada de 5 - 10 cm o efeito quadrático observado no tratamento SCA é devido os altos teores de P encontrados no tratamento 0 Mg ha⁻¹ de calcário. Por se tratar de um solo com alta acidez e sem cultivo de culturas de inverno, os maiores teores de P no tratamento SCA em relação aos tratamentos CCA e CCA+N pode ser atribuído a menor exportação de P pelas culturas e ciclagem pela aveia preta. No tratamento CCA, não houve interação com a calagem, apresentando teor médio de 11,45 mg dm⁻³. Houve redução linear dos teores de P no tratamento CCA+N (Figura 4). A calagem, principalmente nas doses de 8 e 12 Mg ha⁻¹ de calcário e da adubação nitrogenada contribuem para melhoria da fertilidade do solo e do desenvolvimento das culturas, favorecendo a ciclagem e absorção dos nutrientes, inclusive P.

A calagem proporcionou incremento de carbono orgânico total (COT) após 60 meses, resultou em aumento linear das concentrações de COT nas camadas de 0 - 5 e 10 - 20 cm (Figura 4). Na camada de 5 - 10 cm não foi observado efeito da calagem sobre os teores de COT (Tabela 1). O aumento da concentração de COT nessas camadas podem ser atribuídos a melhoria de fertilidade do solo em função da calagem e redução da acidez do solo com aumento das doses de calcário.

Na camada de 0-5 cm os tratamentos CCA e CCA+N apresentaram os maiores teores de COT, 22,63 e 21,27 g dm⁻³ respectivamente, enquanto o tratamento SCA apresentou concentração média de 20,53 g dm⁻³ (Tabela 2). A aveia preta contribuiu para o aumento das concentrações de COT, demonstrando importância da aveia preta como planta de cobertura.

Com relação ao atributo NT, houve interação da calagem e dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre as concentrações de NT nas camadas de 0 - 5 e 5 - 10 cm (Tabela 1). Nas camadas de 0 - 5 e 5 - 10 cm o tratamento CCA+N apresentou aumento linear dos teores de NT com aumento das doses de calcário (Figura 4). Os tratamentos SCA e CCA não apresentaram efeitos significativos sobre as doses de calcário, tendo 1479,4 e 1580,1 mg dm⁻³ respectivamente. O aumento de NT em CCA+N pode ser atribuído ao ambiente favorável ao aporte de COT através do adubo nitrogenado e da calagem, consequentemente o aumento dos teores de NT.

Na camada de 10 - 20 cm, houve incremento dos teores de NT com o aumento das doses de calcário. Esse efeito é atribuído ao incremento de COT nessa camada (Figura 4) devido melhoria da fertilidade do solo. Os tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada apresentaram efeitos distintos, independente da calagem (Tabela 1). Os tratamentos CCA e CCA+N apresentaram 1006,2 e 1034,6 mg dm⁻³ respectivamente enquanto o sistema SCA apresentou o menor teor de 920,5 mg dm⁻³ (Tabela 2). Esse efeito pode ser atribuído ao aporte de COT pelos tratamentos com cobertura de aveia no inverno e consequente aumento nos teores de COT e NT nessa camada.

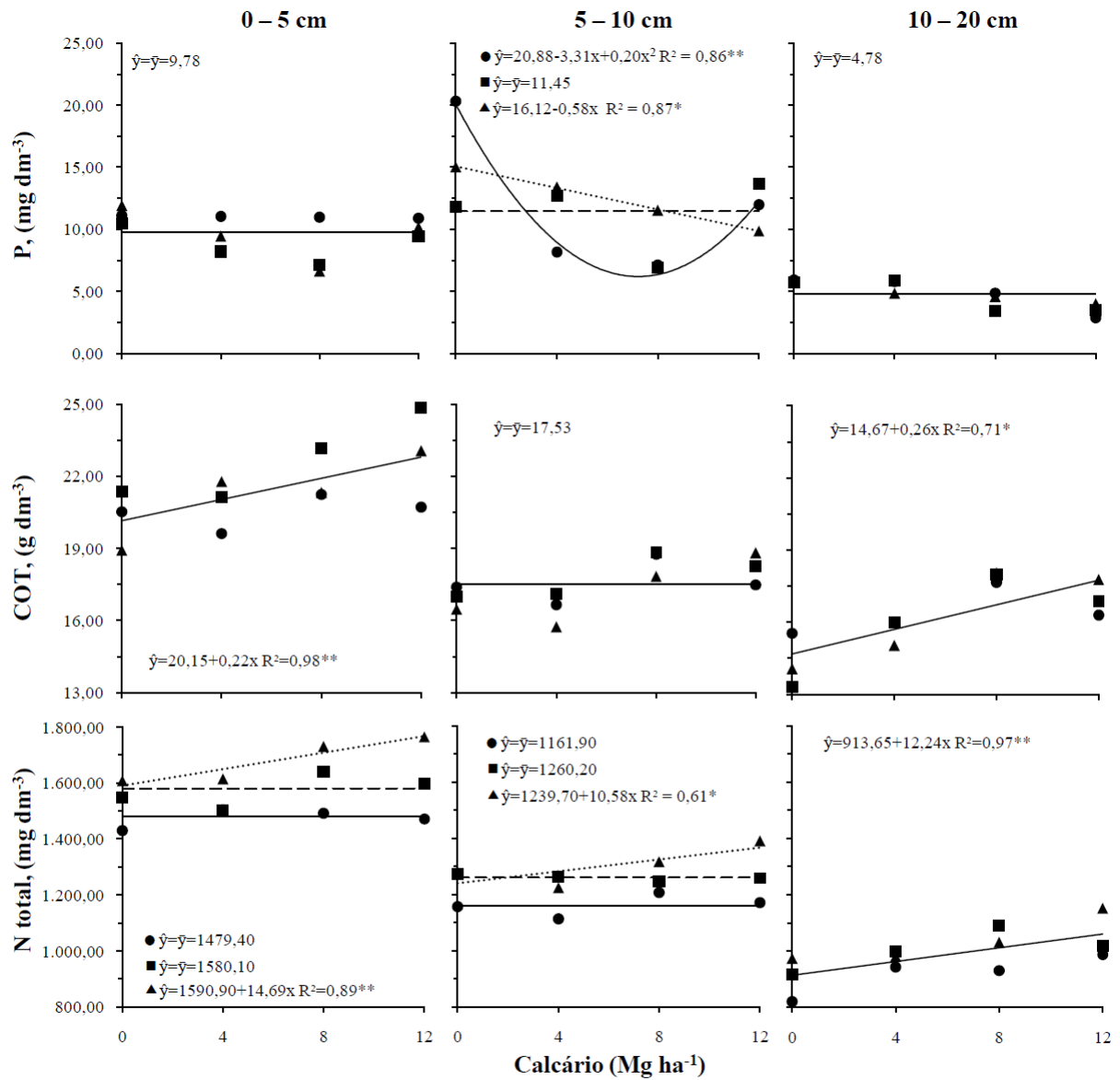


Figura 4 - Influência das doses de calcário e dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos fósforo disponível (P Mehlich-1), carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) no solo. (●): sem cobertura de aveia – SCA. (■): com cobertura de aveia – CCA. (▲): com cobertura de aveia + 180 kg ha⁻¹ de N – CCA+N. Pontos são médias de três repetições. *: $p < 0,05$. **: $p < 0,01$.

3.6. CONCLUSÕES

A calagem superficial no sistema plantio direto proporcionou correção da acidez, aumento de Ca e Mg trocáveis em todas as camadas estudadas, evidenciando ser uma prática importante para garantir a qualidade química do solo.

Quando altas doses de nitrato de amônio foram aplicadas na aveia preta, ocorreu aumento da acidificação do solo e redução dos teores de Ca e Mg trocáveis na camada de 0 - 5 e 5 - 10 cm.

A calagem e a cobertura de aveia preta, sem e com aplicação de N, favoreceram o acúmulo de COT e NT em todas as camadas estudadas.

Os tratamentos com aveia preta proporcionaram incremento de pH, CE, Ca, Mg e NT na camada de 10-20 cm, evidenciando a importância da cobertura vegetal para o melhoria da fertilidade do solo.

Os atributos PESN, Δ pH e CE, pouco variaram, porém os valores dos atributos eletroquímicos obtidos foram adequados ao manejo do solo no SPD.

4. QUALIDADE FÍSICA DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO APÓS CALAGEM SUPERFICIAL, COBERTURA VEGETAL E FERTILIZAÇÃO NITROGENADA

4.1. RESUMO

Pouco se tem estudado a respeito dos efeitos da calagem superficial sobre os atributos físicos do solo no sistema plantio direto (SPD) consolidado. Objetivou-se, neste trabalho, mensurar os efeitos da calagem superficial e da cobertura vegetal, sem e com adubação nitrogenada nos principais atributos físicos do solo manejado no SPD por longo período (30 anos). O estudo foi realizado no município de Ponta Grossa (PR), empregando-se delineamento experimental de blocos completos ao acaso, com parcelas subdivididas. O solo estudado foi um Latossolo Vermelho textura média. As parcelas receberam calagem superficial (controle, 4, 8 e 12 Mg ha⁻¹) em maio/2004. Nas subparcelas, foram empregados os seguintes tratamentos: sem cobertura de aveia preta (SCA); com cobertura de aveia preta (CCA) e com cobertura de aveia fertilizada anualmente com 180 kg ha⁻¹ de nitrogênio mineral (CCA+N). Em maio de 2009, 60 meses após o início do experimento, foram coletadas amostras de solo indeformados das camadas de 0 - 10 e 10 - 20 cm, visando à determinação dos atributos: macroporosidade, microporosidade, porosidade total (PT) e densidade do solo (Ds). Também foram coletados blocos de solo para a determinação da resistência tênsil de agregados (RT). Os tratamentos com aveia preta aliada a calagem superficial reduziu a macroporosidade e contribuiu para o aumento da RT na camada de 0 - 10 cm. Verificou-se que na dose de 8 Mg ha⁻¹ de calcário aliado aos tratamentos com e sem aveia preta aumentaram a microporosidade do solo na camada de 0 - 10 cm. A calagem associado aos tratamentos da aveia preta reduziu a macroporosidade e aumento da microporosidade na camada de 10 - 20 cm.

Palavras-chave: solo tropical, calcário dolomítico, planta de cobertura do solo, agricultura conservacionista.

SOIL PHYSICAL QUALITY UNDER NO-TILL SYSTEM AFTER SURFACE LIMING, COVER CROP AND NITROGEN FERTILIZATION

4.2. ABSTRACT

Regard to liming effects on soil physical attributes under no-till system (NTS), much has been hypothesized about this subject, but little are the studies. In this work, we measure the surface liming, cover crop management and mineral nitrogen fertilization effects on the major soil physical attributes. The experiment was carried out in Ponta Grossa, Parana State, Brazil, on a loamy, kaolinitic, thermic Typic Hapludox managed 30 years under NTS. A randomized complete block design was used in a split-plot arrangement. The main plots consisted of dolomite lime applied on soil surface without incorporation (control, 4, 8 and 12 Mg ha⁻¹) in May 2004. The subplots were represented by winter crop management: without black oat cover crop (SCA); with black oat cover crop (CCA) and black oat fertilized with 180 kg ha⁻¹ of mineral nitrogen (CCA+N). In May 2009, 60 months after the experiment established, samples undisturbed were taken from 0 - 10 and 10 - 20 cm layers and performed to macroporosity, microporosity, total porosity (TP) and bulk density (BD)]. Samples blocks of soil were also collected to measure the tensile strength of aggregates (TS). The treatments with black oat combined with liming reduced the macroporosity and contributed to the increase in RT at 0 - 10 cm. It was found that the lime in the level of 8 Mg ha⁻¹ combined with lime and without black oat increased the microporosity at the layer 0 - 10 cm of the soil. In the layer 10 - 20 cm, the limestone associated with treatments of oat reduced macroporosity and increase microporosity of the soil.

Keywords: tropical soil, dolomitic lime, soil cover crop, conservation agriculture.

4.3. INTRODUÇÃO

Nos solos tropicais altamente intemperizados, com predomínio de óxidos de ferro e alumínio na fração argila, os efeitos da floculação e dispersão são mais expressivos nas propriedades físico-químicas dos argilominerais do tipo 1:1 (CHAVES et al., 1997; ALBUQUERQUE et al., 2003). Essas modificações são observadas na dupla camada difusa, onde as cargas elétricas presentes na superfície coloidal apresentam maiores variações decorrentes de alterações químicas do solo (SPARKS 1999).

A aplicação superficial de calcário, prática imprescindível para o aumento do rendimento de grãos no sistema plantio direto (SPD) (CAIRES et al., 2005), resulta em gradiente de correção da acidez entre as camadas superficiais e subsuperficiais (GATIBONI et al., 2003). O calcário, após sofrer hidrólise aniônica, resulta na formação de íons hidroxila (OH^-) e aumento nos teores de cálcio (Ca^{2+}). A hidroxila reage com prótons (H^+), resultando no aumento do potencial hidrogênioônico (pH) do meio e com o alumínio livre (Al^{3+}) ou complexado, precipita-se na forma de $\text{Al}(\text{OH})_3^0$. O íon Ca^{2+} é adsorvido nos sítios de troca anteriormente ocupado pelos íons H^+ e Al^{3+} , ocorrendo então, um desequilíbrio das cargas superficiais dos colóides (ALBUQUERQUE et al., 2003). Esses efeitos podem resultar em mudanças nos atributos físico-químicos e desestabilizar a estrutura física do solo, favorecendo o desequilíbrio do sistema, principalmente, devido ao efeito gradual do carbonato de cálcio (GODSEY et al., 2007). Em um Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa, por exemplo, a prática da calagem superficial ocasionou: (i) redução e aumento da macro e a microporosidade do solo, respectivamente; (ii) aumento da densidade e da dispersão dos microagregados; (iii) formação de uma zona de compactação no solo, devido ao rearranjo dos agregados e à redução dos espaços porosos responsáveis pela permeabilidade do solo (SPERA et al., 2008).

A cobertura vegetal e a adição de fertilizante nitrogenado mineral resultam em maior concentração de H^+ , favorecendo a dissolução do corretivo (CAIRES, 2007). Esses efeitos podem proporcionar, ao longo dos anos, gradiente no aporte de fitomassa e acúmulo de carbono, resultando em rearranjo das partículas do solo e alteração nos atributos físicos (SIX et al., 1999). Porém, pouco se conhece sobre os efeitos da calagem superficial sobre os atributos físicos do solo no SPD consolidado.

Objetivou-se, neste trabalho, mensurar os efeitos da calagem superficial e da cobertura vegetal, sem e com nitrogênio, sobre os principais atributos físicos do solo em experimento de longo prazo no SPD.

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em maio/2004 na Fazenda Estância dos Pinheiros (latitude: 25°05'58"S; longitude: 50°09'30"W; altitude: 970 m), no município de Ponta Grossa (PR), em um Latossolo Vermelho distrófico manejado há 30 anos no SPD. O clima do local, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfb, caracterizado por apresentar médias anuais de temperatura e de precipitação pluvial de 18°C e 1550 mm, respectivamente (CAVIGLIONI et al., 2000).

Por ocasião da instalação do experimento, o solo possuía os seguintes atributos na camada de 0-20 cm: pH ($CaCl_2$) de 4,1; 110,12; 5,5, 1,7 e 121,7 $mmol_c\ dm^{-3}$ de acidez total (H+Al), alumínio (Al), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) trocáveis e capacidade de troca de cátions (CTC) a pH 7,0, respectivamente; saturação por base de 9,6 %; Carbono orgânico total (COT) de 18 $g\ dm^{-3}$; 295, 240 e 465 $g\ kg^{-1}$ de argila, silte e areia, respectivamente. A fração argila desse solo continha 265,8, 2,4 e 26,8 $g\ kg^{-1}$ de caulinta, hematita e goethita, respectivamente (CAIRES et al., 2005).

O delineamento experimental empregado foi o de blocos completos casualizados em parcelas subdivididas com três repetições. Nas parcelas (6,5 x 32,0 m), foram empregados os tratamentos controle (sem calcário), 4, 8 e 12 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico [que apresentava 31 e 23 g kg⁻¹ de óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO), respectivamente e poder relativo de neutralização total (PRNT) de 85%] visando elevar a saturação por bases a 40, 65 e 90% na camada de 0 - 20 cm. Nas subparcelas (6,5 x 6,4 m) foram empregados os seguintes tratamentos: (i) sem cobertura de aveia preta (SCA), (ii) com cobertura de aveia preta (CCA) e (iii) com cobertura de aveia preta [*Avena strigosa* (Schreb)] adubada com nitrogênio mineral (CCA+N). O calcário foi aplicado em uma única vez, no mês de maio/2004, a lanço na superfície do solo, sem incorporação. A adubação nitrogenada da aveia preta foi realizada anualmente, na dose de 180 kg ha⁻¹ de N na forma de nitrato de amônio (NH₄NO₃) em cobertura, por ocasião do perfilhamento da cultura (aproximadamente 30 dias após a emergência).

Após a aplicação do calcário, procederam-se os seguintes cultivos: aveia preta na estação de outono-inverno dos anos de 2004-2008; milho (*Zea mays* L.) na estação de primavera-verão dos anos de 2004/05 e 2008/09; soja [*Glycine max* (L.) Merr.] nas estações de primavera-verão dos anos de 2005/06, 2006/07 e 2007/08). As adubações foram realizadas de acordo com as análises de solo, totalizando-se, apenas na estação de primavera-verão, 273, 310 e 285 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅, K₂O, respectivamente, durante o período de 2004 a 2008, de modo a permitir adequado desenvolvimento das culturas.

No mês de maio/2009, 60 meses após a calagem, amostras de solo com estrutura indeformada (cinco repetições por unidade experimental) foram coletadas em anéis cilíndricos de aço inox com volume de 100 cm³, no centro das camadas de 0 - 10 e 10 - 20 cm de profundidade. Após a toaleta, as amostras foram lentamente umedecidas por elevação gradual de uma lâmina de água até completa saturação das mesmas.

O volume total de poros foi determinado pela expressão preconizada por Danielson & Sutherland (1986). A distribuição de poros por tamanho (macro e microporosidade) foi determinada nas amostras com estrutura indeformada, utilizando-se a unidade de sucção a 60 cm de altura de coluna de água (6,0 kPa). A porcentagem de água retida nas amostras, depois de atingido o equilíbrio, correspondeu à microporosidade, sendo a macroporosidade obtida por diferença (GROHMANN, 1960). As amostras indeformadas foram secas em estufa a 105°C e, após, procederam-se as determinações do conteúdo de água volumétrico (θ_{cc}) e densidade do solo (D_s) (BLAKE & HARTGE, 1986).

Também foram coletados blocos de solo visando quantificar a resistência tênsil (RT) de agregados, nas camadas de 0 - 10 e 10 - 20 cm (duas repetições por unidade experimental). Os blocos foram secos ao ar e manualmente desagregados. Foram obtidos 60 agregados de diâmetro entre 12,5 - 19,0 mm por amostra, previamente padronizados com o auxílio de peneiras de latão. A resistência tênsil foi mensurada utilizando-se o procedimento descrito por Imhoff et al. (2002) e testado por Giarola et al. (2003). Desse modo, a RT dos agregados (Y_{max}) foi calculada pela equação: $[Y_{max}=0,576*(P/D^2)]$. Sendo: 0,576 a constante de proporcionalidade que reflete a relação entre o estresse compressivo aplicado e o estresse tênsil gerado no interior do agregado, P a força (N/cm^2) aplicada para o rompimento do agregado (60 agregados por parcela) mensurado através de um dinamômetro e D o diâmetro efetivo: $[D=D_m(M/M_0)^{1/3}]$ sendo D_m o diâmetro médio do agregado (mm); M é a massa do agregado individual (g); e M_0 é a massa média dos agregados na população (g). O diâmetro médio dos agregados (D_m) foi considerado igual à média dos tamanhos das peneiras $[(19 + 12,5)/2]$ utilizadas para selecionar os agregados. (Watts & Dexter, 1998). A análise comparativa entre os diferentes tratamentos e camadas foram realizadas de acordo com Giarola et al. (2003).

Os resultados foram submetidos à análise estatística univariada de acordo com o modelo em blocos completos casualizados com parcela subdividida. Equações de regressão (lineares ou quadráticas) foram ajustadas aos atributos químicos do solo de acordo com as doses de calcário (0, 4, 8 e 12 Mg ha⁻¹), adotando-se a magnitude do coeficiente de determinação ($P < 0,05$) como critério para a escolha do modelo. Os efeitos dos tratamentos secundários (SCA, CCA e CCA+N) foram comparados pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Quando não houve interação significativa entre calagem e tratamentos secundários para os atributos avaliados, os efeitos dos tratamentos foram comparados pela média das observações. Todas as análises estatísticas foram realizadas mediante o emprego do programa estatístico SAS Versão 9.1 (SAS, 2004).

4.5. RESULTADOS

Foram observadas interações entre doses de calcário e os tratamentos da aveia preta para a macroporosidade (Tabela 3). Na camada de 0 - 10 cm, houve os seguintes efeitos com aumento das doses de calcário: (i) efeito não significativo no tratamento SCA; (ii) efeito linear negativo no tratamento CCA; (iii) diminuição linear no tratamento CCA+N (Figura 5). Na camada de 10 - 20 cm, a calagem diminuiu a macroporosidade no tratamento CCA e não alterou este atributo nos tratamentos SCA e CCA+N (Figura 5). No entanto, a macroporosidade média do tratamento SCA foi menor que no sistema CCA+N, correspondendo a 13,8 e 14,5%, respectivamente (Figura 5).

Com relação à microporosidade, houve interação das doses de calcário e dos tratamentos da aveia preta. Foram observados efeitos quadráticos das doses de calcário sobre esse atributo. Na camada de 0 - 10 cm, os tratamentos SCA, CCA e CCA+N apresentaram maior percentual de microporos na dose de 8 Mg ha⁻¹ de calcário (Figura 5). Na camada de 10

- 20 cm, houve aumento linear da microporosidade em todos os tratamentos da aveia preta (Figura 5).

Não houve interação entre as doses de calcário e dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada para o atributo porosidade total (PT) (Tabela 3). Na camada de 0 - 10 cm os tratamentos SCA, CCA e CCA+N apresentaram resultados distintos. O tratamento SCA apresentou à menor PT de 33,71 %, enquanto os tratamentos CCA e CCA+N apresentaram PT de 34,32 e 34,96%, respectivamente (Tabela 4). Na camada de 10 - 20 cm, não foi observado efeitos das variáveis estudadas, tendo PT médio de 33,34%.

TABELA 3 - Valores de F dos atributos físicos do solo, 60 meses após a calagem superficial submetido aos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada em cobertura no perfilhamento da aveia (180 kg ha⁻¹ de N)

Camada (cm)	Varição	Macroporosidade	Microporosidade	Porosidade Total	Densidade do Solo	Resistência tênsil de agregados
0-10	TP ⁽¹⁾	26,40**	86,12**	24,09 ^{NS}	1,71 ^{NS}	70,43**
	TS ⁽²⁾	8,34**	3,74*	6,98**	5,85*	7,81**
	TP vs. TS	91,05**	2,98*	21,35 ^{NS}	6,33**	17,12**
10-20	TP ⁽¹⁾	1,84 ^{NS}	5,31*	3,80 ^{NS}	1,39 ^{NS}	3,32 ^{NS}
	TS ⁽²⁾	6,51**	4,21*	1,40 ^{NS}	4,79 ^{NS}	11,35**
	TP vs. TS	4,16*	5,00**	1,63 ^{NS}	9,46 ^{NS}	1,86 ^{NS}

⁽¹⁾ TP: tratamento principal (0, 4, 8, 12 Mg ha⁻¹ de calcário)

⁽²⁾ TS: tratamento secundário (sem cobertura de aveia preta, com cobertura de aveia preta, com cobertura de aveia preta adubada com 180 kg ha⁻¹ de nitrogênio mineral)

** : $p < 0,01$

* : $p < 0,05$

^{NS} : não significativo

A calagem e os tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada apresentaram interação no atributo densidade do solo (Ds) (Tabela 3). Na camada 0 - 10 cm o tratamento CCA+N apresentou comportamento quadrático, sendo na dose de 12 Mg ha⁻¹ de calcário a maior Ds (Figura 6). Os tratamentos SCA e CCA não apresentaram diferenças com o aumento das doses de calcário, porém, apresentaram Ds média diferentes, 1,39 e 1,36 kg

dm⁻³, respectivamente (Figura 6). Na camada 10 - 20 cm, não houve interação das doses de calcário e os tratamentos da aveia preta (Tabela 3).

Na camada de 0 - 10 cm, houve interação da calagem e dos tratamentos da aveia preta para o atributo RT de agregados (Tabela 3). Houve aumentos lineares da RT nos tratamentos CCA e CCA+N com as doses de calcário (Figura 6). Esses tratamentos apresentaram menor RT dos agregados nas parcelas sem calcário em relação ao tratamento SCA. Para a camada de 10 - 20 cm, não foram observados efeitos da calagem sobre a RT (Tabela 3). Nessa camada a RT apresentou efeito dos tratamentos da aveia preta (Tabela 3). O tratamento CCA+N apresentou a menor RT, apresentando 51,90 kPa enquanto a RT nos tratamentos SCA e CCA apresentaram 69,01 e 63,33 kPa, respectivamente (Tabela 4).

TABELA 4 - Influência dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos físicos do solo.

Camada (cm)	Tratamento	Macroporosidade	Microporosidade	Porosidade total	Densidade do solo	Resistência tênsil de Agregados
		-----%-----			kg dm ⁻³	kPa
0-10	<i>Cobertura vegetal</i>					
	SCA	12,95	20,76	33,71	1,39	53,32
	CCA	13,45	20,87	34,32	1,36	48,40
	CCA+N	13,46	21,50	34,96	1,37	48,89
	DMS ($\alpha= 0,05$)	0,37	0,75	0,86	0,02	3,54
	CV (%)	2,64	3,37	2,38	1,39	6,70
10-20	<i>Cobertura vegetal</i>					
	SCA	13,76	19,14	32,90	1,41	60,01
	CCA	13,48	19,56	33,04	1,39	63,33
	CCA+N	14,54	18,65	33,60	1,38	51,90
	DMS ($\alpha= 0,05$)	0,79	0,81	1,13	0,03	6,37
	CV (%)	5,35	4,02	3,24	1,72	10,35

⁽¹⁾ SCA: sem cobertura de aveia preta

⁽²⁾ CCA: com cobertura de aveia preta

⁽³⁾ CCA+N: com cobertura de aveia preta mais 180 kg ha⁻¹ de N na forma de nitrato de amônio aplicada em cobertura no perfilhamento da aveia

CV: coeficiente de variação

DMS: diferença mínima significativa

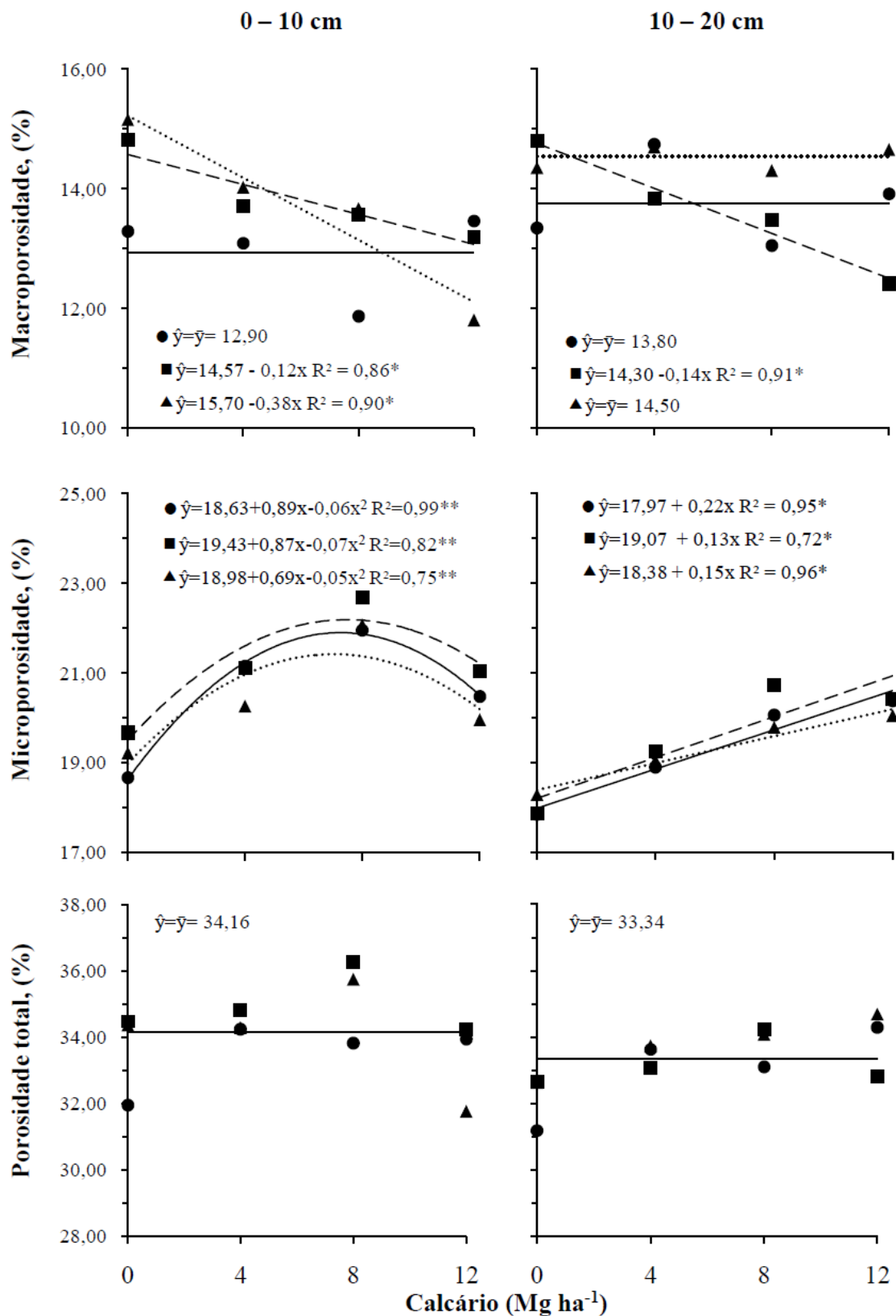


Figura 5 - Influência das doses de calcário e dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos macroporosidade, microporosidade e porosidade total do solo. (●): sem cobertura de aveia – SCA. (■): com cobertura de aveia – CCA. (▲): com cobertura de aveia + 180 kg ha⁻¹ de N – CCA+N. Pontos são médias de três repetições. *: $p < 0,05$. **: $p < 0,01$.

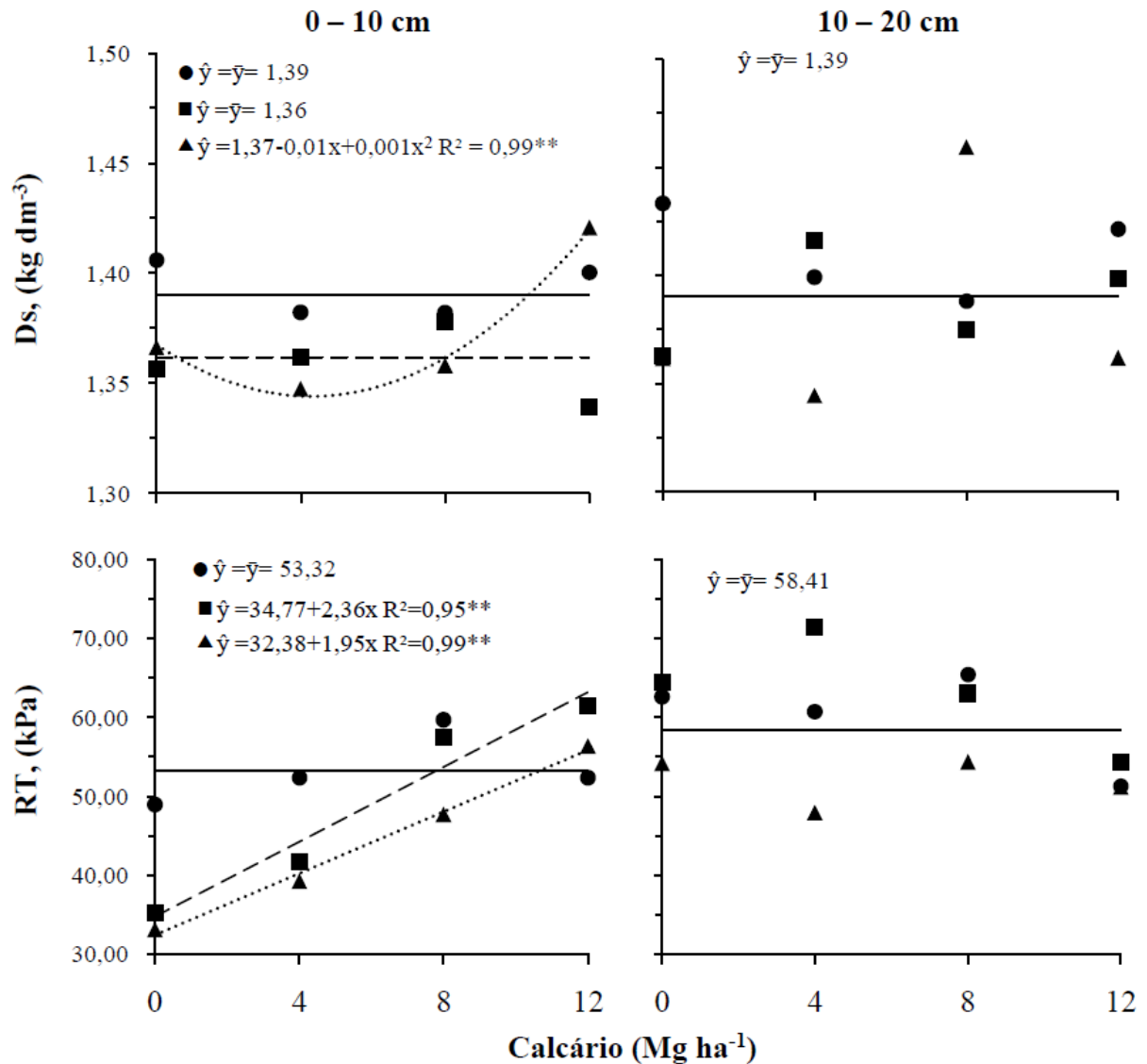


Figura 6 - Influência das doses de calcário e dos tratamentos da aveia preta, com e sem adubação nitrogenada sobre os atributos densidade do solo (Ds) e resistência tênsil de agregados (RT) do solo. (●): sem cobertura de aveia – SCA. (■): com cobertura de aveia – CCA. (▲): com cobertura de aveia + 180 kg ha⁻¹ de N – CCA+N. Pontos são médias de três repetições. *: $p < 0,05$. **: $p < 0,01$.

4.6. DISCUSSÃO

A redução da macroporosidade nos tratamentos CCA e CCA+N na camada de 0 - 10 cm (Figura 5), pode ser atribuída à precipitação do Al e ao aumento das concentrações de Ca e Mg trocáveis no solo. O aumento de Ca e Mg podem contribuir para o aumento da afinidade de água e da espessura da dupla camada difusa, reduzindo a estabilidade das ligações entre partículas coloidais do solo (BRONICK & LAL, 2005).

No tratamento SCA da camada de 0 - 10 cm, a macroporosidade média foi de 12,90%. Nesse tratamento a exposição do solo durante a estação de outono-inverno pode favorecer os processos de umedecimento e secagem (BRAGAGNOLO & MIELNICZUK, 1990). Esse efeito pode contribuir no rearranjo de agregados para formação de estruturas melhor definidas (DENEFF et al., 2002), reduzindo os efeitos eletroquímicos que contribuem para alterações nas estruturas do solo (MAJDALANI et al., 2008).

Nos tratamentos CCA e CCA+N da camada de 0 - 10 cm, a cobertura do solo com cultivo de aveia preta pode contribuir na manutenção de maior período de umidade no solo (BRAGAGNOLO & MIELNICZUK, 1990). A maior umidade do solo pode favorecer a afinidade de água pelos íons Ca e Mg, ocasionando os efeitos dispersantes e menor estabilidade das ligações de pontes catiônicas aos colóides do solo (BRONICK & LAL, 2005).

O aumento da microporosidade do solo nas camadas de 0 - 10 e 10 - 20 cm devido à calagem (Figura 5) pode ser atribuído ao processo de dispersão das partículas coloidais do solo decorrente dos seguintes fatos: (i) aumento do balanço de cargas eletronegativas; (ii) diminuição dos teores de Al dos sítios de adsorção em substituição por Ca e Mg (íons de menor valência) sobre as ligações de pontes catiônicas (HAYDES & NAIDU, 1998). Na camada de 0 - 10 cm, os tratamentos SCA, CCA e CCA+N apresentaram comportamento

quadrático, tendo na dose de 8 Mg ha⁻¹ de calcário a maior proporção de microporos. Na dose de 12 Mg ha⁻¹ de calcário houve redução da microporosidade. Esse efeito pode ser atribuído a relação de macro e microporos. Houve menor amplitude da macroporosidade nas doses de 8 e 12 Mg ha⁻¹ de calcário, influenciando com menor intensidade sobre a microporosidade (Figura 5).

Nas camadas de 0 - 10 e 10 - 20 cm, não foram observados efeitos da calagem em alterar a PT (Figura 5). Os efeitos da calagem e dos tratamentos da aveia, com e sem adubação nitrogenada somente alteraram a proporção de macro e microporos no solo. Spera et al. (2008), observou que a calagem para elevar o pH em água maior que 6,0 em um Latossolo Vermelho distrófico de classe textural argilosa diminuiu a PT. devido a neutralização do Al e aumento de Ca e Mg trocável nos sítios de adsorção. No presente estudo a calagem superficial após 60 meses de sua implantação ocasionou o incremento do pH, Ca e Mg trocável e redução dos teores de Al trocável em diferentes magnitudes nas camadas estudadas, porém, sem alterar a PT.

Na camada de 0 - 10 cm, o tratamento da aveia preta com adubação nitrogenada (CCA+N) proporcionou maior PT, de 34,96% enquanto os tratamentos SCA e CCA apresentaram 33,71 e 34,32 % respectivamente (Tabela 4). A maior proporção de macroporos no tratamento CCA+N pode ser atribuído ao menor efeito da dispersão dos colóides. O tratamento CCA+N apresentou maior teor de Al e menores teores de Ca e Mg trocáveis nas camadas de 0 - 5 e 5 - 10 cm em relação aos tratamentos SCA e CCA (Tabela 2), contribuindo para maior PT e estabilidade das partículas coloidais.

A densidade do solo pouco foi influenciada pelos tratamentos estudados. Na camada de 0 - 10 cm foi observado efeito quadrático para o tratamento CCA+N. Porém, a maior Ds ocorreu na dose de 12 Mg ha⁻¹ de calcário. Esse efeito pode ser atribuído a redução ou neutralização total do Al trocável no tratamento CCA+N somente na dose de 12 Mg ha⁻¹ de

calcário (Figura 1). Esses fatores podem ter levado à ocorrência de ligações menos estáveis, susceptíveis ao rompimento das pontes catiônicas, ocasionando dispersão das argilas (HATI et al., 2008) e, por consequência, aumento da Ds do solo (SPERA et al., 2008). Apesar de os tratamentos estudados apresentarem efeitos distintos, os incrementos da Ds (1,36 à 1,43 kg dm⁻³) não prenunciam efeito prejudicial as culturas estudadas (REYNOLDS et al., 2002).

O aumento linear da RT nos tratamentos de aveia preta, com e sem adubação nitrogenada na camada de 0 - 10 cm é devido aos baixos valores de RT quantificados no tratamento sem calcário (0 Mg ha⁻¹). No tratamento testemunha, a alta acidez e as altas concentrações de Al trocável (agente flocculante) podem ter contribuído para formação de estruturas físicas do solo estáveis de menor efeito sobre a dispersão das partículas coloidais do solo (GARDNER, 1999). Com o aumento das doses de calcário, os tratamentos CCA e CCA+N ocasionaram redução da macroporosidade que pode ter contribuído para o aumento da RT. Um possível efeito dispersante ocasionado pelo aumento da espessura da dupla camada difusa e da maior umidade do solo nos tratamentos com cobertura vegetal de inverno podem ter contribuído para formação de estruturas de menor estabilidade física do solo (MALKAWI et al., 1999).

Na camada de 10 - 20 cm, não houve efeito da calagem sobre a RT, este atributo foi influenciado pelos tratamentos da cobertura vegetal de inverno, com e sem adubação nitrogenada. Os tratamentos SCA e CCA apresentaram força para rompimento de agregados de 60,01 e 63,33 kPa, respectivamente, enquanto o tratamento CCA+N apresentou o menor valor médio de RT de 51,90 kPa (Tabela 4). A menor RT de agregados no tratamento CCA+N pode ser atribuído a maior proporção de macroporos, de 14,50% (Figura 5) e ao maior teor de Al trocável na camada de 10 - 20 cm (Tabela 2), favorecendo estruturas do solo melhor definidas.

Esses efeitos demonstram que a RT é um atributo sensível para avaliar os efeitos da calagem e da cobertura vegetal em SPD. Salienta-se que o atributo RT é um indicador de qualidade do solo pouco explorado cientificamente, demonstrando ser uma boa ferramenta para estudos futuros sobre qualidade do solo.

4.7. CONCLUSÕES

Os tratamentos com aveia preta aliada a calagem superficial reduziu a macroporosidade e contribui para o aumento da RT na camada de 0 - 10 cm.

Verificou-se que na dose de 8 Mg ha⁻¹ de calcário (saturação por bases estimada de 65%) aliado aos tratamentos com e sem aveia preta favoreceram os maiores valores de microporosidade na camada de 0 - 10 cm.

A calagem associado aos tratamentos da aveia preta reduziu a macroporosidade e aumento da microporosidade na camada de 10 - 20 cm.

5. CONCLUSÕES GERAIS

A calagem superficial, após 5 anos de sua aplicação em solo manejado há 30 anos no sistema plantio direto proporcionou correção da acidez, aumento de Ca e Mg trocáveis em todas as camadas estudadas.

Quando altas doses de nitrato de amônio foram aplicadas na aveia preta, ocorreu aumento da acidificação do solo e redução dos teores de Ca e Mg trocáveis na camada de 0 - 5 e 5 - 10 cm.

A calagem e a cobertura de aveia preta, sem e com aplicação de N, favoreceram o acúmulo de COT e NT em todas as camadas estudadas.

Os tratamentos com aveia preta proporcionaram incremento de pH, CE, Ca, Mg e NT na camada de 10 - 20 cm, evidenciando importância da cobertura vegetal para a melhoria da fertilidade do solo.

A cobertura de aveia preta aliada à calagem superficial em um Latossolo Vermelho, textura média, sob SPD consolidado pouco alteraram os atributos PESN, ΔpH e CE, porém os valores dos atributos eletroquímicos obtidos foram adequados ao manejo do solo no SPD.

Os tratamentos com aveia preta aliada a calagem superficial reduziu a macroporosidade e contribuiu para o aumento da RT na camada de 0 - 10 cm.

Verificou-se que na dose de 8 Mg ha^{-1} de calcário (saturação por bases estimada de 65%) aliado aos tratamentos com e sem aveia preta favoreceram os maiores valores de microporosidade na camada de 0 - 10 cm.

A calagem associada aos tratamentos da aveia preta reduziu a macroporosidade e aumentou a microporosidade na camada de 10 - 20 cm.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; ERNANI, P.R.; MAFRA, A.L.; FONTANA, E.C. Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.799-806, 2003.
- ALCARDE, J. C. **Corretivos de acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. São Paulo: Associação nacional para difusão de adubos e corretivos agrícolas, 1992, 9 p., (Boletim técnico n.06).
- ALCARDE, J. C. **Fertilizantes**. In: Novais, R. F.; ALVAREZ V. V. H.; DE BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.) Fertilidade do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, cap. 12, p.737-768.
- ALLEONI, L. R.F.; CAMARGO, O. A. Pontos de efeito salino nulo de Latossolos Ácricos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.18, p.175-180, 1994.
- ALLEONI, L. R.F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J. Acidity and aluminum speciation as affected by surface liming in tropical no-till soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.74, n.3, p.1010-1017, 2010.
- AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; HINRICHS, R.; BERTOL, I. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.28, p.359-367, 2004.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian cerrado soils under no-till. **Soil & Tillage Research**, v.86, p.237-245, 2006.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. **Bulk density**. In: KLUTE, A. (Ed.) Methods of soil analysis. 2.ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. v.1, pp.363-375.
- BOER, C. A.; ASSIS, R. L.; SILVA, G. P.; BRAZ, A. J. B. P.; BARROSO, A. L. L.; CARGNELUTTI FILHO, A.; FÁBIO PIRES, F. R. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n.09, p. 1269-1276, 2007.
- BOLAN, N. S.; NAIDU, R.; SYERS, J. K.; TILLMAN, R. W. Surface charge and solute interactions in soils. **Advances in Agronomy**, v.67, p.87-140, 1999.
- BRADY, N. C. **The Nature and Properties of Soils**, New York, v. 07, 1989, 898p.
- BRAGAGNOLO, N.; MIELNICZUC, J. Cobertura do solo por resíduos de oito sequencias de culturas e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo, germinação e crescimento inicial do milho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.14, p.91-98, 1990.
- BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v.124, p.3-22, 2005.

BROW, T. T.; KOENIG, R. T.; HUGGINS, D. R.; HARSH, J. B.; ROSSI, R. E. Lime effects on soil acidity, crop yield, and aluminum chemistry in direct-seeded cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, v.72, n.3, p.634-640, 2008.

CAIRES, E. F.; DA FONSECA, A. F. Absorção de nutrientes pela soja cultivada no sistema plantio direto em função da calagem na superfície. **Bragantia**, v.59, n.2, p.213-220, 2000.

CAIRES, E. F.; KUSMAN, M. T.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; PADILHA, J. M. Alterações químicas do solo e resposta do milho à calagem e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.28, p.125-136, 2004.

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

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

CAIRES, E. F. **Calagem no sistema plantio direto para correção da acidez e suprimento de Ca e Mg como nutrientes**. International Plant Nutritional Institute, 28p. 2007.

CASTRO FILHO, C.; LOURENÇO, A.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B.; Aggregate stability under different soil management systems in red Latosol in the state of Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.65, p.45-51, 2002.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do instituto agrônomo de Campinas**. Boletim técnico 106. Campinas: Instituto Agrônomo, 1986. 94p.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O. **Determinação de nitrogênio total em solo**. In: RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. p.262-276.

CAVIGLIONE, J. H.; BERNARDES, K. L. R.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina : IAPAR, 2000. CD

CHAVES, H.L.G.; QUEIROZ, M.F.; OLIVEIRA, E.L.; SANTANA, E.F. Efeito do carbonato de cálcio na dispersão de argila de um Latossolo. **Agropecuária Técnica**, v.18, p. 1-7, 1997.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C.; ALBUQUERQUE, J. A. Manejo da calagem e os componentes da acidez de Latossolo Bruno em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p. 317-326, 2004.

DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. **Porosity**. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, 1986. v.1, pp.443-461.

DENEF, K.; SIX, J.; MERCKX, R.; PAUSTIAN, K. Short-term effects of biological and physical forces on aggregate formation in soils with different clay mineralogy. **Plant and Soil**, v.246, p.185-200, 2002.

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. S.; BAYER, C. Modificações químicas em solos ácidos ocasionadas pelo método de aplicação de corretivos da acidez e de gesso agrícola. **Scientia Agricola**, v.58, p.825-831, 2001.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA (FEBRAPDP). Disponível on-line no endereço: <http://www.febrapdp.org.br/port/plantiodireto.html> (acessado em 09/01/2009).

FOLONI, J. S. S.; ROSOLEM, C. A.; GARCIA, R. A. Efeito da calagem e sulfato de amônio no algodão. II - Concentração de cátions e ânions na solução do solo e absorção de nutrientes pelas plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.433-442, 2006.

FONTES, M. P. F.; CAMARGO O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente intemperizados. **Scientia Agricola**, v.58, n.03, p.627-646, 2001.

FRANCHINI, J. C. M.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.2267-2276, 1999.

FRIEDMAN, D.; HUBBS, M.; TUGEL, A.; SEYBOLD, C.; SUCIK, M. **Guidelines for soil quality assessment in conservation planning**. Washington: United States department of agriculture, 2001, 48 p.

GARDNER, C. M. K.; LARYEA, K.B.; UNGER, P.W. **Soil physical constraints to plant growth and crop production**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 1999, 106p.

GATIBONI, L.C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; FLORES, J.P.C.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, v.33, p.283-290, 2003.

GEBRIM, F. O.; DA SILVA, I. R.; NOVAIS, R. F.; VERGÜTZ, L.; PROCÓPIO, L. C.; NUNES, T. N.; DE JESUS, G. L. Lixiviação de cátions favorecida pela presença de ânions inorgânicos e ácidos orgânicos de baixa massa molecular em solos adubados com camas de aviário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2255-2267, 2008.

GIAROLA, N.F.B.; DA SILVA, A.P.; IMHOFF, S.; DEXTER, A.R. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. **Geoderma**, v.113, p.95-108, 2003.

GODSEY, C. B.; PIERZYNSKI, G. M.; MENGEL, D. B.; LAMOND, R. E. Management of soil acidity in no-till production systems through surface application of lime. **Soil Quality & Fertility**, v.99, p.764-772, 2007.

GROHMANN, F. Distribuição do tamanho de poros em três tipos de solo do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v.19, p.319-328, 1960.

HATI, K.M.; SWARUP, A.; MISHRA, B.; MANNA, M.C.; WANJARI, R.H.; MANDAL, K.G.; MISRA, A.K. Impact of long-term application of fertilizer, manure and lime under intensive cropping on physical properties and organic carbon content of an Alfisol. **Geoderma**, v.148, p.173-179, 2008.

HAYNES, R.J.; NAIDU, R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: a review. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.51, p.123-137, 1998.

IMHOFF, S.; DA SILVA, A.P.; DEXTER, A.R. Factors contributing to the tensile strength and friability of Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, v.66, p.1656-1661, 2002.

LAL, R. Soil Carbon Sequestration for Sustaining Agricultural Production and Improving the Environment with Particular Reference to Brazil. **Journal of Sustainable Agriculture**, v.26, p.23-42, 2005.

LAL, R. Enhancing crop yields in the developing countries through restoration of the soil organic carbon pool in agricultural lands. **Land Degradation & Development**, v.17, p.197-209, 2006.

LAL, R. Soils and world food security. **Soil & Tillage Research**, v.102, p.1-4, 2009.

LINDSAY, W. L. **Chemical Equilibria in soils**. New York: John Wiley & Sons, 1979. 449p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2ed. Sand Diego: Academic Press, 1995. 889p.

MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v.28, p.329-334, 2005.

MAJDALANI, S; MICHEL, E.; DI-PIETRO, L.; ANGULO-JARAMILLO, R. Effects of wetting and drying cycles on in situ soil particle mobilization. **European Journal of Soil Science**, v. 59, p. 147-155, 2008.

MALKAWI, A. I. H.; ALAWNEH, A. S.; ABU-SAFAQAH, O. T. Effects of organic matter on the physical and the physicochemical properties of an illitic soil. **Applied Clay Science**, v.14, p. 257-278, 1999.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, C. Evaluation of plant residues on the mobility of surface applied lime. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.45, p. 251-256, 2002.

MUZILLI, O.; OLIVEIRA, E. L.; CALEGARI, A. **Adubação do milho**. Campinas: Fundação Cargil, 1989, 29p. (Série técnica, 04)

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

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Toxicity of aluminum to coffee in Ultisol and Oxisols amended with CaCO_3 and CaSO_4 . **Soil Science Society of America Journal**, v.46, p.1201-1207, 1982.

PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F.; ZEMPULSKI, H.C.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D.C. **Manual de análise química do solo e controle de qualidade**. Circular, 76. Londrina: Instituto Agronômico do Paraná, 1992. 38p.

RABARY, B.; SALL, S.; LETOURMY, P.; HUSSON, O.; RALAMBOFETRA, E.; MOUSSA, N.; CHOTTE, J. L. Effects of living mulches or residue amendments on soil microbial properties in direct seeded cropping systems of Madagascar. **Applied Soil Ecology**, v.39, p.236-243, 2008.

RAIJ, B. V. Determinação do ponto de carga zero em solos. **Bragantia**, v.32, p. 337-347, 1973.

RAIJ, B. V. **Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no subsolo**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 1988. 88p.

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

REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; LU, X. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v.110, p.131-146, 2002.

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

ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; DE OLIVEIRA, R. H. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, n. 2, p.301-309, 2003.

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; LECH, V. A.; RAMPAZZO, C. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da uréia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. **Ciência Rural**, v. 33, n. 01, 2003.

SAS SYSTEM. SAS Institute Inc. **SAS OnlineDoc® 9.1.2**. Cary, NC: SAS Institute, 2004.

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

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, p.1350-1358, 1999.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S. M.; SÁ, J. C. M.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - effects of no-tillage. **Agronomie**, v.22, p.755-775, 2002.

SPARKS, D.L. **Soil Physical Chemistry**. 2.ed. Boca Ratton, FL: CRC Press, 1999. 408p.

SPARKS, D. L. **Environmental Soil Chemistry**. 2ed. San Diego: Elsevier, 2003, 352p.

SPERA, S.T.; DENARDIN, J.E.; ESCOSTEGUY, P.A.V.; SANTOS, H.P.; FIGUEROA, E.A. Dispersão de argila em microagregados de solo incubado com calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2613-2620, 2008.

WATTS, C.; DEXTER, A.R. Soil friability: theory, measurement and the effects of management and organic carbon content. **European Journal of Soil Science**, v.49, p.73-84, 1998.

WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E. S.; NEVES, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, p.487-494, 2005.

ZAMBROSI, F. C. B.; ALLEONI, L. R. F.; CAIRES, E. F. Teores de alumínio trocável e não trocável após calagem e gessagem em Latossolo sob sistema plantio direto. **Bragantia**, v.66, n.3, p.487-495, 2007.