

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**CALAGEM SUPERFICIAL E APLICAÇÃO DE GESSO EM SISTEMA
PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO: EFEITOS NO SOLO E
NA SUCESSÃO MILHO/CRAMBE/FEIJÃO-CAUPI**

CLAUDIO HIDEO MARTINS DA COSTA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Agricultura)

BOTUCATU – SP
Junho de 2015

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CÂMPUS DE BOTUCATU

**CALAGEM SUPERFICIAL E APLICAÇÃO DE GESSO EM SISTEMA
PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO: EFEITOS NO SOLO E
NA SUCESSÃO MILHO/CRAMBE/FEIJÃO-CAUPI**

CLAUDIO HIDEO MARTINS DA COSTA

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol

Co-orientador: Prof. Dr. Rogério Peres Soratto

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da UNESP - Câmpus de
Botucatu, para obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Agricultura)

BOTUCATU – SP
Junho de 2015

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - DIRETORIA TÉCNICA DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Costa, Claudio Hideo Martins da, 1985-
C837c Calagem superficial e aplicação de gesso em sistema plantio direto de longa duração: efeitos no solo e na sucessão milho/crambe/feijão-caupi / Claudio Hideo Martins da Costa.
- Botucatu : [s.n.], 2015
x, 97 f. : grafs., fots., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2015
Orientador: Carlos Alexandre Costa Crusciol
Coorientador: Rogério Peres Soratto
Inclui bibliografia

1. Solos - Conservação. 2. Solos - Acidez. 3. Solos - Correção. 4. Matéria orgânica. 5. Adubação. I. Crusciol, Carlos Alexandre Costa. II. Soratto, Rogério Peres. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

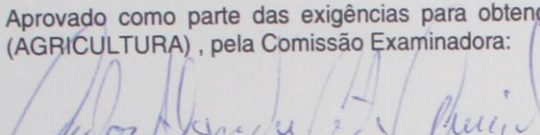
TÍTULO: "CALAGEM SUPERFICIAL E APLICAÇÃO DE GESSO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO: EFEITOS NO SOLO E NA SUCESSÃO MILHO/CRAMBE / FEIJÃO-CAUPI"

AUTOR: CLAUDIO HIDEO MARTINS DA COSTA

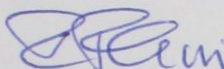
ORIENTADOR: Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. ROGERIO PERES SORATTO

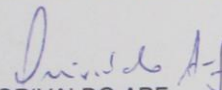
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

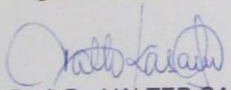
Dep de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu


Prof. Dr. EDUARDO FAVERO CAIRES

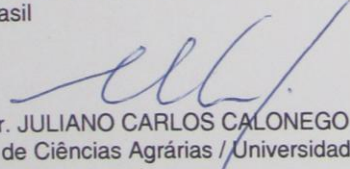
Departamento de Ciência do Solo e Eng. Agrícola / Universidade Estadual de Ponta Grossa


Prof. Dr. ORIVALDO ARF

Departamento de Fitotecnia, Tecnologia de Alimentos e Sócio Economia / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. VALTER CASARIN

IPNI Brasil


Prof. Dr. JULIANO CARLOS CALONEGO

Centro de Ciências Agrárias / Universidade do Oeste Paulista

Data da realização: 01 de junho de 2015.

Aos meus amados pais, Afonso e Mizue

Aos meus irmãos, Ivan, Ivo e Jeniffer

Ao meu sobrinho Igor

DEDICO

À toda minha família,

e a todos meu amigos.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol, pela orientação, amizade e exemplo.

Ao Prof. Dr. Rogério Peres Soratto, pela co-orientação, no momento em que o orientador realizava seu pós-doutoramento no exterior, e pelos ensinamentos e conselhos repassados.

À Prof. Dra. Michelle M Wander, da Universidade de Illinois – Urbana-Champaign (EUA), pela oportunidade, colaboração e ensinamentos durante o estágio no exterior, e acima de tudo, à amizade.

À Faculdade de Ciências Agrônomicas, pela oportunidade e suporte para a realização do doutorado.

À Universidade de Illinois, pela oportunidade e suporte para realização do estágio no exterior.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de estudos (no país Processo FAPESP nº 2011/10493-9 e no exterior Processo FAPESP nº 2013/06733-0) e pelo financiamento do projeto (Processo FAPESP nº 2013/03683-1).

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Eduardo Favero Caires, Prof. Dr. Orivaldo Arf, Prof. Dr. Valter Casarin e Prof. Dr. Juliano Carlos Calonego pela disponibilidade, atenção e correções que contribuíram para o resultado final desta tese. Agradeço ainda todos os conselhos sobre a vida profissional e pessoal.

À coordenação do curso de Pós-Graduação em Agronomia (Agricultura), pela dedicação e qualidade de ensino.

À Fundação MS, pela concessão de sementes para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Produção e Melhoramento Vegetal – DPMV.

Aos funcionários do DPMV: Vera, Eliane, Dorival, Valéria, Célio, Waldemir (FIO), Mateus, Casemiro, Cidão, Camargo e Cirinho, pelos serviços prestados e pela amizade.

Aos funcionários da biblioteca e da seção de Pós Graduação, pela atenção e serviços prestados.

Aos meus grandes amigos Pedro Martin, Eduardo Sá Mendonça, JongEun Lee, Tito, Álvaro, Samuel, Luiz, Ewerton Gasparetto, Antonio Carmeis Filho, Jader Nantes, Jorge Martinelli, Bruno C. Aires, Letusa Momesso, Katiuça Sueko, Maurício Mancuso, Jader Nantes, Ewerton Gasparetto, Gustavo Castoldi, Laércio e Laerte Pivetta e Gabriela Ferraz pelo companheirismo de sempre.

Aos ex-estagiários Matheus G. Palhano, Daniele D. Becero, Dênis E. Bôa, Lucas A. Rozas, Luiz E. Ricardo, Manoela C. Oliveira, Mariana Damha, Rafael Soares, Tamires E. Ferreira, Gabriela R. Roque e Yuri Kacuta, pela essencial ajuda na condução deste trabalho e pela amizade que se iniciou e jamais se encerrará.

Aos meus amigos Gustavo S. A. Castro e Jayme Ferrari Neto pela ajuda na realização deste trabalho.

Aos amigos da ex-república Rep'Tents, Julio Massaharu Marubayashi, Leo Oppermann da Costa (Ajoelha), João Paulo Rodrigues (Sazon), Lucas Araújo Rozas (Borra), Danilo Miaguti (Sudoku), Renato Marques (Fossa), Carlos Eduardo Balan Assalin (Zé Pito) e aos agregados João Paulo Calore Nardini (Crint), Gérson Shinya Suzuki (Mijaro) e a todos que fizeram parte da extinta república, pela amizade.

Aos amigos de Piracicaba, pela descontração nas horas de descanso, fundamentais para a conclusão desta tarefa.

À minha namorada Tiara, por seu amor, incentivo, companheirismo e paciência nessa etapa final.

Aos meus pais e irmãos, pelo amor incondicional e apoio em todos os momentos.

A todos aqueles que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE TABELAS | VIII |
| LISTA DE FIGURAS | X |
| 1 RESUMO | 1 |
| 2 SUMMARY | 3 |
| 3 INTRODUÇÃO | 5 |
| 4 REVISÃO DE LITERATURA | 8 |
| 4.1 Sistema plantio direto | 8 |
| 4.2 Calagem no sistema plantio direto..... | 9 |
| 4.2.1 Fatores que afetam a correção da acidez do solo em aplicações superficiais..... | 11 |
| 4.3 Gessagem no sistema plantio direto | 15 |
| 4.4 Influência da calagem e gesso agrícola na matéria orgânica do solo | 17 |
| 4.5 Influência da calagem e da gessagem nos atributos físicos do solo | 19 |
| 4.6 Calagem e gessagem e a produção das culturas de milho, crambe e feijão-caupi em rotação no sistema plantio direto | 21 |
| 5 MATERIAL E MÉTODOS | 25 |
| 5.1 Localização e caracterização climática da área experimental | 25 |
| 5.2 Histórico da área experimental e caracterização do solo..... | 27 |
| 5.3 Delineamento experimental e tratamentos..... | 28 |
| 5.4 Características do calcário dolomítico e do gesso agrícola | 29 |
| 5.5 Critérios para aplicação dos produtos..... | 29 |
| 5.6 Condução do experimento | 30 |
| 5.6.1 Cultivo do milho (2010/11 e 2011/12) | 30 |
| 5.6.2 Cultivo do crambe (2011 e 2012) | 31 |
| 5.6.3 Cultivo do feijão-caupi (2011 e 2012)..... | 32 |
| 5.7 Amostragens e avaliações realizadas..... | 32 |
| 5.7.1 Atributos químicos do solo | 32 |
| 5.7.2 Quantidade acumulada de matéria seca..... | 33 |
| 5.7.3 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo – Universidade de Illinois-EUA | 33 |
| 5.7.4 Atributos físicos do solo | 35 |
| 5.7.5 Teores de nutrientes e produção de matéria seca da parte aérea da culturas..... | 38 |
| 5.7.6 Componentes da produção e produtividade de grãos da culturas..... | 38 |
| 5.8 Análise estatística | 40 |
| 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO | 41 |
| 6.1 Resultados..... | 41 |
| 6.1.1 Atributos Químicos do Solo | 41 |
| 6.1.2 Alterações na Matéria Orgânica do Solo..... | 47 |
| 6.1.3 Atributos Físicos do solo | 49 |
| 6.1.4 Teores de Nutrientes, Produção de Matéria Seca da Parte Aérea, Componentes da Produção e Produtividade de Grãos..... | 53 |
| 6.2 Discussão | 61 |
| 6.2.1 Atributos Químicos do Solo | 61 |

| | |
|---|----|
| 6.2.2 Alterações na Matéria Orgânica do Solo | 65 |
| 6.2.3 Atributos Físicos do solo | 67 |
| 6.2.4 Teores de Nutrientes, Produção de Matéria Seca da Parte Aérea, Componentes da Produção e Produtividade de Grãos | 70 |
| 7 CONCLUSÕES | 79 |
| 8 REFERÊNCIAS | 81 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Características granulométricas do solo da área (Agosto de 2002)..... | 27 |
| Tabela 2. Atributos químicos do solo antes das aplicações dos insumos..... | 28 |
| Tabela 3. Características químicas e físicas do calcário e gesso. | 29 |
| Tabela 4. Probabilidade de F para os atributos químicos do solo nas camadas de 0–0,05, 0,05–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m de profundidade, aos 12 e 24 meses após a reaplicação de calcário e gesso em superfície. | 42 |
| Tabela 5. Quantidade de matéria seca acumulada, em Mg ha ⁻¹ , desde 2002 até 2012, em função das aplicações superficiais de calcário e gesso agrícola, num Latossolo Vermelho distroférico, sob SPD. | 47 |
| Tabela 6. Nitrogênio total (NT), C orgânico total (COT), C orgânico particulado (COP), N particulado (NP), C associado aos minerais (COAM) e relação C/N nas profundidades 0–0,05, 0,05–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,40 m, após 10 anos da primeira aplicação e 24 meses da última reaplicação de calcário e gesso agrícola, num Latossolo Vermelho distroférico, sob SPD..... | 48 |
| Tabela 7. Estoques de carbono orgânico total (COT) nas camadas 0–0,10, 0,10–0,20 e 0–0,20 m, após 10 anos da primeira aplicação e 24 meses da última reaplicação de calcário e gesso agrícola, num Latossolo Vermelho distroférico, sob SPD..... | 49 |
| Tabela 8. Valores de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (Mic), macroporosidade (Mac), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregado (IEA) nas camadas de solo de 0–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m, após 10 anos da primeira aplicação e 24 meses da última aplicação de calcário e gesso agrícola, num Latossolo Vermelho distroférico, sob SPD. . | 50 |
| Tabela 9. Correlação de Pearson para atributos físicos do solo (Ds, Pt, Mic, Mac, DMP, DMG, IEA) com pH, H+Al, saturações por Al (m%), Ca (%Ca) e Mg (%Mg), CTC COT, COP e COAM nas camadas de solo de 0–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,40 m, após 10 anos da primeira aplicação e 24 meses da última aplicação de calcário e gesso agrícola, num Latossolo Vermelho distroférico, sob SPD. | 52 |
| Tabela 10. Resistência do solo a penetração e teor de água do solo nas camadas de 0–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,40 m, após 10 anos da primeira aplicação e 24 meses da última aplicação de calcário e gesso agrícola, num Latossolo Vermelho distroférico, sob SPD. . | 53 |
| Tabela 11. Teores de macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Cu, Zn, Mn e Fe), produção de matéria seca de parte aérea, população de plantas, número de espigas por planta, grãos por espiga, massa de 100 grãos e produtividade de grãos de milho em função da gessagem e calagem superficial, num Latossolo Vermelho distroférico, em SPD. Na safra 2010/11 e 2011/12. Botucatu, SP, 2014..... | 55 |

Tabela 12. Teores de macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Cu, Zn, Mn e Fe), produção de matéria seca da parte aérea, população de plantas, grãos por planta, massa de 1000 grãos e produtividade de grãos de crumbe em função da gessagem e calagem superficial, num Latossolo Vermelho distroférico, em SPD. Safra de 2011 e 2012. Botucatu, SP, 2014. 57

Tabela 13. Teores de macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Cu, Zn, Mn e Fe), produção de matéria seca da parte aérea, população de plantas, vagens por planta, grãos por vagem, massa de 100 grãos e produtividade de grãos de feijão-caupi em função da gessagem e calagem superficial, num Latossolo Vermelho distroférico, em SPD. No ano de 2011 e 2012. Botucatu, SP, 2014. 60

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Precipitação pluvial (■) e temperaturas médias (—), registradas durante a condução do experimento, nos anos agrícolas de 2010/2011, 2011/2012 e 2012/13. (SM: semeadura do milho; AM: adubação de cobertura do milho; CM: colheita do milho; SC: semeadura do crambe; CC: colheita do crambe; SFc: semeadura do feijão-caupi; AFc: Adubação de cobertura do Feijão-caupi e CFc: Colheita do Feijão-caupi)..... 26
- Figura 2. Pesagem das amostras de solo (A), transferência para os frascos plásticos (B), frascos preenchidos com a solução de hexametáfosfato de sódio (C) e frascos com as tampas adaptadas (D)..... 34
- Figura 3. Agitador (A) e container plástico com os frascos e água (B). 35
- Figura 4. Filtragem das amostras (A), filtros com amostra de solo (B), pesagem das amostras secas a 50°C por 24 h (C) e amostras após moagem (D). 35
- Figura 5. Valores de pH (CaCl₂), teores de H + Al e Al³⁺ do solo, em função de aplicações de calcário e gesso, em superfície, em duas épocas de amostragem após a última aplicação. (◆) controle; (□) gesso; (▲) calcário e (○) calcário + gesso. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD. 43
- Figura 6. Teores de S-SO₄²⁻, P e K do solo, em função de aplicações de calcário e gesso, em superfície, em duas épocas de amostragem após a última aplicação. (◆) controle; (□) gesso; (▲) calcário e (○) calcário + gesso. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD. 45
- Figura 7. Teores de Ca⁺², Mg⁺² e saturação por bases (V%) do solo, em função de aplicações de calcário e gesso, em superfície, em duas épocas de amostragem após a última aplicação. (◆) controle; (□) gesso; (▲) calcário e (○) calcário + gesso. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD. 46

1 RESUMO

No Brasil existem extensivas áreas com acidez do solo. Nesta áreas sob sistema plantio direto existe a necessidade de aplicação de materiais corretivos de acidez. Em curto prazo, os efeitos da calagem superficial ficam restritos às camadas superficiais do solo. O uso do gesso agrícola é uma alternativa para melhorar o ambiente radicular em subsuperfície, e pode ser usado em solos ácidos como um complemento para a calagem. No entanto, continua a ser desconhecido como a aplicação de calcário e gesso agrícola em superfície afetam os atributos físicos, a matéria orgânica do solo e culturas não tradicionais. Dentro deste enfoque, o trabalho foi desenvolvido na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP, Campus de Botucatu (SP), dando continuidade a um projeto de pesquisa que vem sendo conduzido desde 2002, com o objetivo de avaliar a aplicação superficial de calcário e gesso nos atributos químicos, físicos e na matéria orgânica, bem como na nutrição, na produtividade das culturas do milho, crambe e feijão-caupi, nos anos agrícolas 2010/11 e 2011/12. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, com 4 repetições. Os tratamentos foram constituídos por: controle, aplicação de calcário ($2.700 + 2.000 + 2.000 \text{ kg ha}^{-1}$), aplicação de gesso ($2.100 + 2.100 + 2.100 \text{ kg ha}^{-1}$), e aplicação de calcário + gesso [$(2.700 + 2.100 \text{ kg ha}^{-1}) + (2.000 + 2.100 \text{ kg ha}^{-1}) + (2.000 + 2.100 \text{ kg ha}^{-1})$], aplicados em outubro de 2002, novembro de 2004 e outubro de 2010. No verão foi utilizada a cultura do milho, e na entressafra a cultura do crambe seguida do feijão-caupi. Foram realizadas as seguintes avaliações: atributos químicos do solo aos 12 e 24 meses após a última aplicação dos insumos; fracionamento físico da matéria orgânica do solo e

atributos físicos do solo aos 24 meses após a aplicação dos insumos; e componentes de produção e produtividade das culturas. A aplicação superficial do calcário, associado ou não ao gesso, foram efetivas em reduzir a acidez do solo até a profundidade de 0,20 m. Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo aumentaram em superfície e subsuperfície com a calagem superficial, com maiores teores de Ca^{2+} quando associado ao gesso. O gesso agrícola aplicado em superfície reduziu a acidez trocável (Al^{3+}) e aumentou os teores de Ca^{2+} e S-SO_4^{2-} em superfície e subsuperfície, mas reduziram os teores de Mg^{2+} em superfície. A aplicação do calcário, associado ou não ao gesso, na superfície do solo, promoveram aumento do carbono orgânico particulado, carbono orgânico associado aos minerais e o carbono orgânico total abaixo da camada mais superficial do solo, resultando nos maiores estoques de C na camada de 0-0,20 m. A aplicação de calcário, associado ou não ao gesso, na superfície do solo, em sistema plantio direto, melhorou a agregação, a microporosidade e a capacidade de retenção de água do solo, e reduziu a resistência à penetração, com efeitos mais pronunciados na agregação com a calagem associada ao gesso. Os teores de nutrientes das culturas foram beneficiados pela calagem, associada ou não ao gesso, principalmente, os de Ca e Mg. O componente da produção que foi mais afetado pela acidez do solo nas culturas de milho, crambe e feijão-caupi, foi o número de grãos por espiga, número de grãos por planta e número de grãos por vagens, respectivamente. A correção da acidez resultou em maiores produtividades de grãos. A gessagem foi eficiente em amenizar os efeitos negativos da acidez do solo nas culturas do milho e crambe, refletindo em aumento da produtividade de grãos, e quando associada à calagem, aumentou a produção de grãos de milho.

Palavras-chave: manejo conservacionista do solo, acidez do solo, correção do solo, fracionamento da matéria orgânica, agregação, produção de grãos, nutrição de plantas.

SURFACE LIMING AND GYPSUM APPLICATION UNDER A LONG-TERM NO-TILL: EFFECTS ON SOIL AND IN SUCCESSION CORN/CRAMBE/COWPEA. Botucatu, 2015, p. 97.

Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Author: Claudio Hideo Martins da Costa

Adviser: Carlos Alexandre Costa Crusciol

Co-adviser: Rogério Peres Soratto

2 SUMMARY

Brazil has extensive area with acid soils. This areas under no-till system exists the necessity to apply soil acidity correctives materials. In the short term, the effects of superficial liming is restricted to the upper soil layers. The use of phosphogypsum is an alternative to improve the root environment in the subsurface, and can be used in acid soils as a liming supplement. However, it remains unknown how the surface application of limestone and gypsum affects the physical attributes, soil organic matter and non-traditional crops. The experiment was carried out in an experimental area, in the city of Botucatu (SP, Brazil), continuing a research project that has been conducted since 2002, to evaluate the long-term effects of surface application of lime and gypsum on chemical and physical properties, and organic matter, as well as in plant nutrition and yield components and grain yield of corn, crambe and cowpea, in the crop seasons 2010/11 and 2011/12. The experimental design was a randomized block with 4 replications. The plots were as follows: original condition and application of limestone (2.700 + 2.000 + 2.000 kg ha⁻¹), gypsum (2.100 + 2.100 + 2.100 kg ha⁻¹) and limestone + gypsum [(2.700 + 2.100 kg ha⁻¹) + (2.000 + 2.100 kg ha⁻¹) + (2.000 + 2.100 kg ha⁻¹)], applied in October 2002, November 2004 and October 2010. As summer crop was used corn, and in the off season crambe followed by cowpea. The following evaluations were performed: chemical soil attributes at 12 and 24 months after the last application of inputs; physical fractionation of soil organic matter and soil physical attributes at 24 months after the last application of inputs; and yield components and crop yield. The surface application of limestone, with or without gypsum, were effective in reducing soil acidity to a depth of 0.20 m. The Ca²⁺ and Mg²⁺ levels in the soil increased in the surface and subsurface with liming. The Ca²⁺ levels

were more pronounced when liming were combined with gypsum. The surface application of gypsum reduced the exchangeable acidity (Al^{3+}) and increased levels of Ca^{2+} and S-SO_4^{2-} in surface and subsurface, but reduced the surface levels of Mg^{2+} . The superficial liming, with or without gypsum, increased the particulate organic carbon, carbon associated with minerals and total organic carbon below the topsoil, resulting in higher C stocks in the layer of 0-0.20 m. The superficial liming, with or without gypsum, improved aggregation, microporosity and soil water holding capacity, and reduced resistance to penetration, with more pronounced effects on aggregation with liming associated with gypsum. The nutrients concentration on crops were benefited by liming, with or without gypsum, mainly Ca and Mg. The yield components that was more affected by soil acidity in corn, crambe and cowpea, were the number of grains per ear, number of grains per plant and, number of grains per pod. The acidity correction resulted in higher grain yield. The gypsum was effective in mitigating the negative effects of soil acidity on crops of corn and crambe, reflecting in an increased in grain yield, and when combined with liming, increased corn yield.

Keywords: soil conservation, soil acidity, soil correction, organic matter fractionation, soil aggregation, crop yield, plant nutrition.

3 INTRODUÇÃO

A acidez do solo é um dos fatores mais importantes que limitam a produção das culturas. A área afetada pela acidez é estimada em 4 bilhões ha, representando aproximadamente 30% da área cultivável do mundo e abrangendo, em sua maioria, países localizados nas regiões tropicais, sendo mais frequente nos Oxisolos e Ultisolos na América do Sul e nos Oxisolos na África. No Brasil, o cerrado é a principal região produtora de grãos do país, ocupando cerca de 205 milhões ha ou 23% do território nacional. Grande parte dos solos dessa região são Latossolos (46%), Neossolos (15%) e Argissolos (15%), com baixa fertilidade natural, elevada saturação de alumínio, e elevada capacidade de fixação de P. A baixa fertilidade é uma característica de solos ácidos, assim a correção desses solos é muito importante para crescimento adequado das culturas.

A calagem é a prática mais comumente utilizada para neutralizar a acidez do solo e restaurar a capacidade de produção, elevar a disponibilidade de nutrientes, e reduzir os níveis de elementos tóxicos. No sistema convencional de preparo de solo, o calcário é incorporado no solo através da aração e gradagem. Essa prática desestrutura os agregados do solo, expõe o solo e aumenta a suscetibilidade à erosão. Além disso, a desestruturação dos agregados com a incorporação do calcário promove a mineralização da matéria orgânica previamente protegida. Portanto, o interesse da aplicação superficial de calcário para controle da acidez do solo desde a implantação do sistema plantio direto (SPD) tem por objetivo, principalmente, preservar as propriedades físicas do solo.

Contudo, em curto prazo, os efeitos da calagem superficial ficam restritos às camadas superficiais do solo, pois, sem a incorporação, há menor contato entre as partículas do calcário e os colóides do solo. A neutralização da acidez do solo em subsuperfície geralmente é lenta, particularmente em solos de cargas variáveis. A movimentação do calcário em profundidade varia em função da época, da dose, do modo e da frequência de aplicação, do tipo de solo, do clima, das propriedades físicas do solo e do sistema de produção.

A calagem pode também promover prejuízos à estabilidade de agregados e a outros atributos físicos do solo, por modificar a composição química da solução do solo. As alterações no pH, na força iônica da solução e nos tipos de íons presentes podem causar tanto a dispersão como a floculação dos colóides, com consequências diretas na agregação das partículas do solo. O efeito dispersivo dos corretivos pode ser agravada em SPD, quando grandes quantidades são aplicadas na superfície do solo. No entanto, este efeito tende a prevalecer apenas no curto prazo, pois, à medida que favorece a produção de fitomassa aérea e radicular das culturas, aumenta a adição de matéria orgânica e a atividade microbiana no solo, fatores que auxiliam indiretamente na formação dos agregados.

Outro insumo agrícola importante no manejo da fertilidade de solos ácidos é o gesso agrícola que é um produto mais solúvel que o calcário, composto principalmente de sulfato de cálcio ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Entretanto, sua adição no solo não altera o pH. O gesso aplicado na superfície do solo movimenta-se ao longo do perfil sob a influência da percolação de água. Como consequência obtém-se aumento no suprimento de cálcio e redução na toxicidade de alumínio no subsolo. É, portanto, uma alternativa para melhorar o ambiente radicular no subsolo, e pode ser usado em solos ácidos como um complemento para a calagem.

Nas regiões de clima subtropical do Brasil, onde as precipitações pluviais são bem distribuídas ao longo do ano, há vários relatos da ausência de resposta das culturas à aplicação de corretivos da acidez em SPD. A explicação para tais constatações tem sido atribuída ao maior acúmulo de matéria orgânica e nutrientes na superfície, os quais que reduzem a atividade do Al e, conseqüentemente, sua toxicidade, pela formação de complexo Al-orgânicos e pela maior força iônica da solução do solo.

É provável que na maioria das regiões tropicais com inverno seco haverá incrementos na produtividade de grãos e de fibra com a calagem e gessagem no

SPD, mesmo em superfície, diferentemente do que tem sido constatado na região subtropical. Isso porque, nessas regiões, a grande maioria das áreas cultivadas possui baixos teores de matéria orgânica e baixas quantidades de palha na superfície, acarretando, respectivamente, em menor armazenamento e maior evaporação da água do solo.

Assim, a correção da acidez, a redução dos teores de Al e a elevação da saturação por bases, notadamente de Ca, no perfil do solo, em tempo relativamente curto em razão dos mecanismos que têm promovido a movimentação dos compostos resultantes da dissociação do calcário e do gesso, proporcionarão maior desenvolvimento do sistema radicular em profundidade. Isso aumentará a tolerância das plantas à deficiência hídrica causada pela ocorrência de veranicos, principalmente, no cultivo de safrinha, possibilitando intensificar a exploração agrícola da área.

Dentro destas áreas, vem crescendo o interesse por culturas não tradicionais que possam ser incluídas no esquema de rotação de culturas em áreas sob SPD. O crambe e o feijão-caupi são espécies interessantes neste contexto, pois, o produto final, os grãos, possuem elevado valor agregado. O crambe possui ainda características que tem aumentado seu interesse pela indústria de biodiesel, como teor de óleo, produtividade e ciclo da cultura que se enquadram nos sistemas produtivos das regiões caracterizadas como de inverno seco. O feijão-caupi destaca-se pela baixa exigência hídrica durante seu ciclo de desenvolvimento, e a possibilidade de exportação da produção.

O conhecimento da dinâmica da correção da acidez a partir da superfície do solo no SPD, bem como dos benefícios da aplicação conjunta de calcário e gesso, em experimentos de longa duração, são ainda pouco investigados, principalmente nas condições de clima tropical. Contudo, são extremamente necessários e importantes para o estabelecimento de ajustes nas recomendações de calagem e gessagem para culturas graníferas anuais em SPD.

Esse trabalho objetivou avaliar as alterações dos atributos químicos e físicos do solo, a qualidade da matéria orgânica do solo, bem como, a nutrição e produtividade de grãos das culturas do milho, crambe e feijão-caupi decorrentes da aplicação de calcário e gesso agrícola na superfície, em SPD consolidado, em região de inverno seco.

4 REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Sistema plantio direto

A introdução do SPD, a partir da década de 1970 (LOPES et al., 2004) no sul do Brasil, foi um dos maiores avanços no processo produtivo da agricultura brasileira. Desde então, é uma das principais estratégias adotadas tendo em vista reduzir o processo de degradação do solo. Esse novo modelo de produção tem como principal objetivo a conservação dos ecossistemas agrícolas, no entanto, possui potencial para recuperar áreas já consideradas improdutivas. Em razão dos enormes benefícios para a biodiversidade do solo, essa tecnologia tem-se expandido para diversas regiões do mundo, principalmente em países como Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai, os quais adotam esse sistema em cerca de 70% do total da área cultivada (DERPSCH et al., 2010).

Para a exploração agrícola sustentável em SPD é preconizado o não revolvimento do solo, exceto nos sulcos de semeadura (AMARAL; ANGHINONI; DESCHAMPS, 2004). Somado a isso, é necessária a manutenção dos restos culturais sobre a superfície do solo durante o ano todo, o que promove maior proteção contra o impacto direto das gotas da chuva, favorece a infiltração de água no solo, reduz as perdas de água, por escoamento superficial e evaporação, as perdas de solo e de nutrientes por erosão (WUTKE; BULISANI; MASCARENHAS, 1993; HERNANI; KURIHARA; SILVA, 1999), bem como diminui a amplitude térmica do solo ao longo do dia e da noite.

Um dos maiores problemas dos solos tropicais brasileiros é a acidez, tanto em superfície quanto em subsuperfície, e as recomendações de correção da acidez e o manejo da fertilidade no SPD têm sido realizados a partir dos conhecimentos

obtidos no sistema convencional de preparo do solo (SPC). No entanto, segundo Caires et al. (1999), os conhecimentos relacionados à fertilidade do solo no SPD nem sempre são os mesmos aplicados no SPC, uma vez que neste há a incorporação dos corretivos de solo, adubos e resíduos vegetais. Porém, as informações sobre o manejo das culturas e a fertilidade do solo ainda não estão totalmente definidas para o SPD. Portanto, há a necessidade de estudos que satisfaçam todos os questionamentos relacionados à correção da acidez do perfil do solo, partindo de uma aplicação superficial. Além disso, existe grande interesse na busca de alternativas para a implantação e manutenção do SPD, sem incorporação prévia do corretivo, não havendo necessidade de promover o revolvimento inicial do solo por meio de preparo convencional, realizando-se a calagem superficial desde o estabelecimento do sistema (CAIRES; BANZATTO; FONSECA, 2000; CAIRES; BARTH; GARBUIO, 2006; SORATTO; CRUSCIOL, 2008a, 2008b, 2008c, 2008d, 2008e). Isso ganha maior importância quando da implantação da integração lavoura-pecuária em SPD, notadamente em pastagens não degradadas fisicamente, ou seja, sem impedimentos físicos, como trieiros e camadas compactadas, para a adequada implantação das culturas.

4.2 Calagem no sistema plantio direto

A calagem é uma das práticas mais comumente utilizadas para correção da acidez do solo e, quando realizada de modo adequado, eleva o pH e a saturação por bases, além de fornecer Ca e Mg. A elevação do pH tem influência direta na redução da toxidez por Al, podendo alterar a disponibilidade de nutrientes para as plantas (AZEVEDO; KÄMPF; BOHNEN, 1996; MIRANDA; MIRANDA, 2000).

Para Fageria e Zimmermann (1998), o pH (H₂O) ideal para as culturas de soja, feijão, milho e trigo está em torno de 6,0, ficando clara a necessidade de correção dos solos das regiões que se caracterizam pela acidez elevada. Porém, como os materiais corretivos utilizados são pouco solúveis e os produtos da reação do calcário têm mobilidade limitada, a ação da calagem normalmente fica restrita às camadas superficiais do solo, conforme observado por Ritchey et al. (1982) e Caires et al. (1998). Por outro lado, alguns pesquisadores têm demonstrado que os benefícios acima citados podem ocorrer na subsuperfície do solo, mesmo com aplicação superficial de calcário sem incorporação (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; CAIRES et al., 1998, 1999; RHEINHEIMER

et al., 2000; CORRÊA et al., 2007; SORATTO; CRUSCIOL, 2008c). Outro benefício que também pode ser citado, é a redução do custo de produção, visto que, com a aplicação superficial não são utilizadas operações de aração e gradagem para incorporação do calcário, gerando uma economia de cerca de 40%, em relação ao calcário incorporado (CAIRES; BARTH; GARBUIO, 2006).

A mínima movimentação do solo no SPD promove modificações químicas no solo em função do acúmulo de resíduos vegetais, corretivos e fertilizantes na sua superfície e, estas modificações ocorrem de forma gradual e progressiva, a partir da superfície do solo, e afetam tanto a disponibilidade de nutrientes quanto o processo de acidificação do solo.

Caires et al. (1998) e Pöttker e Ben (1998) enfatizam que o calcário em superfície, após 28 e 34 meses da sua aplicação, respectivamente, corrige a acidez, aumentando o pH e elevando os teores de Ca e Mg trocáveis do solo até à profundidade de 0,05 m e, em menor grau, na camada de 0,05 – 0,10 m. Do mesmo modo, Corrêa et al. (2007) estudando o efeito de diferentes corretivos da acidez do solo, verificou que, aos 3 e 15 meses após a aplicação superficial, o calcário elevou o pH apenas nos primeiros 0,05 m e 0,10 m, respectivamente. Mello et al. (2003) destacam que em apenas 12 meses, os atributos químicos do solo (pH, H+Al, Ca e Mg) podem ser alterados positivamente na camada de 0,00 – 0,10 m.

Por outro lado, Oliveira e Pavan (1996) constataram diminuição do alumínio trocável e aumento do pH do solo em maiores profundidades, observando efeito até 0,40 m de profundidade, 32 meses após aplicação de calcário na superfície em um Latossolo Vermelho, na região de Ponta Grossa (PR), em SPD estabelecido a partir do sistema convencional de preparo. Caires et al. (1999, 2006b) constataram que a aplicação superficial de calcário, em SPD, apresentou eficiência na correção da acidez das camadas superficiais e subsuperficiais do solo até 0,60 m. Soratto e Crusciol (2008c), avaliando doses de calcário em um Latossolo Vermelho Distroférico na região de Botucatu (SP), observaram elevação do pH do solo até 0,40 m aos 12 meses após aplicação do calcário, e elevação dos teores de Ca e Mg até 0,40 m aos 12 e 18 meses após a aplicação inicial do corretivo. Caires et al. (2011) avaliaram o efeito da calagem em superfície, após 8 anos da aplicação, e observaram redução da acidez até 0,60 m de profundidade. Caires et al. (2015), avaliando os efeitos da calagem após 2, 4 e 6 anos da aplicação de doses calcário, num Latossolo Vermelho, constataram aumento linear do pH até a profundidade de 0,20 m.

A dissolução do calcário, em solos ácidos, promove a liberação de ânions (OH^- e HCO_3^-), os quais reagem com os cátions de reações ácidas da solução do solo (H^+ , Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+}), havendo posteriormente a formação e a migração de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ para camadas mais profundas do solo (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; RHEINHEIMER et al., 2000; CAIRES et al., 2005).

Costa e Rosolem (2007), em estudos com calagem em SPD, verificaram aumento nos teores de Mg na solução do solo, em todo perfil do solo, indicando a movimentação para as camadas subsuperficiais do Mg oriundo da reação de hidrólise do calcário dolomítico aplicado em superfície. Os resultados confirmaram a hipótese, estabelecida por Oliveira e Pavan (1996), de formação de pares iônicos entre o bicarbonato e o cálcio e o magnésio, facilitando sua movimentação no perfil do solo.

Quando o pH (em H_2O) da solução do solo alcança valores superiores à 5,5, a espécie HCO_3^- passa a estar presente como forma estável na solução e sua concentração aumenta até atingir valores máximos na faixa de pH 8,0 e 8,5 (BOHN; MCNEAL; O'CONNOR, 2001). Nessas condições, o HCO_3^- pode migrar com o Ca^{2+} e o Mg^{2+} , corrigindo a acidez do solo além do local de aplicação do calcário (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; COSTA; ROSOLEM, 2007). No entanto, enquanto existirem cátions ácidos, a reação de neutralização da acidez ficará limitada à camada superficial, retardando o efeito em subsuperfície (RHEINHEIMER et al., 2000). Assim, para que a neutralização da acidez ocorra em subsuperfície, os produtos da dissolução do calcário devem primeiro corrigir a camada superficial do solo para depois serem lixiviados para camadas mais profundas.

O critério e as recomendações de calagem para o estabelecimento do SPD segue a recomendação para o sistema convencional, e os grandes questionamentos surgem por ocasião da aplicação do calcário no SPD estabelecido, quando a acidez do solo estiver limitando as produtividades das culturas. O conhecimento da dinâmica da correção da acidez a partir da superfície do solo no SPD, ao longo do tempo, é necessário para que possam ser estabelecidos ajustes na recomendação da calagem (doses e frequência) (AMARAL; ANGHINONI, 2001; CAIRES et al., 2005).

4.2.1 Fatores que afetam a correção da acidez do solo em aplicações superficiais

É possível que ocorra movimentação física do calcário aplicado da superfície para maiores profundidades, sendo atribuída a diversos fatores. O mais conhecido é o deslocamento físico de partículas do corretivo através de canais formados por raízes mortas, mantidos intactos em razão da ausência de preparo do solo (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; PETRERE; ANGHINONI, 2001; AMARAL et al., 2004). Há também, a formação de planos de fraqueza no solo que permitem o deslocamento físico de finas partículas de calcário através do movimento descendente da água (PETRERE; ANGHINONI, 2001; AMARAL et al., 2004). Porém, esse mecanismo, sozinho, provavelmente não justifica os expressivos efeitos da calagem superficial em profundidade observados em diversos experimentos, principalmente quando a área encontra-se recém implantada no SPD. A lixiviação de partículas finas do calcário deve ter pequena contribuição para a correção da acidez em profundidade, visto que uma partícula muito fina (por exemplo, com diâmetro de 0,001 mm) é 2.000 vezes maior que o íon Ca^{2+} hidratado (ALCARDE, 1992). Dessa forma, a maior parte do efeito da calagem em profundidade é decorrente da movimentação de íons (TEDESCO; GIANELLO, 2000). Assim, a água que percola no solo normalmente encontra-se enriquecida com os produtos da dissolução do calcário, responsáveis pela neutralização da acidez e aumento dos cátions de reação básica, permitindo maior atuação em profundidade (RHEINHEIMER et al., 2000).

Também pode ocorrer arrasto de calcário pela água de infiltração nos canais deixados pelas raízes, nas galerias de organismos do solo e macrocanais biológicos (RHEINHEIMER et al., 2000), formados pela mesofauna do solo (ácaros e colêmbolas) e macrofauna (minhocas, besouros, cupins, formigas, centopéias, aranhas, lesmas e caracóis).

A pequena mobilização do solo que ocorre somente na linha de semeadura no SPD, também contribui com a movimentação física do calcário em função da incorporação ocorrida nesta região, e, com os repetidos ciclos de semeadura, auxilia no caminhamento em profundidade das partículas do corretivo (RHEINHEIMER et al., 2000).

Para Caires et al. (1999), a ausência de efeito da calagem superficial sobre o pH nas camadas intermediárias de solo, voltando a atuar em profundidade, é um forte indício de que não deve ocorrer acentuado deslocamento físico do calcário, devendo a elevação do pH em camadas mais profundas do solo ser atribuída a outros mecanismos.

É provável que os ânions, como nitratos, sulfatos e cloretos, originados da decomposição dos resíduos vegetais ou da adição de fertilizantes, contribuam para o caminamento do Ca e Mg e, em menor grau, de outros cátions, através da formação de pares iônicos (CAIRES et al., 1998; SILVA; VALE, 2000). Existem muitos exemplos na literatura demonstrando a correção da acidez do subsolo pela adição de calcário e fertilizantes nitrogenados (PEARSON; ABRUNA; VICENTE-CHANDLER, 1962; ADAMS; WHITE; DAWSON, 1967; CRUSCIOL et al., 2011). Contudo, alguns trabalhos têm constatado que a aplicação de fertilizantes amoniacais não tem alterado a eficiência da aplicação superficial de calcário em melhorar a acidez em subsuperfície (ROSOLEM; FOLONI; OLIVEIRA, 2003; CAIRES et al., 2015).

No SPD, grande quantidade de NO_3^- é observada no solo, seja devido ao acúmulo de matéria orgânica, que ocorre em função das sucessões e rotações de culturas, ou pela aplicação de adubos nitrogenados que são utilizadas para obtenção de altas produtividades (CAIRES et al., 1998). Silva e Vale (2000) constataram que a movimentação de Ca em profundidade no perfil do solo foi mais dependente da fertilização nitrogenada do que dos resíduos vegetais. Crusciol et al. (2011) constataram que a aplicação de N-inorgânico na cultura do arroz de terras altas e no milho, promoveu lixiviação de bases e correção da acidez no perfil do solo em área que recebeu calagem superficial. A elevação do pH no subsolo decorrente da aplicação de N-inorgânico pode ser atribuída ao sistema antiporte das plantas, que promove a exsudação de OH^- ou HCO_3^- pelas raízes, para manter o equilíbrio iônico nas células, devido à elevada absorção de NO_3^- das camadas mais profundas do solo, o que resulta em elevação do pH na rizosfera (QUAGGIO, 2000).

A eficiência da calagem superficial sobre a elevação do pH, movimentação de Ca e Mg trocáveis e redução da acidez potencial (H^+Al), nas camadas subsuperficiais, tem sido associada ao manejo de resíduos orgânicos (MIYAZAWA; PAVAN; SANTOS, 1996; OLIVEIRA; PAVAN, 1996; ZIGLIO; MIYAZAWA; PAVAN, 1999; MIYAZAWA; PAVAN; FRANCHINI, 2000, 2002; MEDA et al., 2002). Segundo Miyazawa et al. (2000), a permanência de resíduos vegetais na superfície e a ausência de revolvimento do solo reduzem a taxa de decomposição dos ligantes orgânicos por microrganismos, sendo que com a disponibilidade de água, os compostos orgânicos podem ser solubilizados e lixiviados. Tal fato, somado ao constante aporte de resíduos, possibilita

a produção contínua desses compostos orgânicos, podendo resultar em sua perenização no solo (AMARAL; ANGHINONI; DESCHAMPS, 2004).

De acordo com Miyazawa et al. (1996) e Franchini et al. (2001), o provável mecanismo de lixiviação de bases trocáveis em áreas de cultivo sem preparo do solo está relacionado à formação de complexos orgânicos hidrossolúveis presentes nos restos das plantas, sendo esses ácidos orgânicos responsáveis por promoverem as maiores alterações químicas até as camadas subsuperficiais do solo. Entretanto, Araújo (2003), estudando a aplicação de extratos de milho e braquiária ($12,5 \text{ t ha}^{-1}$) em colunas deformadas de um Latossolo Vermelho distroférico argiloso, não verificou efeito sobre a movimentação de calcário aplicado em superfície, sendo isso também observado por Amaral, Anghinoni e Deschamps (2004), trabalhando com um Cambissolo Húmico Alumínico Léptico, e Caires et al. (2006c) e Moraes et al. (2007) num Latossolo Vermelho. No estudo de Amaral, Anghinoni e Deschamps (2004), a aplicação de calcário + ácido cítrico (citrato de potássio) promoveu aumento da ordem de 10 vezes nos teores de Al^{3+} e K^+ na solução percolada. Contudo, após 60 dias, os efeitos sobre os atributos químicos da fase sólida (pH, Ca^{2+} , Mg^{2+}) foram semelhantes aos dos demais tratamentos (calcário ou calcário + material vegetal), mesmo com a alta dose de ácido cítrico e potássio aplicada, equivalente a 940 kg ha^{-1} de ácido cítrico na forma de citrato de potássio.

Assim, o efeito benéfico do resíduo vegetal na mobilidade dos produtos da dissolução do calcário no solo pode ser dependente da espécie de planta, das variedades de uma mesma espécie (MEDA et al., 2002) e com o estágio em que a planta é manejada (FRANCHINI et al., 2003).

A espécie de planta utilizada para produção de palha no SPD, por si só, pode interferir no processo de acidificação do solo. Algumas espécies têm a capacidade de aumentar o pH da rizosfera e, conseqüentemente, do solo. O exemplo mais marcante é a aveia-preta, que absorve mais ânions do que cátions, havendo assim, excesso de cargas negativas que deve ser compensado pelo metabolismo da planta para manter o equilíbrio elétrico no citoplasma das células. As plantas conseguem esse equilíbrio mediante a exsudação de ânions como OH^- ou HCO^- pelas raízes o que resulta em elevação do pH na rizosfera (QUAGGIO, 2000).

Algumas características intrínsecas aos solos, principalmente aquelas relacionadas com o tamponamento, também afetam a profundidade de atuação das reações de correção do solo provocadas pela calagem (ERNANI; RIBEIRO; BAYER,

2001). O poder tampão do solo está ligado à sua capacidade de resistir à aplicações de ácidos, ou bases, sem ocorrer grandes alterações no pH. Esta capacidade encontra-se associada aos constituintes do solo. Assim, solos argilosos ou com elevados teores de matéria orgânica, geralmente apresentam maior poder tampão, pois os pontos de troca dos colóides orgânicos e minerais, funcionam como receptores e fornecedores de H^+ , mantendo o pH do solo sem grandes alterações (LUCHESE; FAVERO; LENZI, 2001). Pöttker e Ben (1998) observaram que em um solo de textura média houve maior efeito da calagem aplicada em superfície na correção da acidez em profundidade, quando comparado com um solo de textura argilosa.

A qualidade do corretivo utilizado também pode ter influência na velocidade de correção do solo. Em linhas gerais, quanto menor a granulometria do calcário, mais rápida é a sua reação de neutralização. Calcário com granulometria mais fina apresenta maior reatividade que calcário com granulometria mais grosseira no SPD (MELLO et al., 2003). No entanto, a velocidade de reação do corretivo e o efeito residual são duas grandezas inversas, que se contrapõem. Os materiais finamente moídos reagem rapidamente no solo, mas seu efeito é mantido por um período mais curto do que materiais mais grosseiros (TISDALE; NELSON, 1984).

4.3 Gessagem no sistema plantio direto

Outro problema comum, principalmente em solos de bioma de Cerrado, é a deficiência de Ca na subsuperfície do solo, associada ou não à toxidez de Al. As limitações causadas pela acidez no subsolo à produtividade agrícola, devido à restrição ao crescimento radicular e à absorção de água e nutrientes pelas culturas, têm sido amplamente relatadas na literatura (PAVAN; BINGHAM; PRATT, 1982; RITCHEY; SILVA; COSTA, 1982; QUAGGIO, 2000). A melhoria das condições do solo abaixo das camadas superficiais pode ser um fator de aumento e/ou estabilidade de produtividade das culturas, especialmente quando há ocorrência de veranicos, comuns nas regiões com inverno seco, notadamente no Cerrado.

O gesso agrícola é constituído principalmente por sulfato de cálcio ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), um subproduto da indústria do ácido fosfórico, que ocorre de forma similar também em jazidas (SUMNER, 1995; SOUSA; LOBATO; REIN, 1996), sendo largamente disponível em muitas regiões do mundo. No Brasil, o gesso originário da indústria do ácido

fosfórico é o mais utilizado na agricultura, já que são produzidas cerca de 4,8 milhões de toneladas anualmente (RAIJ, 2008)

O gesso agrícola tem sido utilizado em solos ácidos como um produto complementar ao calcário (BRAGA; VALE; MUNIZ, 1995; SILVA et al., 1998). A alta mobilidade do gesso tem sido atribuída a sua maior solubilidade e à presença de um ânion estável (SO_4^{2-}). Este ânion forma um par iônico neutro com o íon Ca^{2+} , e com isto leva o cálcio até a subsuperfície do solo. O íon SO_4^{2-} pode ainda formar $\text{Al}(\text{SO}_4)^+$, que é menos tóxico (PAVAN; BINGHAM; PRATT, 1982, 1984). A liberação de OH^- pelo SO_4^{2-} , mediante troca de ligantes, com a formação de estruturas hidroxiladas de alumínio, mecanismo chamado por Reeve e Sumner (1972) de “autocalagem” e a precipitação de alumínio, com os minerais Basaluminita e Alunita (ADAMS; RAWAJFIH, 1977), também têm sido indicadas. Isto demonstra que o gesso pode reduzir a atividade do alumínio em solução, e também aumentar os teores de Ca, e indiretamente, os valores de pH na subsuperfície do solo, em consequência do seu uso (SUMNER et al., 1986; FARINA; CHANNON, 1988). A eficiência do gesso na redução dos efeitos da acidez no subsolo tem sido demonstrada por vários autores (RAIJ et al., 1998; CAIRES et al., 2003, 2004; MARQUES, 2008; SORATTO; CRUSCIOL, 2008c, 2008d; CAIRES; JORIS; CHURKA, 2011). O subsolo, possuindo condições químicas ideais, promove maior proliferação de raízes em profundidade, resultando em maior aproveitamento de água e de nutrientes pelas plantas (RITCHEY et al., 1980; FARINA; CHANNON, 1988).

A aplicação superficial de gesso agrícola no SPD tem reduzido o Al trocável e aumentado os teores Ca trocável e do sulfato, bem como, em alguns casos, elevado de forma indireta os valores de pH em camadas subsuperficiais do solo (CAIRES et al., 1998, 1999; MARQUES, 2008; SORATTO; CRUSCIOL, 2008c, 2008d; CAIRES; JORIS; CHURKA, 2011; COSTA, 2011).

Os efeitos positivos da gessagem foram observados após 24 meses por Caires et al. (1998), e se mantiveram consistentes até 36 meses da sua aplicação (CAIRES et al., 1999). Caires et al. (2003) observaram aumento do pH nas camadas de 0,20-0,40 m aos 8 meses e de 0,40-0,60 m aos 20 e 32 meses após a aplicação superficial de gesso. Soratto e Crusciol (2008c) concluíram que a aplicação de gesso promoveu aumento no pH, e nos teores de Ca, S e reduziu os teores de Al trocável no solo até 18 meses após a aplicação. Os autores atribuíram esse efeito a uma reação de troca de ligantes na superfície das partículas de solo, envolvendo neutralização parcial da acidez (REEVE;

SUMNER, 1972). Em outros trabalhos foram verificados aumentos nos teores de Ca no perfil do solo, lixiviação do Mg (CAIRES et al., 2001, 2003, 2004; CAIRES; FELDHAUS; BLUM, 2001; CAIRES; JORIS; CHURKA, 2011) e redução do Al trocável (CAIRES et al., 2001; SORATTO; CRUSCIOL, 2008c, 2008d), devidos à aplicação de gesso na superfície.

Apesar do grande potencial de uso do gesso agrícola na melhoria dos atributos químicos das camadas subsuperficiais dos solos, mediante elevação do teor de Ca e redução da atividade do Al, a indicação da gessagem em substituição à prática da calagem não é recomendada (SILVA et al., 1998). Além disso, ainda existem dúvidas quanto ao método de recomendação do produto e em que condições pode-se esperar respostas das culturas à aplicação superficial de gesso combinado com calcário em superfície no SPD.

4.4 Influência da calagem e gesso agrícola na matéria orgânica do solo

A matéria orgânica do solo (MOS) é um componente complexo, dinâmico e reativo. É um importante constituinte do solo porque afeta as propriedades químicas, físicas e biológicas. Ela possui função nutricional, ao servir como fonte de nutrientes para o crescimento de plantas; função biológica, ao influir na atividade da microbiota do solo; e função física, ao promover boa estruturação e aeração do solo e aumentar a retenção de água. Em adição, a matéria orgânica do solo está envolvida na agregação das partículas do solo, na quelação de metais, na bioatividade e na persistência e biodegradabilidade de agrotóxicos (STEVENSON, 1994).

A MOS pode ser dividida em duas reservas, diferindo em estrutura e função. A fração “leve” (livre e oclusa) é formada por resíduos de plantas e animais não decompostos e seus produtos de decomposição parcial possuem rápida taxa de movimento no solo, e servem como fonte de nutrientes para as plantas, além de apresentar densidade específica mais baixa do que a dos minerais do solo. A fração “pesada” inclui produtos mais processados formando complexos organominerais, apresentando baixo movimento e alta densidade específica, devido estar intimamente associada com os minerais do solo (GREENLAND, 1971).

O carbono orgânico particulado (COP), fração “livre”, é considerado um bom indicador da qualidade das práticas de manejo do solo

(CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992), e está diretamente relacionado com a quantidade, qualidade e frequência da adição dos resíduos no solo (VIEIRA et al., 2007; SÁ; LAL, 2009). A adição de resíduos culturais, juntamente com a manutenção da estrutura do solo, resulta em aumento do carbono orgânico associado aos minerais (COAM), fração “pesada”, um parâmetro que reflete a relação entre C e a fração silte + argila, principal fonte de cargas negativas da MOS (SÁ et al., 2001). Estes autores num Oxisolo, em experimentação de longa duração (22 anos), estudaram sistemas de preparo do solo, e constataram aumento no C orgânico do solo nas frações <20- μm até a profundidade de 0,40 m e nas frações 20-53- μm até a profundidade de 0,10 m no SPD. Essa interação é lenta e gradual, criando uma conexão das frações mais lábeis para mais estável e complexa, à nível mineral.

A calagem é uma das práticas agrícolas essenciais para solos tropicais pois visa elevar o pH do solo, neutralizar a toxidez causada pelo Al^{3+} e Mn^{2+} trocáveis, elevar os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , aumentar a disponibilidade de nutrientes como o P e o Mo, além de melhorar a eficiência dos fertilizantes (CASTRO; CRUSCIOL, 2013b; CAIRES et al., 2015). Concomitantemente à elevação do pH do solo, há aumento da atividade microbiana (EKENLER; TABATABAI, 2003), a qual promove acelerada decomposição da MOS (YAO et al., 2009) e pode levar a significantes perdas de C, especialmente na fração mais leve (CHAN; HEENAN, 1999). Contudo, de médio a longo prazo, este efeito pode ser reduzido devido à elevada produção de biomassa por área, de raízes e parte aérea pela calagem (RIDLEY et al., 1990; HATI et al., 2008; BRIEDIS et al., 2012b; CASTRO et al., 2015), e ocorre em consequência da melhoria da fertilidade do solo.

Castro et al. (2015), num Latossolo Vermelho, sob condições tropicais, estudaram o efeito da aplicação de corretivos de acidez do solo em superfície, e após 5 anos da aplicação, constataram incremento no C orgânico total do solo até a profundidade de 0,10 m. Sob condições subtropicais, num Latossolo Vermelho, (BRIEDIS et al., 2012c) observou-se que a aplicação de calcário no SPD aumentou os teores de C orgânico até a profundidade de 0,20 m, após 15 anos da primeira aplicação dos corretivos e 7 anos da reaplicação. Os autores atribuíram esses efeitos a melhoria na fertilidade do solo, como o aumento na saturação por bases e o decréscimo na saturação por Al^{3+} trocável. Também em experimento de longa duração em solos com predominância de minerais de argila de baixa atividade (caulinita e ilita), sob condições tropicais, Hati et al. (2008)

também observaram que a aplicação de calcário promoveu aumento significativo no C orgânico. Os autores atribuíram esses resultados ao maior aporte de resíduos culturais ao sistema produtivo em decorrência da calagem.

A calagem pode aumentar o COP e o COAM no longo prazo, mas o maior impacto é observado no COP (BRIEDIS et al., 2012a). Este impacto no COP é devido à elevada produção de biomassa pela parte aérea e raízes, decorrente da calagem. O aumento no COAM pode ser resultado de dois processos: (1) migração do C do COP com o tempo, e (2) ligação da matéria orgânica com os coloides do solo. A ligação da MOS pode ocorrer com a elevação da concentração do Ca^{2+} e a maior força iônica decorrente da calagem que resulta na redução na espessura da dupla camada, com a consequente redução da força repulsiva entre as partículas do solo e melhorando a agregação (ROTH; PAVAN, 1991).

Outro mecanismo pode ser a formação de complexos entre as argilas e a matéria orgânica via pontes catiônicas. Neste caso, o cátion divalente Ca^{2+} pode atuar com agente ligante entre a matéria orgânica e as argilas através da união das cargas negativas encontradas na superfície dos dois coloides (SIX et al., 2004; BRONICK; LAL, 2005; BRIEDIS et al., 2012b).

São escassos os trabalhos que reportam a influência da aplicação do gesso agrícola na atividade microbiana em solos ácidos, e os poucos resultados tem indicado que o gesso também pode exercer aumento na atividade, visto que, o Ca é um componente essencial para os microorganismos (NAHAS; DELFINO; ASSIS, 1997). Assim, também pode ocorrer aumento da decomposição da MOS, consequentemente, perdas de C. Por outro lado, além do suprimento por Ca, o íon SO_4^{2-} pode ainda formar $\text{Al}(\text{SO}_4)^+$, que é menos tóxico (PAVAN; BINGHAM; PRATT, 1982, 1984), promovendo maior crescimento radicular e acúmulo de biomassa, que pode reduzir as perdas de C a médio-longo prazo. Costa (2011), num Latossolo Vermelho distroférico, após 60 meses da reaplicação do calcário e gesso, observou pequeno aumento na MOS. Contudo, são escassos os estudos que reportam o efeito da aplicação de gesso ou de gesso combinado com a calagem nas frações da matéria orgânica.

4.5 Influência da calagem e da gessagem nos atributos físicos do solo

A calagem em solos tropicais com PCZ baixo (próximo de 4), em que predomina a caulinita, eleva a carga líquida negativa e mesmo os com PCZ alto, em que predominam os óxidos de Fe e Al, reduz o efeito flocculante dos cátions trivalentes com maior espessura da dupla camada difusa, e, conseqüentemente, estes solos podem ficar suscetíveis à desagregação física (PRADO, 2003). Contudo, este efeito tende a prevalecer apenas no curto prazo (CASTRO; LOGAN, 1991; CHAN; HEENAN, 1999), sendo constantes os relatos da ausência de efeito ou até mesmo o aumento na agregação do solo pela aplicação de corretivos da acidez em sistema plantio direto em estudos de médio e longo prazos, ou seja, após 24 meses (CASTRO; CALONEGO; CRUSCIOL, 2011), 27 meses (CORRÊA et al., 2009), 5 anos (COSTA et al., 2004) e 12 anos (BORTOLUZZI et al., 2010).

Corrêa et al. (2009), em um Latossolo Vermelho distrófico textura média, constataram nas profundidades de 0-0,05 e 0,05-0,10 m maior percentagem de agregados na peneira de 4,0–2,0 mm, com a aplicação em superfície do calcário em relação ao controle, o que permitiu os autores inferirem que a calagem também promove agregação das partículas do solo abaixo da camada mais superficial, mesmo quando aplicado sobre a superfície do solo em plantio direto. Em outro estudo, Briedis et al. (2012b) constataram que o DMP de agregados, em um Latossolo Vermelho, foi influenciado pela calagem, sendo que a aplicação de 6 Mg ha⁻¹ e a reaplicação sete anos depois de mais 3 Mg ha⁻¹ de calcário proporcionaram maior DMP do que a aplicação isolada realizada somente em um ano.

Esses efeitos são em parte devido ao Ca, oriundo da calagem, e do controle do Al tóxico. O Ca pode ser um elemento crucial para a estabilização dos agregados do solo, através do seu papel na formação de complexos com a argila e a matéria orgânica através de ponte catiônica (BRONICK; LAL, 2005; BRIEDIS et al., 2012b). Além disso, a biomassa microbiana também constitui um importante agente de agregação do solo, sendo que a maior atividade microbiológica, favorecida pela calagem, relaciona-se com a produção de polissacarídeos que são agentes cimentantes de extrema importância na agregação do solo, principalmente em se tratando de macroagregados (TISDALL; OADES, 1982). O controle do Al tóxico promove maior desenvolvimento radicular, proporcionando aumento da pressão mecânica, do enovelamento das partículas organominerais, e esse maior desenvolvimento também pode aumentar a produção de

exsudatos com capacidade cimentante que contribuem para aproximação das partículas do solo.

O gesso agrícola, diferentemente do calcário, não altera o pH, assim, não aumenta a capacidade de troca de cátions. Por ser excelente fonte de Ca, e capaz de amenizar a toxicidade do Al, pode atuar como condicionador das estruturas do solo (ROSA JUNIOR et al., 2007), favorecendo a agregação e, conseqüentemente, melhorando a estrutura do solo. O uso de gesso é mais eficaz na melhoria da estrutura do solo por formar ponte catiônica entre o Ca com as argilas e a matéria orgânica do solo (ZHANG; NORTON, 2002). Há ainda outros atributos físicos como densidade do solo e porosidade que podem ser alterados pela combinação do sistema de manejo e a gessagem (COSTA et al., 2007).

Borges et al. (1997) observaram que doses elevadas de gesso (6,5 e 9,8 Mg ha⁻¹) promoveram efeito floculante no solo. Para Rosa Júnior et al. (2007), o uso de gesso agrícola reduziu os teores de argila dispersa em água, sendo que os menores valores foram obtidos com a dose de 2 Mg ha⁻¹ de gesso. Chi et al. (2012), estudando o efeito do gesso em solos salino-sódicos da China, verificaram que o gesso foi eficiente na melhoria das propriedades físicas e químicas do solo, aumentando a estabilidade de agregados e proporcionando maior crescimento e produtividade de grãos de arroz.

Na recuperação de uma área degradada, em um Latossolo Vermelho, Bonini e Alves (2012) avaliaram a qualidade física do solo utilizando-se adubos verdes, calcário, gesso e pastagem há 17 anos, e verificaram que o tratamento com guandu e braquiária com calagem e gesso proporcionou menor resistência do solo à penetração e menor densidade do solo até a profundidade de 0,30 m. Contudo, os autores relataram que não foi possível determinar se o efeito foi exclusivo da aplicação dos produtos e/ou da rotação de culturas estudadas. Assim, fica evidente que ainda carecem maiores estudos que explorem a combinação de calcário e gesso na qualidade física do solo.

4.6 Calagem e gessagem e a produção das culturas de milho, crambe e feijão-caupi em rotação no sistema plantio direto

A cultura do milho (*Zea Mays*) é um importante insumo para produção de uma centena de produtos, porém na cadeia produtiva de suínos e aves são consumidos aproximadamente 70% do milho produzido no mundo e entre 70 e 80% do

milho produzido no Brasil, possuindo ampla adaptação às condições brasileiras (GARCIA et al., 2006). No Brasil, a safra 2014/15 do milho (safra e safrinha) teve uma área plantada de 15,2 milhões de hectares, devendo ter produção de cerca de 79,0 milhões de toneladas (CONAB, 2015).

O milho é considerado sensível à acidez do solo, como a maioria das culturas, atingindo o máximo de produção por volta de 50-60% de saturação por bases (QUAGGIO, 2000). Vários estudos com aplicação superficial do calcário demonstraram a eficiência desta prática na produção de grãos de milho no SPD (MIRANDA; MIRANDA, 2000; MIRANDA; MIRANDA; REIN, 2005; CAIRES et al., 2015). Caires et al. (2015) estudaram os efeitos da calagem superficial (0, 4, 8, 12 Mg ha⁻¹) e de nitrogênio (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de NH₄NO₃-N) nas culturas do milho, soja, feijão e trigo, os quais constataram aumento na produtividade de grãos de milho com as doses de calcário, principalmente nos tratamentos que receberam as maiores doses de nitrogênio. O aumento observado pelos autores na dose calculada de 9,4 Mg ha⁻¹ de calcário em relação ao controle foram de 216 e 543% nos tratamentos que receberam 120 e 180 kg ha⁻¹ de NH₄NO₃-N, respectivamente. Porém, alguns estudos tem demonstrado elevada produtividade de milho obtidas na ausência de calagem, em solos com elevada acidez (pH baixo e Al³⁺ alto) sob SPD (GATIBONI et al., 2003; PIRES et al., 2003; CAIRES; JORIS; CHURKA, 2011). As explicações para essas elevadas produtividades de grãos em solos ácidos sob SPD têm sido relacionadas com os seguintes fatores: (a) menor toxicidade do Al para as plantas, (b) concentrações suficientes de cátions trocáveis e (c) maior umidade disponível no solo (CAIRES, 2013).

Na maioria das regiões do Brasil, principalmente nas que possuem distribuição de chuvas irregular, normalmente é realizado apenas um cultivo, o qual ocorre no período de primavera-verão, que consiste nas estações com mais chuvas. Assim, o solo fica descoberto favorecendo o desenvolvimento e a proliferação de plantas daninhas (BORGHI et al., 2008; CASTRO et al., 2011), e sujeito às intempéries climáticas o resto do ano, o que muitas vezes causa erosão e conseqüente perda de nutrientes por lixiviação (GASSEN; GASSEN, 1996), sendo esta perda dependente das condições climáticas da região e das culturas utilizadas. Portanto, a sustentabilidade do SPD é dependente do aumento do potencial de exploração do perfil do solo e da escolha correta das espécies vegetais, para que proporcionem a cobertura adequada do solo e todos os benefícios desse sistema, como o aumento da rentabilidade econômica por área.

Considerando esses aspectos, acredita-se que o Crambe (*Crambe abyssinica* Hochst), por tratar-se de cultura de inverno, tem grande potencial para ocupar essas áreas que ficam ociosas em parte do ano, além de constituir-se em matéria-prima alternativa para a produção de biodiesel. Atualmente, na produção de biodiesel, empresas e órgãos estaduais e federais veem a cultura com grande potencial de produção de óleo, principalmente pelos atributos agrônômicos e tecnológicos, como: teor de óleo, produtividade e ciclo da cultura que se enquadra nos sistemas produtivos das regiões caracterizadas como de inverno seco.

Cultivada em maior escala no México e nos Estados Unidos para produção de óleo industrial, o cultivo de crambe iniciou-se no Brasil em 1995, na Fundação MS, no município de Maracaju (MS), porém, na época, a planta era estudada somente para fins de rotação de cultura (ECHEVENGUÁ, 2007). Nos estudos realizados, destacaram como vantagens do Crambe: tolerância à seca (cerca de 250 mm para completar seu ciclo) e à geada depois de estabelecida; elevada precocidade (90 dias de ciclo em média); elevado teor de óleo (34% a 38%) e produtividade entre 1.000 e 1.500 kg ha⁻¹, na safra de 2007.

A saturação por bases adequada para o desenvolvimento e produção de grãos do crambe em solos de textura média encontra-se entre 50-65% (JANEGITZ et al., 2010). Castro (2012), num Latossolo Vermelho, estudando o uso diferentes fontes de corretivos da acidez do solo, visando elevar a saturação por bases a 70%, observou aumento de 48% na produção de grãos de crambe em relação ao controle. Alves et al. (2015), num Latossolo Vermelho, estudaram a influência de diferentes níveis de saturação por bases no desenvolvimento e produção de grãos de crambe, e concluíram que o melhor nível de saturação por bases foi 50%.

Outra cultura com potencial de ser explorada nessas regiões é o feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L. Walp). Atualmente, a área cultivada com essa leguminosa é de aproximadamente um milhão de hectares, dos quais, aproximadamente 90% estão situados na região Nordeste. A cultura apresenta grande importância na alimentação das populações desta região, além de gerar emprego e renda, tanto na zona rural, quanto na zona urbana (LIMA et al., 2007). No entanto, a cultura vem se expandindo no cerrado, sendo considerada como nova opção para o cultivo na safrinha (FREIRE FILHO et al., 2011), principalmente pela baixa exigência hídrica durante seu ciclo de desenvolvimento, sendo necessário um mínimo de 300 mm para que produza

razoavelmente (EMBRAPA, 2003). Assim, na safra 2009/2010, em áreas de cerrado altamente tecnificadas, foi obtida uma produtividade média de 1100 kg ha⁻¹ (SININBU, 2009), superior à média nacional, que é de aproximadamente 400 kg ha⁻¹ (IBGE, 2007). O feijão-caupi produzido na região central do Brasil é destinado em sua grande maioria para exportação, em especial para a Índia, Egito, Turquia, Israel, Portugal, Canadá e Estados Unidos (EMBRAPA, 2007).

Segundo Araújo e Watt (1988) e Irino (2007), o feijão-caupi é uma planta que apresenta grande tolerância ao Al do solo. Dentro deste contexto, Cravo e Smyth (1990) estudaram doses crescentes de calcário na produtividade de grãos de feijão-caupi dos cultivares Ipean V-69 e Vita-3 em um Latossolo Amarelo, e verificaram rendimento relativo de grãos maior que 80% no controle com 58% de saturação por alumínio, em relação aos tratamentos com calagem. Em outro estudo, Smyth e Cravo (1992) constataram ausência de resposta do feijão-caupi à calagem num Latossolo Amarelo muito argiloso, após três anos de cultivo contínuo, com saturação por Al igual a 30%.

Contudo, ainda faz-se necessária a obtenção de maiores informações a respeito do uso de corretivos a fim de aprimorar as recomendações já existentes, como no caso do milho, e dar embasamento científico para novas recomendações, como para a cultura do crambe e do feijão-caupi que ainda carecem de recomendações oficiais. Para essas duas últimas culturas, ainda são escassos os trabalhos que visam avaliar a influência da gessagem, bem como sua associação com a calagem, na produção de grãos.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Localização e caracterização climática da área experimental

O experimento foi instalado na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP, localizada no município de Botucatu (SP), tendo como coordenadas geográficas 48° 42' 64" de longitude Oeste de Greenwich e 22° 83' 03" de latitude Sul, com altitude de 765 m.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima predominante na região é do tipo Cwa, que se caracteriza pelo clima tropical de altitude, com inverno seco e verão quente e chuvoso (LOMBARDI NETO; DRUGOWICH, 1994). Os dados diários referentes à precipitação pluvial e às temperaturas máxima e mínima durante a condução do experimento estão apresentados na Figura 1.

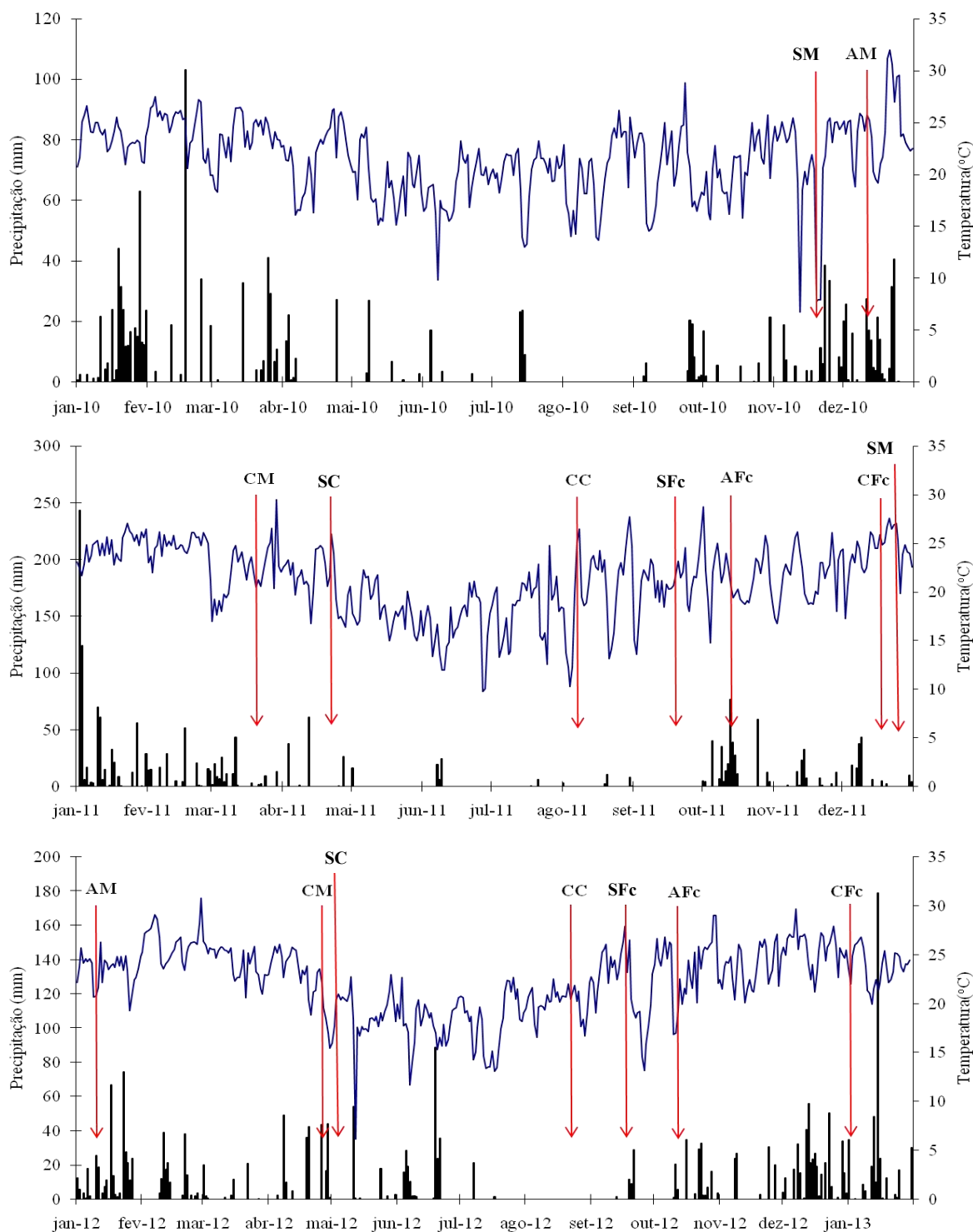


Figura 1. Precipitação pluvial (■) e temperaturas médias (—), registradas durante a condução do experimento, nos anos agrícolas de 2010/2011, 2011/2012 e 2012/13. (SM: semeadura do milho; AM: adubação de cobertura do milho; CM: colheita do milho; SC: semeadura do crambe; CC: colheita do crambe; SFc: semeadura do feijão-caupi; AFc: Adubação de cobertura do Feijão-caupi e CFc: Colheita do Feijão-caupi).

5.2 Histórico da área experimental e caracterização do solo

Antes da instalação do experimento a área permaneceu em pousio nos anos de 1999 e 2000, sendo que em fevereiro de 2001 foi cultivada soja mediante preparo de solo convencional (uma aração e duas gradagens). Em outubro de 2001 a área experimental foi subsolada e semeou-se guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.).

O presente trabalho é a continuidade de um estudo iniciado no ano agrícola 2002/2003, mantendo-se os mesmos tratamentos de calagem e gessagem, no SPD com rotação/sucessão de culturas. Nos anos agrícolas 2002/03, 2003/04, 2004/05, 2005/06, 2006/07, 2007/08, 2008/09, 2009/2010, 2010/2011 e 2011/2012 foram cultivadas as seguintes culturas de safra e entressafra: arroz/aveia preta, feijão/aveia preta, amendoim/aveia branca, amendoim/aveia branca, milho consorciado com braquiária, milho consorciado com braquiária, soja/aveia preta, soja/sorgo granífero, milho/crambe/feijão-caupi e milho/crambe/feijão-caupi, respectivamente.

Mediante levantamento detalhado (CARVALHO; ESPÍNDOLA; PACCOLA, 1983) e utilizando-se o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 2006), o solo da área experimental é denominado de Latossolo Vermelho distroférico.

Em Agosto de 2002 foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, para análise granulométrica (Tabela 1).

Tabela 1. Características granulométricas do solo da área (Agosto de 2002).

| Profundidade | Areia | Argila | Silte |
|---------------------|-----------------------|---------------|--------------|
| (m) | (g kg ⁻¹) | | |
| 0-0,20 | 545 | 347 | 108 |
| 0,20-0,40 | 513 | 360 | 127 |
| 0,40-0,60 | 495 | 383 | 122 |

Cada amostra foi composta por 12 amostras simples.

Ainda em agosto de 2002 e 2004 e outubro de 2010 o solo foi amostrado, na profundidade de 0-0,20 m, para realização de análise química necessária para o cálculo de necessidade de calagem. As análises químicas foram realizadas de acordo

com a metodologia proposta por Raij et al. (2001), cujos resultados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Atributos químicos do solo antes das aplicações dos insumos.

| Prof. | pH | M.O. | P(resina) | H+Al | Al | K | Ca | Mg | CTC | V |
|-----------------|----------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------------|------|-----|------|------|-----|-----|
| (m) | (CaCl ₂) | (g dm ⁻³) | (mg dm ⁻³) | (mmol _c dm ⁻³) | | | | | | (%) |
| Agosto de 2002 | | | | | | | | | | |
| 0-0,20 | 4,2 | 21 | 9 | 37 | 6,5 | 1,2 | 14,0 | 5,0 | 58 | 37 |
| 0,20-0,40 | 3,9 | 22 | 6 | 83 | 17,9 | 0,2 | 17,6 | 4,8 | 105 | 22 |
| 0,40-0,60 | 3,9 | 23 | 4 | 100 | 24,8 | 0,2 | 18,6 | 3,7 | 123 | 18 |
| Agosto de 2004 | | | | | | | | | | |
| 0-0,20 | 4,9 | 27 | 35 | 35 | 2,3 | 1,1 | 24 | 10,0 | 70 | 50 |
| 0,20-0,40 | 4,2 | 23 | 14 | 58 | 12,9 | 0,7 | 9,6 | 4,5 | 73 | 21 |
| 0,40-0,60 | 4,0 | 23 | 15 | 78 | 17,6 | 0,6 | 8,1 | 3,2 | 90 | 14 |
| Outubro de 2010 | | | | | | | | | | |
| 0-0,20 | 4,7 | 27 | 34 | 42 | 4,0 | 1,6 | 23,0 | 14,0 | 78 | 47 |
| 0,20-0,40 | 4,0 | 26 | 5 | 85 | 10,2 | 0,3 | 8,4 | 5,7 | 99 | 15 |
| 0,40-0,60 | 3,8 | 28 | 4 | 127 | 15,8 | 0,2 | 5,2 | 4,4 | 137 | 7 |

Cada amostra foi composta por 12 amostras simples. ⁽¹⁾ Não foi determinado.

5.3 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro repetições. Os tratamentos foram constituídos por: 1 - controle, 2 - aplicação de calcário (para elevar a saturação por bases a 70%), 3 - aplicação de gesso (6 x teor de argila), e 4 - aplicação de calcário + gesso.

A dimensão de cada parcela foi de 48,6 m² (5,4 x 9,0 m). Foram mantidas distâncias de 8,0 m entre as parcelas dentro de cada bloco e de 3,0 m entre os blocos.

As doses de calcário foram calculadas (Equação 1) de acordo com a análise química do solo na profundidade de 0-0,20 m (Tabela 2) para elevar a saturação por bases a 70%.

$$NC \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)} = (V_2 - V_1) \text{ CTC} / (10 \times \text{PRNT}) [1]$$

onde V_2 é a saturação por bases estimada (70%) e V_1 é a saturação por bases encontrada na análise de solo, calculada a partir da Equação 2.

$$V_1 (\%) = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+) 100 / \text{CTC} [2]$$

onde Ca^{2+} , Mg^{2+} , e K^+ são cátions básicos trocáveis e CTC a pH 7,0, é a capacidade de troca catiônica, calculada a partir da equação 3.

$$\text{CTC} (\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}) = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Acidez Total em pH 7,0 (H + Al)} [3]$$

A dose de gesso foi calculada de acordo com Raij et al. (1997) (Equação 4), mediante o teor de argila (g kg^{-1}) da camada 0,20 – 0,40 m (Tabela 1), multiplicado por 6.

$$\text{NG} (\text{kg ha}^{-1}) = 6 \times \text{TA} [4]$$

onde TA é o teor de argila (g kg^{-1}) na camada de solo de 0,20-0,40 m.

5.4 Características do calcário dolomítico e do gesso agrícola

As características do calcário (dolomítico) e do gesso agrícola estão apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Características químicas e físicas do calcário e gesso.

| Característica | Outubro 2002 | | Novembro 2004 | | Outubro 2010 | |
|----------------|--------------|-----------|---------------|-----------|--------------|-----------|
| | Calcário (%) | Gesso (%) | Calcário (%) | Gesso (%) | Calcário (%) | Gesso (%) |
| S | - | 16 | - | 16 | - | 16,0 |
| Ca | - | 20 | - | 20 | - | 20,0 |
| CaO | 23,3 | - | 23,3 | - | 23,3 | - |
| MgO | 17,5 | - | 17,5 | - | 17,5 | - |
| PRNT | 71,2 | - | 71,2 | - | 87,5 | - |

5.5 Critérios para aplicação dos produtos

As doses de calcário foram calculadas de acordo com a equação 1, utilizando-se os dados contidos nas Tabelas 2 e 3, e as doses de gesso calculadas de acordo

com a equação 4, utilizando-se os dados contidos na Tabela 1. O critério pré-estabelecido no início do experimento para reaplicação dos produtos foi quando a saturação por bases, na profundidade amostrada de 0-0,20 m, apresentasse valores inferiores a 50%, considerando como referência o tratamento com a aplicação apenas de calcário (Tabela 2).

No início do experimento a calagem superficial foi realizada sobre os restos culturais do guandu no dia 15 de outubro de 2002, na dose de 2.700 kg ha⁻¹ de calcário. No dia 16 de outubro de 2002 realizou-se a aplicação em superfície de gesso agrícola na dose de 2.100 kg ha⁻¹. Tanto o calcário quanto o gesso foram aplicados superficialmente, sem incorporação ao solo.

As aplicações em superfície de calcário e gesso foram realizadas nos dias 19 de novembro de 2004 e 18 de outubro de 2010, na dose de 2.000 kg ha⁻¹ de calcário e 2.100 kg ha⁻¹ de gesso agrícola nas duas reaplicações, sobre os restos culturais de milho e sorgo granífero, respectivamente.

5.6 Condução do experimento

Todas as operações de semeadura das culturas foram realizadas utilizando-se uma multi-semeadora adubadora Semeato, modelo “Personale Drill” - 13. As pulverizações foram realizadas com pulverizador tratorizado, dotado de barras com 12 m de comprimento, e bicos leque 110.02 espaçados de 0,50 m.

A dessecação da área experimental foi realizada sempre antes da semeadura das culturas anuais, e utilizou-se o herbicida Glyphosate, na dose de 1800 gramas do ingrediente ativo (i. a.) ha⁻¹, utilizando volume de aplicação de 250 L ha⁻¹ sendo a operação realizada com pulverizador tratorizado de barras.

5.6.1 Cultivo do milho (2010/11 e 2011/12)

A cultura do milho foi semeada no dia 18 de novembro de 2010 e 22 de dezembro de 2011, utilizando-se o híbrido 2B433, de ciclo médio e exigente em fertilidade do solo, no espaçamento de 0,45 m entre as linhas e sementes necessárias para se obter três plantas por metro. As sementes foram previamente tratadas com fungicida (Captan – 120 g do i.a. 100 kg de sementes⁻¹). Para a adubação de base nos sulcos foram utilizados 350 kg ha⁻¹ da formulação 08-28-16 (N-P₂O₅-K₂O), levando-se em conta as

características químicas do solo e as recomendações para a cultura do milho (RAIJ et al., 1997). O controle de plantas daninhas foi realizado dia 8 de dezembro de 2010 e 12 de janeiro de 2012, e foram aplicados no primeiro ano o herbicida Atrazine (2500 g ha⁻¹ do i.a.) e no segundo ano os herbicidas Atrazine (2500 g ha⁻¹ do i.a.) e Nicossulfurom (50 g ha⁻¹ do i.a.). Em 18 de dezembro de 2010 e 17 de janeiro de 2012 foi realizada a adubação de cobertura, aplicando-se 150 kg ha⁻¹ de N, na forma de nitrato de amônio nas entrelinhas. Para o controle de pragas no primeiro ano foram realizadas duas aplicações de inseticidas, sendo a primeira de Lambda-cialotrina + Thiamethoxam (20 e 28 g ha⁻¹ do i.a., respectivamente) em 22/12/2010 e a segunda de Espinosade (48 g ha⁻¹ do i.a.) em 07/01/2011; no segundo ano foram realizadas três aplicações, sendo a primeira de Lambda-cialotrina + Thiamethoxam (20 e 28 g ha⁻¹ do i.a., respectivamente) em 17/01/2012, a segunda de Deltametrina (21,6 g ha⁻¹ do i.a.) em 30/01/2012 e a terceira de Espinosade (48 g ha⁻¹ do i.a.) em 10/02/2012.

No dia anterior à colheita realizou-se a coleta de plantas para determinação dos componentes da produção, e no dia 21 de março de 2011 e 27 de abril de 2012 procedeu-se a colheita, utilizando-se colhedora de parcelas. Colheram-se as três fileiras centrais de plantas por 7 m de comprimento de cada parcela para avaliar a produtividade de grãos (13% de base úmida).

5.6.2 Cultivo do crambe (2011 e 2012)

A cultura do crambe (*Crambe abyssinica*), cultivar FMS Brilhante, foi implantada nos dias 22 de abril de 2011 e 4 de maio de 2012 no espaçamento de 0,34 m, na densidade de semeadura de 15 kg de sementes ha⁻¹ com objetivo de atingir a população de 600 mil plantas por hectare. A adubação de semeadura, nos dois anos agrícolas, foi de 150 kg ha⁻¹ do formulado 8-28-16 (N-P₂O₅-K₂O) (FUNDAÇÃO MS, 2011). O controle de plantas daninhas foi realizado mediante arranquio, e para o controle de pragas e doenças não foi necessária a aplicação de qualquer tipo de defensivo agrícola nos dois anos agrícolas.

No dia anterior à colheita realizou-se a coleta de plantas para determinação dos componentes da produção, e nos dias 8 de agosto de 2011 e 23 de agosto de 2012 procedeu-se a colheita, utilizando colhedora de parcelas. Colheram-se as cinco

fileiras centrais de plantas por 7 m de comprimento de cada parcela para avaliar a produtividade de grãos (13% de base úmida).

5.6.3 Cultivo do feijão-caupi (2011 e 2012)

A cultura do feijão-caupi foi semeada logo após a colheita do crambe, nos dias 19 de setembro de 2011 e 18 de setembro de 2012, utilizando o espaçamento de 0,45 m e 15 sementes por metro. Para a adubação de base nos sulcos foram utilizados 200 kg ha⁻¹ do formulado 04-20-20 (N-P₂O₅-K₂O) no primeiro ano agrícola, e 200 kg ha⁻¹ do formulado 08-28-26 (N-P₂O₅-K₂O) no segundo ano agrícola (EMBRAPA, 2003). Aos 25 dias após semeadura foi realizada a aplicação de 50 kg ha⁻¹ de N em cobertura, na forma de uréia.

O controle de plantas daninhas foi realizado mediante arranquio. Para o controle de pragas e doenças no primeiro ano foram realizadas quatro aplicações, sendo a primeira de Metamidofós (600 g ha⁻¹ do i.a.) em 05/10/2011, a segunda de Abamectina + Óxido cuproso (18 e 560 g ha⁻¹ do i.a., respectivamente) em 26/10/2011, a terceira de Metamidofós + Azoxistrobina (600 e 50 g ha⁻¹ do i.a., respectivamente) em 08/11/2011 e a quarta de Clorotalonil + Tiofanato-metílico + Deltametrina (300 e 5 g ha⁻¹ do i.a.) em 29/11/2011.

No dia anterior à colheita realizou-se a coleta de plantas para determinação dos componentes da produção, e nos dias 18 de dezembro de 2011 e 3 de janeiro de 2013 procedeu-se a colheita, utilizando colhedora de parcelas. Colheram-se as cinco fileiras centrais de plantas por 7 m de comprimento de cada parcela para avaliar a produtividade de grãos (13% de base úmida).

5.7 Amostragens e avaliações realizadas

5.7.1 Atributos químicos do solo

Foram realizadas amostragens estratificadas do solo em outubro de 2011 e 2012 (12 e 24 meses após reaplicação do calcário e do gesso), nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40, e 0,40-0,60 m de profundidade. Cada amostra foi composta por sete amostras simples nas três camadas mais superficiais (0-0,05, 0,05-0,10 e

0,10-0,20 m) e quatro amostras simples nas duas camadas mais profundas (0,20-0,40, e 0,40-0,60 m), coletadas sempre nas entrelinhas das culturas, com a utilização de trado tipo sonda. As amostras compostas foram secas ao ar e peneiradas (malha 2 mm). Posteriormente foram submetidas à análise para determinação do pH (CaCl_2 0,01 mol L⁻¹), matéria orgânica, P-resina, acidez potencial (H+Al), Al, Ca, Mg e K trocáveis e, calculada a saturação por bases (V%), conforme metodologia proposta por Raij et al. (2001). Foram também determinados os teores de SO_4^{2-} , por meio de extração por solução de fosfato de cálcio ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0,01 mol L⁻¹). A quantificação foi feita por turbidimetria, provocada pela presença de BaSO_4 , formado pela reação do $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ com o SO_4^{2-} , extraído das amostras de terra (VITTI, 1988).

5.7.2 Quantidade acumulada de matéria seca

Para interpretação dos dados de fracionamento da matéria orgânica do solo, determinou-se a matéria seca da parte aérea referente aos resíduos das culturas que foram depositados na superfície do solo desde o início de condução do experimento, ou seja, de 2002 a 2012. Os resultados foram transformados em Mg ha⁻¹, com os dados de produção de matéria seca acumulada sendo apresentada para cada tratamento.

5.7.3 Fracionamento físico da matéria orgânica do solo – Universidade de Illinois-EUA

As determinações do fracionamento físico foram realizadas nas amostras de solo coletadas nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, em outubro de 2012. Todas as análises descritas abaixo foram realizadas nas dependências do Soil Ecology Laboratory, sob responsabilidade da Prof. Dra. Michelle M. Wander.

5.7.3.1 Carbono orgânico e nitrogênio total do solo

As amostras de solo foram secas ao ar e passaram por uma peneira de 2 mm. Os resíduos orgânicos >2 mm foram retirados à mão e após este procedimento as amostras foram moídas. O C orgânico do solo (COT) e o nitrogênio total (NT) foram

determinados por combustão (Costech Analytical Elemental Combustion Sistema de 4010, Valencia, CA).

5.7.3.2 Carbono orgânico particulado (COP) e Nitrogênio particulado (NP)

Foi utilizada a metodologia de separação das partículas descritas por Marriott e Wander (2006). Dez gramas de solo foram pesados e transferidos para frascos plásticos de 30-ml, e adicionou-se 30-ml da solução de hexametáfosfato de sódio (dispersante) a 10% para facilitar a separação das partículas. Os frascos foram cobertos com filtro fabricado com diâmetro de 53- μm e então fechados com as tampas com furos de 2-cm no topo (Figura 2). Esta montagem permite que os materiais com diâmetro menor que 53- μm passem dos frascos para a solução.

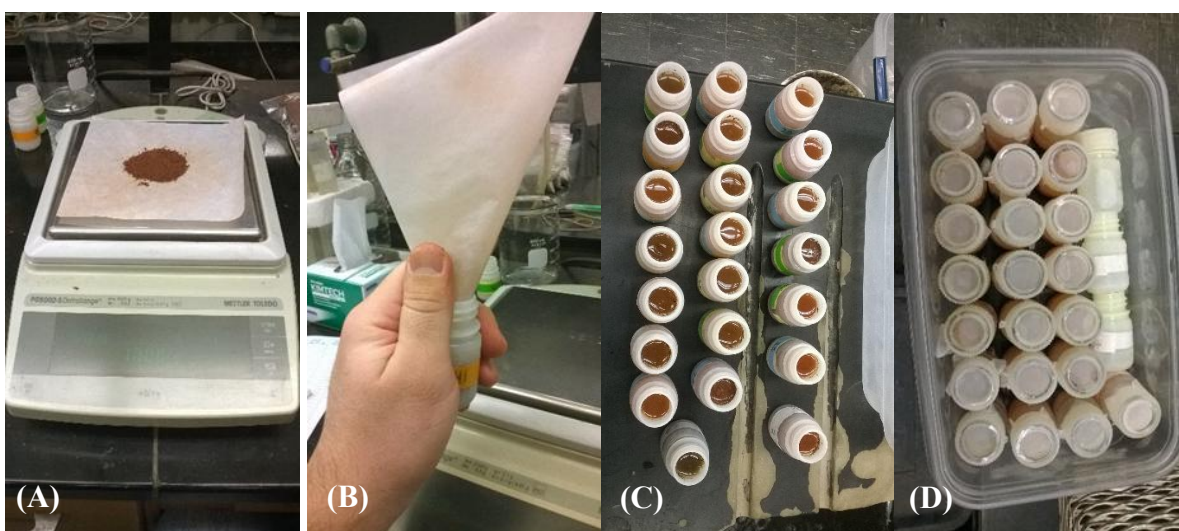


Figura 2. Pesagem das amostras de solo (A), transferência para os frascos plásticos (B), frascos preenchidos com a solução de hexametáfosfato de sódio (C) e frascos com as tampas adaptadas (D).

Os frascos plásticos foram colocados em contêineres plásticos de 2000-ml de volume e adicionou-se 800-ml da solução de hexametáfosfato de sódio a 10%. Essas amostras ficaram em repouso durante a noite, e depois colocadas para agitar por 1-h em um agitador horizontal de aproximadamente 180 oscilações min^{-1} . O hexametáfosfato de sódio e as partículas suspensas foram descartadas, logo após foram adicionados 800-mL de água e foram colocadas para agitar por mais 10 min. Este passo foi repetido por 10 vezes, resultando num tempo total de 100 min de agitação (Figura 3). O último volume de

800-mL de água e partículas finas suspensas foram descartados e o material contido nos frascos foi transferido para um funil com filtro de 53- μm de diâmetro e lavado até que a água corresse limpa. O material retido no filtro foi seco a 50 °C por 24-h em estufa de circulação forçada de ar, e a partir daí foi pesado e moído (Figura 4).

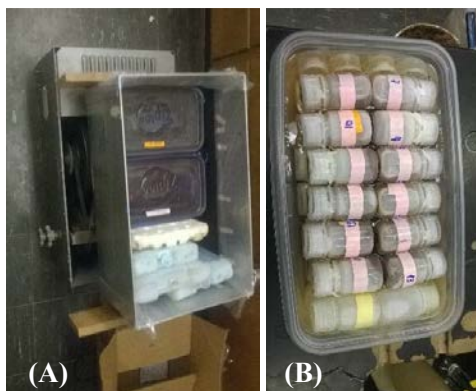


Figura 3. Agitador (A) e container plástico com os frascos e água (B).



Figura 4. Filtragem das amostras (A), filtros com amostra de solo (B), pesagem das amostras secas a 50°C por 24 h (C) e amostras após moagem (D).

O material moído foi analisado para C e N por combustão (Costech Analytical Elemental Combustion System 4010, Valencia, CA), obtendo o C orgânico particulado (COP). O carbono orgânico associado aos minerais (COAM) foi calculado pela diferença entre o C orgânico total (COT) e o COP. O estoque de carbono nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0-0,20 m foi calculado de acordo com a equação 8:

$$\text{Estoque} = \text{Teor de C (\%)} \times \text{Densidade do solo (g cm}^{-3}\text{)} \times \text{espessura da camada (cm)} \quad [8]$$

5.7.4 Atributos físicos do solo

Em outubro de 2012, foram abertas trincheiras para coletas de amostras de solo com estrutura não deformada para determinação de densidade (Ds),

macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total (Pt), por meio de anéis volumétricos com 0,05 m de diâmetro e 0,05 m de altura. As amostras foram retiradas em duplicata no centro das camadas de 0-0,10, 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m. Em laboratório as amostras em anéis volumétricos foram colocadas para saturar em bandejas plásticas com água até 2/3 da altura dos anéis por 48 h. Após pesagem das amostras saturadas com água, as mesmas foram levadas à mesa de tensão e submetidas à tensão de 0,006 MPa. Após atingir o equilíbrio nesse potencial matricial, as amostras foram pesadas e colocadas para secar a 105 °C em estufa de aeração forçada por 24 horas. As amostras secas foram pesadas novamente e com a diferença entre a massa das amostras saturadas com água e secas a 105 °C calculou-se a Pt. Para calcular a Ds dividiu-se a massa das amostras secas a 105 °C pelo volume do anel volumétrico. A macro e a microporosidade foram determinadas utilizando o teor de água retida nas amostras em equilíbrio com a tensão de 0,006 MPa, considerando que essa tensão é suficiente para retirar toda a água retida nos macroporos, sendo que a água restante representa o volume de microporos. Portanto, conhecendo a porosidade total e a microporosidade foi possível calcular a macroporosidade (CAMARGO et al., 2009).

Para avaliação da estabilidade de agregados coletou-se, com o auxílio de espátulas, monólitos com dimensões aproximadas de 0,05 m de altura, 0,10 m de largura e 0,15 m de comprimento. Foram coletadas quatro amostras de solo por parcela no centro das camadas de 0-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e posteriormente pré-selecionadas em jogo de peneiras sobrepostas, tendo as peneiras superior e inferior malhas de 8 e 4 mm, respectivamente. Para a avaliação da estabilidade dos agregados utilizou-se a porção que passou pela malha de 8 mm e ficou retida na de 4 mm.

Para avaliar a estabilidade de agregados via úmida adotou-se o procedimento descrito em Camargo et al. (2009). Foram usados 25 g de solo de cada amostra, que foram pré-umedecidas e mantidas em repouso em temperatura ambiente por 10 min. Em seguida, essas amostras foram colocadas no aparelho de oscilação vertical (tipo Yoder) sobre conjunto de peneiras de 2,00, 1,00, 0,50, 0,25 e 0,105 mm de diâmetro. Transcorridos 15 min, as porções retidas em cada peneira foram transferidas para potes de alumínio com o auxílio de jatos de água, e secas em estufa a 105 °C por um período de 24 h para posterior pesagem. A partir dos valores dessas massas e conhecendo os teores de água das amostras de solo antes de serem submetidas ao tamisamento, foram calculados a

porcentagem de agregados retidos na peneira de 2 mm (agregados > 2 mm), o diâmetro médio ponderado (DMP), o diâmetro médio geométrico (DMG) e o índice de estabilidade de agregados (IEA), de acordo metodologia proposta por Kemper e Chepil (1965), os quais sugerem para o cálculo de DMP, DMG e IEA as seguintes equações (9, 10 e 11):

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad [9]$$

$$DMG = \left(\exp \sum_{i=1}^n (w_p \cdot \log x_i) \right) / \left(\sum_{i=1}^n w_i \right) \quad [10]$$

$$IEA = [(\text{peso da amostra seca} - w_{p25}) / \text{peso da amostra seca}] \cdot 100 \quad [11]$$

Onde x_i é o diâmetro médio das classes de agregados; w_i é a proporção da massa de agregados de cada classe em relação ao total; w_p é a massa de agregados de cada classe; w_{p25} é a massa de agregados das classes menores que 0,25 mm.

Por ocasião da coleta de solo, determinou-se a resistência mecânica do solo à penetração, avaliada com um penetrômetro construído com base no modelo de Stolf (1991), com massa de impacto de 2,880 kg e massa dos demais componentes de 1,185 kg, altura de queda da massa de impacto de 40 cm, cone com ângulo de 30° e área da base de 1,287 cm². Para minimizar diferenças de teor de água do solo entre os tratamentos e entre as profundidades, realizou-se a avaliação três dias após uma precipitação pluvial de 20 mm. Foram realizadas três perfurações por parcela até a profundidade de 0,40 m. No mesmo instante, coletaram-se duas amostras deformadas de solo nas profundidades de 0,05, 0,15 e 0,30 m para determinação do teor de água do solo, as quais foram acondicionadas no interior de sacos plásticos vedados e em caixas de isopor para conservação do teor de água. Em seguida, em laboratório, os teores de água nas amostras foram determinados através do método gravimétrico (CAMARGO et al., 2009).

5.7.4.1 Correlações

Para a análise de correlação, adotaram-se o método de Pearson, utilizando 64 amostras, para as profundidades de 0–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,40 m. O método foi aplicado para atributos físicos do solo (Ds, Pt, Mic, Mac, DMP, DMG, IEA)

com pH, H+Al, saturações por Al (m%), Ca (%Ca) e Mg (%Mg), CTC, COT, COP e COAM. A m% foi obtida pela equação 12, e a %Ca e %Mg pela equação 14.

$$m\% = (100 \times Al^{3+}) / (CTCe) \quad [12]$$

onde Al^{3+} é o teor de alumínio trocável e CTCe é a capacidade de troca catiônica efetiva, calculada a partir da equação 13.

$$CTCe \text{ (mmolc dm}^{-3}\text{)} = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Al^{3+} \quad [13]$$

$$\%Ca \text{ ou } \%Mg = [100 \times (Ca^{2+} \text{ ou } Mg^{2+})] / CTC \text{ a pH } 7,0 \quad [14]$$

onde Ca^{2+} e Mg^{2+} são cátions básicos trocáveis e CTC é a capacidade de troca catiônica a pH 7, calculada a partir da equação 3.

5.7.5 Teores de nutrientes e produção de matéria seca da parte aérea da culturas

No florescimento da cultura do milho coletaram-se 10 plantas por parcela e o terço central da folha da base da espiga de 50 plantas por parcela, para determinação da produção de matéria seca da parte aérea e para nutrição mineral de plantas, respectivamente (CANTARELLA; VAN RAIJ; CAMARGO, 1997). Para a cultura do crambe, no florescimento pleno, foram coletadas 30 plantas por parcela para determinação da produção de matéria seca da parte aérea e nutrição mineral de plantas (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Na cultura do feijão-caupi, no período de florescimento, foram coletadas 10 plantas por parcela e as terceiras folhas com pecíolo, cerca de 30 folhas (AMBROSANO et al., 1997). Os materiais foram acondicionados em sacos de papel devidamente identificados e levados para secagem em estufa de ventilação forçada à temperatura de 65 °C, até atingirem peso constante. Em seguida, as plantas foram pesadas para determinação da produção de matéria seca. As partes para diagnose foliar foram moídas e submetidas à análise para determinação dos teores dos nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Mn e Fe), segundo os métodos descritos por Malavolta et al. (1997).

5.7.6 Componentes da produção e produtividade de grãos da culturas

Na cultura do milho foram determinados os seguintes componentes:

a) População de plantas: determinada mediante a contagem das plantas em duas linhas de 7 m na área útil das parcelas. Posteriormente, os resultados foram convertidos em plantas ha^{-1} .

b) Número de espiga por planta: obtido mediante a contagem das espigas contidas nas plantas de duas linhas de 7 m, por parcela.

c) Número de grãos por espiga: obtido mediante a relação do número total de grãos contidas em 10 espigas, por parcela.

d) Massa de 100 grãos: obtido mediante a pesagem de 4 amostras de 100 grãos por parcela (teor de água a 130 g kg^{-1}).

e) Produtividade de grãos: determinada mediante a colheita mecanizada de três fileiras centrais de 7 m de cada parcela e transformada em kg ha^{-1} (teor de água a 130 g kg^{-1}).

Na cultura do crambe foram determinados os seguintes componentes:

a) População de plantas: determinada mediante a contagem das plantas em duas linhas de 7 m na área útil das parcelas. Posteriormente, os resultados foram convertidos em plantas ha^{-1} .

b) Número de grãos por planta: obtido mediante a relação do número total de grãos contidos em 15 plantas, por parcela.

c) Massa de 1000 grãos: obtida mediante a pesagem de 4 amostras de 1000 grãos por parcela (teor de água a 130 g kg^{-1}).

d) Produtividade de grãos: determinada mediante a colheita mecanizada de quatro fileiras centrais de 7 m de cada parcela e transformada em kg ha^{-1} (teor de água a 130 g kg^{-1}).

Na cultura do feijão-caupi foram determinados os seguintes componentes:

a) População de plantas: determinada mediante a contagem das plantas em duas linhas de 7 m na área útil das parcelas. Posteriormente, os resultados foram convertidos em plantas ha^{-1} .

b) Número de vagens por planta: obtido mediante a relação do número total de vagens contidas em 10 plantas, por parcela.

c) Número de grãos por vagem: relação entre o número total de grãos pelo número total de vagens contido em 10 plantas, por parcela.

d) Massa de 100 grãos: obtido mediante a pesagem de 4 amostras de 100 grãos por parcela (teor de água a 130 g kg^{-1}).

e) Produtividade de grãos: determinada mediante a colheita mecanizada de três fileiras centrais de 7 m de cada parcela e transformada em kg ha^{-1} (teor de água a 130 g kg^{-1}).

5.8 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelos teste LSD à 5% de probabilidade, utilizando o programa Sisvar 4.2 (FERREIRA, 2008). Para a análise de correlação, adotaram-se o método de Pearson, utilizando o programa Assistat 7.7 (SILVA; AZEVEDO, 2009).

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Resultados

6.1.1 Atributos Químicos do Solo

Na Tabela 4 estão contidos os resultados de probabilidade de F e nas Figuras 5, 6 e 7 estão os gráficos representando o perfil do solo para cada atributo químico com a comparação das médias.

Os tratamentos com aplicação superficial de calcário, associado ou não ao gesso, aumentaram o pH na camada de 0-0,20 m do solo após 12 e 24 meses após a última aplicação. A gessagem não influenciou o pH do solo (Tabela 4 e Figura 5). Os teores de H+Al reduziram com a calagem, seus efeitos foram evidentes até a profundidade de 0,20 m nas duas épocas de amostragem.

Os teores de Al³⁺, após 12 meses, reduziram até a profundidade de 0,60 m com as aplicações de calcário, associado ou não ao gesso, e na amostragem aos 24 meses ficou restrita a profundidade de 0,40 m. As aplicações de gesso, comparativamente ao controle, reduziram os teores de Al³⁺ trocável nas camadas de 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m aos 12 meses, e aos 24 meses de 0,05-0,10 e 0,20-0,40 m. Contudo, cabe ressaltar que esse efeito sobre a acidez trocável do solo foi reduzido na amostragem 24 meses após a aplicação dos insumos.

Tabela 4. Probabilidade de F para os atributos químicos do solo nas camadas de 0–0,05, 0,05–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,40 e 0,40–0,60 m de profundidade, aos 12 e 24 meses após a reaplicação de calcário e gesso em superfície.

| Profundidade | Probabilidade de F | pH (CaCl ₂) | | H+Al | | Al ³⁺ | | S-SO ₄ ⁻² | | P(resina) | |
|--------------|--------------------|-------------------------|---------|------------------|---------|------------------|---------|---------------------------------|---------|-----------|--------|
| | | 12 | 24 | 12 | 24 | 12 | 24 | 12 | 24 | 12 | 24 |
| 0-0,05 m | Bloco | 0,4718 | 0,9143 | 0,0411 | 0,8340 | 0,1125 | 0,7463 | 0,1218 | 0,1341 | 0,5613 | 0,0611 |
| | Tratamento | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,1029 | <0,0001 | 0,0001 |
| 0,05-0,10 m | Bloco | 0,2001 | 0,4586 | 0,1002 | 0,1004 | 0,1003 | 0,1366 | 0,7256 | 0,1239 | 0,8094 | 0,9179 |
| | Tratamento | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,7638 | 0,0404 | 0,0147 |
| 0,10-0,20 m | Bloco | 0,1100 | 0,0999 | 0,2804 | 0,4952 | 0,1084 | 0,1039 | 0,2307 | 0,1075 | 0,9993 | 0,5664 |
| | Tratamento | <0,0001 | <0,0001 | 0,0001 | <0,0001 | 0,0001 | <0,0001 | 0,0002 | 0,2567 | 0,8322 | 0,7364 |
| 0,20-0,40 m | Bloco | 0,0912 | 0,0878 | 0,1304 | 0,1742 | 0,2494 | 0,5657 | 0,3072 | 0,9290 | 0,9107 | 0,8367 |
| | Tratamento | 0,0316 | 0,8427 | 0,1058 | 0,2537 | 0,0231 | 0,0001 | 0,0004 | 0,0404 | 0,4896 | 0,4698 |
| 0,40-0,60 m | Bloco | 0,2522 | 0,1013 | 0,1193 | 0,1005 | 0,5929 | 0,1006 | 0,1006 | 0,2478 | 0,5629 | 0,4334 |
| | Tratamento | 0,2389 | 0,3254 | 0,9867 | 0,2011 | 0,0037 | 0,5362 | <0,0001 | 0,0032 | 0,0730 | 0,1448 |
| | | K ⁺ | | Ca ²⁺ | | Mg ²⁺ | | V% | | | |
| | | 12 | 24 | 12 | 24 | 12 | 24 | 12 | 24 | | |
| 0-0,05 m | Bloco | 0,5420 | 0,2016 | 0,0819 | 0,8859 | 0,7750 | 0,9974 | 0,1077 | 0,8953 | | |
| | Tratamento | 0,0323 | 0,6562 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | | |
| 0,05-0,10 m | Bloco | 0,2829 | 0,0644 | 0,1376 | 0,0959 | 0,4032 | 0,7217 | 0,1102 | 0,1103 | | |
| | Tratamento | 0,4208 | 0,8514 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | | |
| 0,10-0,20 m | Bloco | 0,4155 | 0,3907 | 0,0172 | 0,3526 | 0,2199 | 0,2510 | 0,2008 | 0,1407 | | |
| | Tratamento | 0,3499 | 0,0673 | <0,0001 | <0,0001 | 0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | | |
| 0,20-0,40 m | Bloco | 0,9153 | 0,3567 | 0,2006 | 0,9919 | 0,1033 | 0,9743 | 0,0912 | 0,7236 | | |
| | Tratamento | 0,0856 | 0,2265 | 0,0251 | 0,0016 | 0,0158 | 0,0006 | 0,0031 | 0,0027 | | |
| 0,40-0,60 m | Bloco | 0,5283 | 0,9150 | 0,6967 | 0,3052 | 0,7469 | 0,7518 | 0,3009 | 0,2496 | | |
| | Tratamento | 0,6135 | 0,4505 | <0,0001 | 0,0003 | 0,3467 | 0,0029 | <0,0001 | <0,0001 | | |

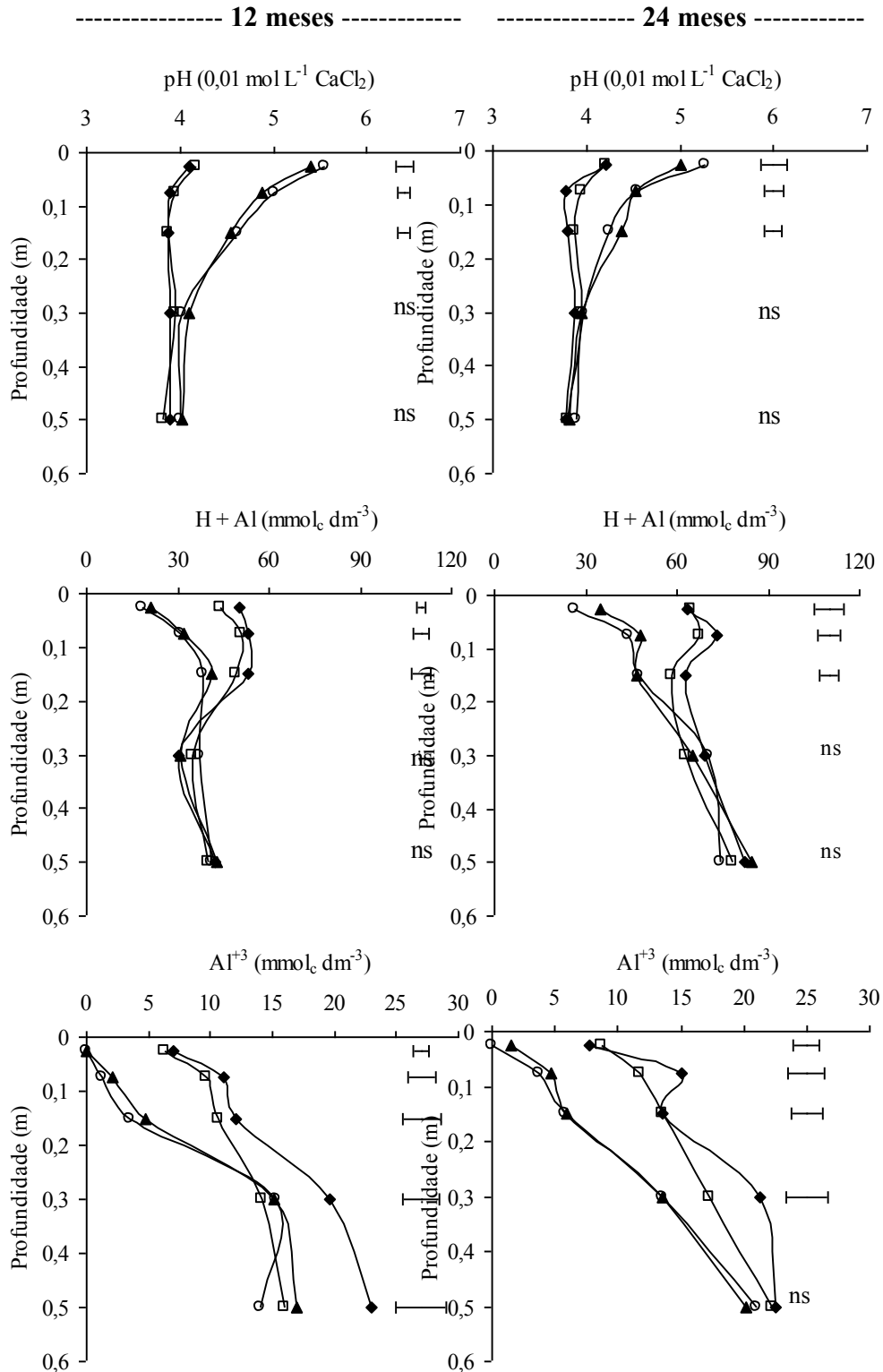


Figura 5. Valores de pH (CaCl₂), teores de H + Al e Al³⁺ do solo, em função de aplicações de calcário e gesso, em superfície, em duas épocas de amostragem após a última aplicação. (◆) controle; (□) gesso; (▲) calcário e (○) calcário + gesso. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

Os teores de $S-SO_4^{2-}$ aumentaram nas camadas de 0,05-0,60 m com as aplicações de gesso e de calcário associado ao gesso após 12 meses da última aplicação. Após 24 meses, esse efeito foi observado nas camadas de 0,20-0,60 m (Tabela 4 e Figura 6).

Após 12 meses, as aplicações de calcário aumentaram os teores de P na profundidade de 0-0,05 m, de forma mais acentuada com quando associada ao gesso, se estendendo aos 24 meses da última aplicação. Na profundidade de 0,05-0,10 m a aplicação de gesso, calcário e calcário associado ao gesso aumentaram a disponibilidade de P, contudo não houve diferença entre os insumos (Tabela 4 e Figura 6). Os teores de K apenas aumentaram na camada mais superficial do solo (0-0,05 m), não havendo diferença entre a aplicação dos insumos (Tabela 4 e Figura 6).

Os teores de Ca^{+2} e Mg^{+2} aumentaram com a calagem até a profundidade de 0,60 e 0,40 m aos 12 meses, respectivamente, e após 24 meses das aplicações os efeitos foram observados em todo perfil do solo (Tabela 4 e Figura 7). Contudo, no tratamento calagem associada ao gesso, os teores de Ca^{+2} aumentaram em todo perfil do solo, enquanto que, os teores de Mg^{+2} reduziram na profundidade de 0,05-0,10 m após 24 meses da última aplicação. As aplicações de gesso também incrementaram os teores de Ca^{+2} até a profundidade de 0,20 m em relação ao controle aos 12 e 24 meses após a reaplicação.

Os efeitos da correção do solo nos teores de H + Al, Ca e Mg refletiram nos resultados de saturação por bases (Tabela 4 e Figura 13). A calagem, associada ou não ao gesso, aumentaram a saturação por bases em todo o perfil do solo após 12 e 24 meses da reaplicação. Os valores da saturação por bases estimados, pela calagem, associada ou não ao gesso, após 12 meses, foram de 55 e 62%, e após 24 meses, foram de 40 e 46% na camada de 0-0,20 m, respectivamente, uma redução aproximada de 26% em um ano.

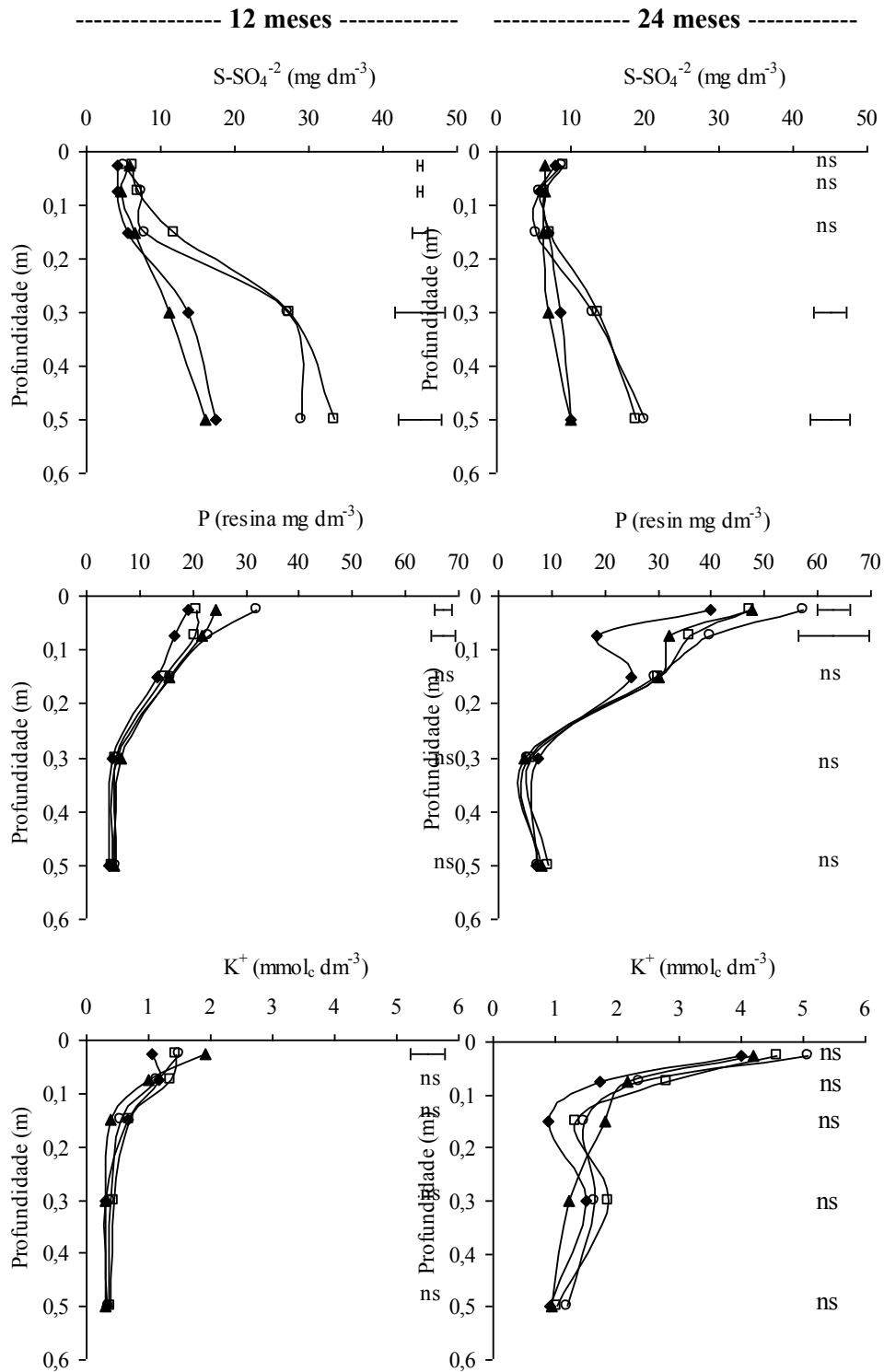


Figura 6. Teores de $S-SO_4^{2-}$, P e K do solo, em função de aplicações de calcário e gesso, em superfície, em duas épocas de amostragem após a última aplicação. (♦) controle; (□) gesso; (▲) calcário e (○) calcário + gesso. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

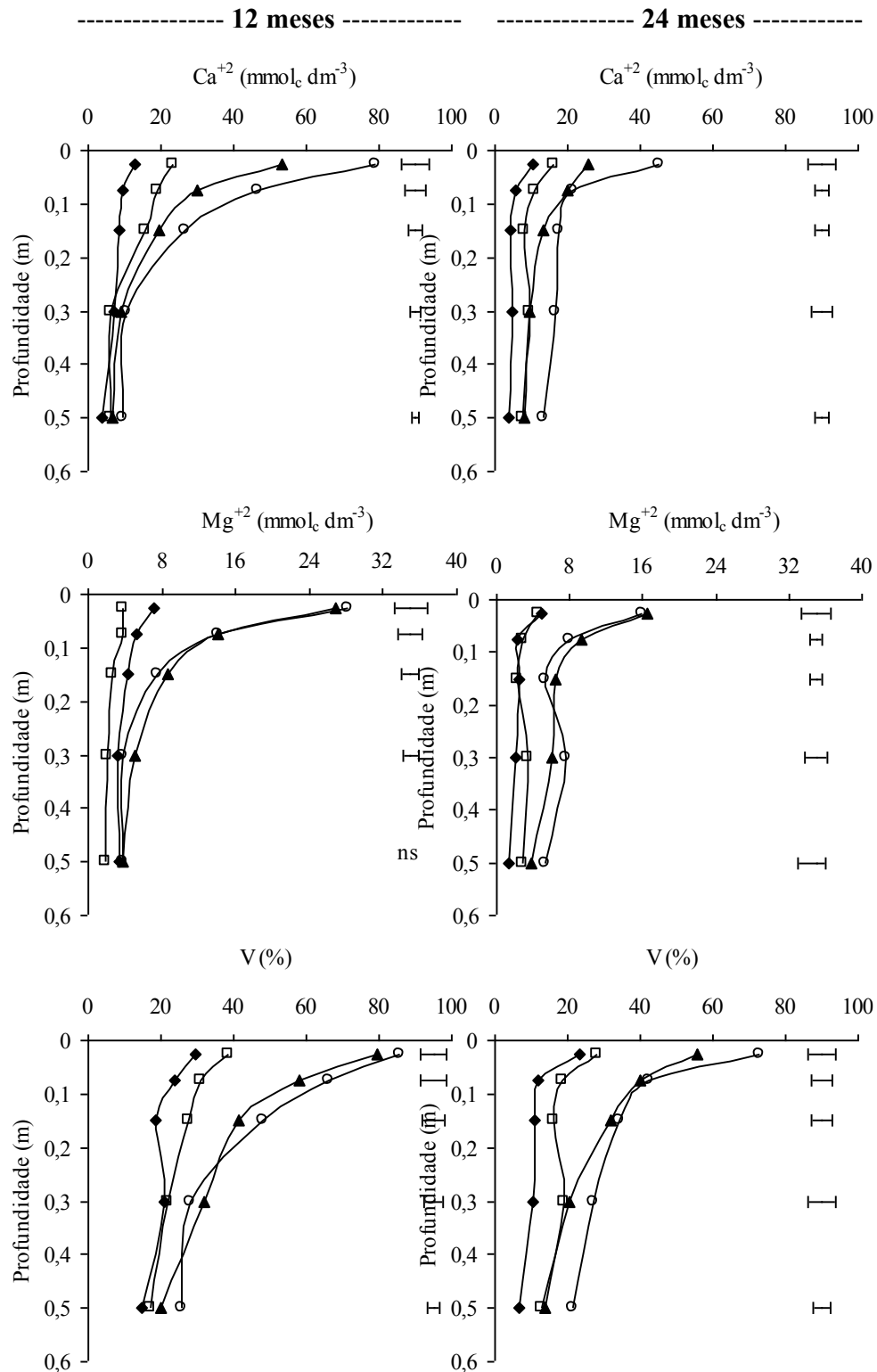


Figura 7. Teores de Ca⁺², Mg⁺² e saturação por bases (V%) do solo, em função de aplicações de calcário e gesso, em superfície, em duas épocas de amostragem após a última aplicação. (◆) controle; (□) gesso; (▲) calcário e (○) calcário + gesso. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

6.1.2 Alterações na Matéria Orgânica do Solo

A calagem associada ao gesso seguida da calagem resultaram nas maiores quantidades de palhada produzida e deixada na superfície do solo, da ordem de 33% e 23%, respectivamente, comparada ao controle (Tabela 5). A quantidade de palhada produzida com a aplicação de gesso foi similar ao controle.

Tabela 5. Quantidade de matéria seca acumulada, em Mg ha^{-1} , desde 2002 até 2012, em função das aplicações superficiais de calcário e gesso agrícola, num Latossolo Vermelho distroférico, sob SPD.

| Fatores | Matéria seca acumulada |
|---------------------------|------------------------|
| | Mg ha^{-1} |
| <u>Tratamentos</u> | |
| Controle | 107,8 c |
| Gesso (G) | 110,5 c |
| Calcário (C) | 132,3 b |
| C+G | 143,5 a |
| <u>Probabilidade de F</u> | |
| Bloco | 0,0982 |
| Tratamento | <0,001 |

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t ($p < 0,05$).

A calagem teve efeito no N total do solo (NT) apenas na camada de 0,10-0,20 m, com aumento de 43% em relação ao controle. Quanto ao N particulado (NP), este foi influenciado pelas aplicações dos insumos até a profundidade de 0,20 m (Tabela 6). Nas camadas de 0-0,05 e 0,10-0,20 m os teores de NP reduziram em decorrência das aplicações de calcário, associado ou não ao gesso, e dos insumos, respectivamente, da ordem de 30 e 20% em relação ao controle.

O carbono orgânico total (COT) foi maior com as aplicações de calcário, associado ou não ao gesso, nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m e de calcário associado ao gesso na camada de 0,05-0,10 m (Tabela 6). Comparado ao tratamento controle, o COT aumentou com as aplicações de calcário 1,6 e 2,0 g kg^{-1} nas camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente, e de calcário associado ao gesso 1,8, 1,6 e 1,7 g kg^{-1} nas camadas 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, respectivamente.

O carbono orgânico particulado (COP) diminuiu na camada mais superficial (0-0,05 m) pelas aplicações de calcário, associado ou não ao gesso, cerca de 65 e 60% em relação ao controle, respectivamente (Tabela 6). No entanto, nas camadas de

0,05-0,10 e 0,20-0,40 m o COP aumentou em decorrência das aplicações de calcário e de calcário associado ao gesso, respectivamente, na ordem de 39 e 49% em relação ao controle.

Tabela 6. Nitrogênio total (NT), C orgânico total (COT), C orgânico particulado (COP), N particulado (NP), C associado aos minerais (COAM) e relação C/N nas profundidades 0-0,05, 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, após 10 anos da primeira aplicação e 24 meses da última reaplicação de calcário e gesso agrícola, num Latossolo Vermelho distroférico, sob SPD.

| Prof. (m) | Fatores | NT | COT | NP | COP | COAM | Total | |
|---------------------------|---------------------------|-------------------------------|----------|----------|---------|---------|---------|--------|
| | | -----g kg ⁻¹ ----- | | | | | | C/N |
| 0-0,05 | <u>Tratamentos</u> | | | | | | | |
| | Controle | 1,50 a | 15,13 a | 0,45 a | 5,60 a | 9,53 a | 9,99 a | |
| | Gesso (G) | 1,53 a | 15,34 a | 0,48 a | 5,41 a | 9,93 a | 9,68 a | |
| | Calcário (C) | 1,43 a | 13,50 a | 0,32 b | 3,35 b | 10,15 a | 9,61 a | |
| | C+G | 1,48 a | 14,68 a | 0,31 b | 3,66 b | 11,01 a | 10,19 a | |
| | <u>Probabilidade de F</u> | | | | | | | |
| | Bloco | 0,5322 | 0,5966 | 0,7153 | 0,2288 | 0,3858 | 0,9844 | |
| | Tratamento | 0,8186 | 0,0643 | 0,0090 | 0,0000 | 0,0960 | 0,2129 | |
| | 0,05-0,10 | <u>Tratamentos</u> | | | | | | |
| | | Controle | 1,13 a | 10,50 bc | 0,17 b | 1,43 b | 9,08 b | 9,35 a |
| Gesso (G) | | 1,25 a | 10,07 c | 0,20 ab | 1,47 b | 8,60 b | 9,42 a | |
| Calcário (C) | | 1,20 a | 11,61 ab | 0,22 a | 1,99 a | 9,61 ab | 9,47 a | |
| C+G | | 1,30 a | 11,83 a | 0,18 b | 1,60 ab | 10,23 a | 9,07 a | |
| <u>Probabilidade de F</u> | | | | | | | | |
| Bloco | | 0,7575 | 0,9799 | 0,9290 | 0,5078 | 0,7068 | 0,2301 | |
| Tratamento | | 0,5238 | 0,0259 | 0,0252 | 0,0476 | 0,0265 | 0,3684 | |
| 0,10-0,20 | | <u>Tratamentos</u> | | | | | | |
| | | Controle | 0,93 b | 8,28 b | 0,17 a | 0,85 a | 7,42 b | 8,72 b |
| | Gesso (G) | 0,93 b | 8,18 b | 0,13 b | 0,82 a | 7,36 b | 8,66 b | |
| | Calcário (C) | 1,33 a | 9,83 a | 0,14 b | 0,96 a | 8,87 a | 9,26 a | |
| | C+G | 1,05 b | 9,83 a | 0,14 b | 0,93a | 9,54 a | 10,47 a | |
| | <u>Probabilidade de F</u> | | | | | | | |
| | Bloco | 0,0835 | 0,6814 | 0,0046 | 0,3711 | 0,3742 | 0,1676 | |
| | Tratamento | 0,0025 | 0,0004 | 0,0169 | 0,5536 | 0,0002 | 0,0128 | |
| | 0,20-0,40 | <u>Tratamentos</u> | | | | | | |
| | | Controle | 0,85 a | 7,33 b | 0,14 a | 0,53 b | 6,79 b | 8,67 b |
| Gesso (G) | | 0,85 a | 7,20 b | 0,13 a | 0,60 b | 6,59 b | 8,45 b | |
| Calcário (C) | | 0,95 a | 9,28 a | 0,11 a | 0,67 ab | 8,61 a | 9,75 a | |
| C+G | | 1,00 a | 9,03 a | 0,13 a | 0,79 a | 8,24 a | 8,98 b | |
| <u>Probabilidade de F</u> | | | | | | | | |
| Bloco | | 0,3329 | 0,1624 | 0,1543 | 0,1494 | 0,1529 | 0,6377 | |
| Tratamento | | 0,0744 | 0,0008 | 0,1507 | 0,0074 | 0,0012 | 0,0018 | |

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t (p<0,05).

Carbono orgânico associado aos minerais (COAM) está diretamente relacionado com o COP. O aumento do COP com as aplicações de calcário, associado ou não ao gesso, influenciaram no COAM, com exceção da camada mais superficial (0-0,05 m) (Tabela 6). Assim, o COAM aumentou em decorrência das aplicações de calcário nas camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m em 20 e 27% em relação ao controle, respectivamente, e das aplicações de calcário associado ao gesso nas camadas de 0,05-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m em 13, 29, 21% em relação ao controle, respectivamente.

A relação C/N aumentou nas camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m com a calagem (Tabela 6). A relação C/N nos tratamentos controle, calagem e calagem associada ao gesso nas camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m encontravam-se em 8,6 e 10,5, próximo ao sugerido por Stevenson (1994) para sistemas conservacionistas.

As aplicações de calcário e calcário associado ao gesso proporcionaram maiores estoques de COT na camada 0,10-0,20 m, o que refletiu em maior estoque de COT na camada de 0-0,20 m (Tabela 7), a mais estudada pelos trabalhos atuais.

A partir dos resultados obtidos na profundidade de 0-0,20 m, pode-se inferir que a taxa de sequestro anual de C durante os 10 anos de experimentação foram de 0,32 e 0,42 Mg C ha⁻¹ para os tratamentos que receberam calcário e calcário associado ao gesso, respectivamente.

Tabela 7. Estoques de carbono orgânico total (COT) nas camadas 0-0,10, 0,10-0,20 e 0-0,20 m, após 10 anos da primeira aplicação e 24 meses da última reaplicação de calcário e gesso agrícola, num Latossolo Vermelho distroférico, sob SPD.

| Fatores | Estoque de Carbono Orgânico Total | | |
|---------------------------|-----------------------------------|-------------|----------|
| | 0-0,10 m | 0,10-0,20 m | 0-0,20 m |
| <u>Tratamentos</u> | ----- Mg ha ⁻¹ ----- | | |
| Controle | 17,8 a | 12,3 b | 30,1 b |
| Gesso (G) | 18,3 a | 12,8 b | 31,1 b |
| Calcário (C) | 18,0 a | 15,3 a | 33,3 a |
| C+G | 18,5 a | 15,9 a | 34,3 a |
| <u>Probabilidade de F</u> | | | |
| Bloco | 0,6349 | 0,7708 | 0,4028 |
| Tratamento | 0,9063 | 0,0002 | 0,0018 |

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t (p<0,05).

6.1.3 Atributos Físicos do solo

Os valores obtidos na avaliação das características físicas do solo nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m estão contidos na Tabelas 8. Constatou-se que apenas a densidade do solo e a macroporosidade (Mac) do solo não foram alteradas pela aplicação superficial do calcário e/ou gesso.

Tabela 8. Valores de densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (Mic), macroporosidade (Mac), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregado (IEA) nas camadas de solo de 0–0,10, 0,10–0,20, 0,20–0,40 e 0,40-0,60 m, após 10 anos da primeira aplicação e 24 meses da última aplicação de calcário e gesso agrícola, num Latossolo Vermelho distroférico, sob SPD.

| Prof. (m) | Fatores | Ds Mg m ⁻³ | Pt -----cm ³ cm ⁻³ ----- | Mic -----cm ³ cm ⁻³ ----- | Mac | DMP -----mm----- | DMG | IEA % |
|---------------------|--------------|--------------------------|---|--|--------|---------------------|---------|----------|
| <u>Tratamentos</u> | | | | | | | | |
| 0-0,10 | Controle | 1,39 a | 0,43 a | 0,31 a | 0,12 a | 1,62 b | 0,72 b | 69 b |
| | Gesso (G) | 1,44 a | 0,43 a | 0,31 a | 0,12 a | 1,58 b | 0,68 b | 67 b |
| | Calcário (C) | 1,43 a | 0,42 a | 0,32 a | 0,10 a | 1,83 ab | 0,94 a | 76 a |
| | C + G | 1,40 a | 0,42 a | 0,32 a | 0,12 a | 1,99 a | 1,07 a | 77 a |
| <u>Probab. de F</u> | | | | | | | | |
| | Bloco | 0,8638 | 0,9682 | 0,1033 | 0,3403 | 0,9317 | 0,3979 | 0,9923 |
| | Tratamento | 0,7667 | 0,7517 | 0,1408 | 0,7651 | 0,0299 | 0,0004 | 0,0001 |
| <u>Tratamentos</u> | | | | | | | | |
| 0,10-0,20 | Controle | 1,50 a | 0,36 a | 0,29 b | 0,07 a | 0,69 c | 0,31 c | 54 b |
| | Gesso (G) | 1,57 a | 0,37 a | 0,29 b | 0,08 a | 0,60 c | 0,27 c | 54 b |
| | Calcário (C) | 1,55 a | 0,39 a | 0,31 a | 0,07 a | 0,87 b | 0,39 b | 58 ab |
| | C + G | 1,52 a | 0,40 a | 0,32 a | 0,08 a | 1,20 a | 0,49 a | 64 a |
| <u>Probab. de F</u> | | | | | | | | |
| | Bloco | 0,6064 | 0,2801 | 0,3156 | 0,6886 | 0,1189 | 0,9439 | 0,2691 |
| | Tratamento | 0,2810 | 0,1805 | 0,0465 | 0,6551 | <0,0001 | <0,0001 | 0,0235 |
| <u>Tratamentos</u> | | | | | | | | |
| 0,20-0,40 | Controle | 1,52 a | 0,36 b | 0,31 b | 0,05 a | 0,44 b | 0,26 b | 59 a |
| | Gesso (G) | 1,56 a | 0,36 b | 0,32 b | 0,04 a | 0,48 b | 0,26 b | 58 a |
| | Calcário (C) | 1,51 a | 0,39 ab | 0,35 a | 0,04 a | 0,55 a | 0,29 a | 61 a |
| | C + G | 1,43 a | 0,40 a | 0,34 a | 0,06 a | 0,55 a | 0,31 a | 61 a |
| <u>Probab. de F</u> | | | | | | | | |
| | Bloco | 0,1102 | 0,1870 | 0,5536 | 0,8009 | 0,8817 | 0,3304 | 0,3621 |
| | Tratamento | 0,0819 | 0,0419 | 0,0067 | 0,4800 | <0,0001 | 0,0169 | 0,2074 |
| <u>Tratamentos</u> | | | | | | | | |
| 0,40-0,60 | Controle | 1,42 a | 0,40 b | 0,32 b | 0,08 a | 0,38 b | 0,25 a | 59 a |
| | Gesso (G) | 1,40 a | 0,40 b | 0,33 b | 0,07 a | 0,38 b | 0,25 a | 57 a |
| | Calcário (C) | 1,39 a | 0,43 a | 0,36 a | 0,07 a | 0,47 a | 0,28 a | 59 a |
| | C + G | 1,34 a | 0,45 a | 0,37 a | 0,08 a | 0,47 a | 0,28 a | 58 a |
| <u>Probab. de F</u> | | | | | | | | |
| | Bloco | 0,6638 | 0,6127 | 0,1114 | 0,2271 | 0,3235 | 0,1161 | 0,1039 |
| | Tratamento | 0,1533 | 0,0026 | 0,0027 | 0,7699 | 0,0355 | 0,0845 | 0,1693 |

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t (p<0,05).

Quanto aos poros do solo, a microporosidade (Mic) aumentou com as aplicações de calcário e de calcário associado ao gesso, em média 8%, 10% e 12% em relação ao controle, nas camadas de 0,10-0,20, 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m, respectivamente (Tabela 8). Esses resultados refletiram diretamente na porosidade total (Pt), que alterou de forma semelhante à Mic nas profundidades de 0,20-0,40 e 0,40-0,60 m.

O diâmetro médio ponderado (DMP) e o diâmetro médio geométrico (DMG) aumentaram com a calagem e a calagem associada ao gesso, até as profundidades de 0,60 e 0,40 m, respectivamente, em relação ao controle e ao gesso (Tabela 8). A calagem associada ao gesso incrementou o DMP e o DMG apenas na camada de 0,10-0,20 m, cerca de 28% e 20%, em relação à calagem isolada, e 43% e 37%, em relação ao controle, respectivamente. Efeitos semelhantes foram observados para o índice de estabilidade de agregados (IEA) com a calagem e a calagem associada ao gesso, nas camadas de 0-0,10 e 0,10-0,20 m, com aumento médio em relação ao controle de 10% e 11%, respectivamente.

Os resultados de correlação estão contidos na Tabela 9. As saturações por Al, Ca e Mg foram, dentre os atributos químicos, os que apresentaram maiores correlações, negativa para o Al e positivas para o pH, Ca e Mg, com o DMP, DMG e IEA, na profundidade de 0-0,10 m, e com a Mic, DMP e DMG nas profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. As correlações obtidas pelo COT e sua frações, evidenciam que o COP exerce pouca influência nas propriedades físicas do solo. Por outro lado, o COT e o COAM apresentaram elevada correlação positiva com a Pt, Mic, Mac, DMP, DMG e IEA nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m.

Os resultados de resistência à penetração e o teor de água do solo, nas camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m, em função das aplicações de calcário e/ou gesso em superfície estão contidos na Tabela 10. As aplicações de calcário e de calcário associado ao gesso, influenciaram a resistência à penetração e o teor de água do solo apenas na profundidade 0,10-0,20 m. Houve redução da resistência a penetração e aumento da umidade do solo, em relação ao controle, da ordem de 0,51 MPa e 2,3 kg kg⁻¹ com a calagem, respectivamente, e 0,60 MPa e 2,2 kg kg⁻¹ com a calagem associada ao gesso, respectivamente. Contudo, não foi observado efeito da aplicação de gesso agrícola em nenhuma das profundidades estudadas.

Tabela 9. Correlação de Pearson para atributos físicos do solo (Ds, Pt, Mic, Mac, DMP, DMG, IEA) com pH, H+Al, saturações por Al (m%), Ca (%Ca) e Mg (%Mg), CTC COT, COP e COAM nas camadas de solo de 0–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,40 m, após 10 anos da primeira aplicação e 24 meses da última aplicação de calcário e gesso agrícola, num Latossolo Vermelho distroférico, sob SPD.

| | Ds | Pt | Mic | Mac | DMP | DMG | IEA |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0-0,10 m | | | | | | | |
| pH | -0,0667ns | 0,1101ns | 0,2157ns | -0,0256ns | 0,5507** | 0,6163** | 0,7603** |
| H+Al | -0,0763ns | 0,0208ns | -0,1450ns | 0,0867ns | -0,4669** | -0,5150** | -0,6763** |
| m | 0,1020ns | -0,1629ns | -0,2301ns | -0,0060ns | -0,5243** | -0,5677** | -0,7200** |
| %Ca | -0,1673ns | 0,2468ns | 0,1871ns | 0,0886ns | 0,6054** | 0,6314** | 0,7474** |
| %Mg | -0,0517ns | 0,0931ns | 0,2909ns | -0,0751ns | 0,5600** | 0,6249** | 0,7573** |
| CTC | -0,5658** | 0,6172** | 0,2420ns | 0,3329ns | 0,3121ns | 0,3227ns | 0,1929ns |
| COT | -0,1184ns | 0,0831ns | 0,3188ns | -0,0961ns | -0,1465ns | 0,0186ns | -0,0012ns |
| COP | -0,0978ns | 0,0060ns | -0,0941ns | 0,0507ns | -0,4854** | -0,4243* | -0,5759** |
| COAM | -0,0645ns | 0,0818ns | 0,3861* | -0,1302ns | 0,1322ns | 0,2680ns | 0,3359ns |
| 0,10-0,20 m | | | | | | | |
| pH | 0,2007ns | 0,3114ns | 0,6595** | -0,2994ns | 0,3935* | 0,4804** | 0,1761ns |
| H+Al | -0,3664* | -0,2616ns | -0,3286ns | 0,0097ns | -0,2495ns | -0,3322ns | -0,0116ns |
| m | -0,1144ns | -0,3787* | -0,6970** | 0,2515ns | -0,5503** | -0,6349** | 0,2573ns |
| %Ca | 0,2039ns | 0,3382ns | 0,5703** | -0,1687ns | 0,5387** | 0,6073** | 0,2730ns |
| %Mg | 0,0345ns | 0,4309* | 0,5977** | -0,0767ns | 0,4492* | 0,5127** | 0,2027ns |
| CTC | -0,4971** | 0,0038ns | 0,1747ns | -0,1824ns | 0,2163ns | 0,1235ns | 0,3218ns |
| COT | -0,2876ns | 0,5656** | 0,6991** | 0,0412ns | 0,6568** | 0,7073** | 0,6329** |
| COP | -0,1780ns | 0,1135ns | 0,0583ns | 0,0896ns | 0,3682* | 0,1730ns | 0,3038ns |
| COAM | -0,2760ns | 0,5814** | 0,7318** | 0,0291ns | 0,6363** | 0,7217** | 0,6215** |
| 0,20-0,40 m | | | | | | | |
| pH | 0,0240ns | 0,1335ns | 0,6401** | -0,0462ns | 0,5790** | 0,5108** | 0,1420ns |
| H+Al | -0,4524** | 0,1772ns | 0,2668ns | -0,0397ns | 0,0960ns | -0,0243ns | 0,2563ns |
| m | 0,3674* | -0,5074** | 0,3279ns | -0,1527ns | -0,6236** | -0,5326** | -0,1476ns |
| %Ca | -0,3271ns | 0,4757** | -0,6185** | 0,1947ns | 0,5590** | 0,4940** | 0,1045ns |
| %Mg | -0,2232ns | 0,4312* | 0,5178** | 0,1572ns | 0,5969** | 0,5991** | 0,0595ns |
| CTC | -0,6452** | 0,4933** | 0,4926** | 0,1150ns | 0,5085** | 0,3238ns | 0,2479ns |
| COT | -0,8211** | 0,7851** | 0,7733** | 0,3888* | 0,6964** | 0,6567** | 0,6169** |
| COP | -0,4585** | 0,4325* | 0,3400ns | 0,2857ns | 0,3674* | 0,3429ns | 0,2968ns |
| COAM | -0,8085** | 0,7738** | 0,7730** | 0,3742* | 0,6884** | 0,6497** | 0,6135** |

ns, * e **: não significativo e significativos a 5 e 1% pelo teste t, respectivamente.

Tabela 10. Resistência do solo a penetração e teor de água do solo nas camadas de 0–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,40 m, após 10 anos da primeira aplicação e 24 meses da última aplicação de calcário e gesso agrícola, num Latossolo Vermelho distroférico, sob SPD.

| Prof. (m) | Fatores | Resistência a penetração (MPa) | Teor de água do solo (kg kg ⁻¹) |
|------------------|---------------------|--------------------------------|---|
| <u>0-0,10</u> | <u>Tratamentos</u> | | |
| | Controle | 2,39 a | 14,0 a |
| | Gesso (G) | 2,30 a | 13,6 a |
| | Calcário (C) | 2,66 a | 14,6 a |
| | C + G | 2,86 a | 14,4 a |
| | <u>Probab. de F</u> | | |
| | Bloco | 0,1221 | 0,1396 |
| Tratamento | 0,1264 | 0,5548 | |
| <u>0,10-0,20</u> | <u>Tratamentos</u> | | |
| | Controle | 3,74 b | 13,0 b |
| | Gesso (G) | 3,63 b | 12,6 b |
| | Calcário (C) | 3,23 a | 15,3 a |
| | C + G | 3,14 a | 15,2 a |
| | <u>Probab. de F</u> | | |
| | Bloco | 0,3257 | 0,2881 |
| Tratamento | 0,0461 | 0,0014 | |
| <u>0,20-0,40</u> | <u>Tratamentos</u> | | |
| | Controle | 2,52 a | 15,0 a |
| | Gesso (G) | 2,69 a | 16,0 a |
| | Calcário (C) | 2,80 a | 16,0 a |
| | C + G | 2,45 a | 14,0 a |
| | <u>Probab. de F</u> | | |
| | Bloco | 0,9209 | 0,7342 |
| Tratamento | 0,0609 | 0,1437 | |

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t ($p < 0,05$).

6.1.4 Teores de Nutrientes, Produção de Matéria Seca da Parte Aérea, Componentes da Produção e Produtividade de Grãos

6.1.4.1 Cultura do Milho

Na Tabela 11 estão contidos os resultados de teores de nutrientes, produção de matéria seca da parte aérea, componentes da produção e produtividade de grãos de milho em função da aplicação calcário e gesso e da safra. Em nenhuma variável houve interação entre os fatores. As aplicações de calcário e de calcário associado ao gesso proporcionaram maiores teores foliares de N, P e Ca, com aumento em relação ao controle de 23, 9 e 24%, respectivamente, pela calagem, e de 24, 9 e 27%, respectivamente, pela

calagem associada ao gesso. Os teores de Ca também aumentaram com gessagem, com aumento de 10% em relação ao controle.

Os teores foliares de Mg aumentaram com a calagem em relação ao controle e ao gesso, em 21 e 70%, respectivamente (Tabela 11). Cabe ressaltar que, no tratamento que recebeu a gessagem, foi observado o menor teor foliar, com redução de 29% em relação ao controle.

A gessagem e a calagem associada ao gesso proporcionaram os maiores teores foliares de S, com incrementos de 19 e 25%, respectivamente, em relação ao controle (Tabela 11).

Com relação aos teores foliares de K, Cu, Zn, Mn e Fe, nos tratamentos de calagem e calagem associada ao gesso estes foram menores em relação ao controle e à gessagem (Tabela 11). A redução nos teores foliares de K, Cu, Zn, Mn e Fe, em relação ao controle foi de 13, 31, 12, 25 e 28%, respectivamente, nos tratamentos que receberam calcário, e de 12, 23, 16, 32 e 27%, respectivamente, nos que receberam calcário associado ao gesso.

Quanto ao fator safra, os teores foliares de P, K, Ca, Mg, S, Cu e Zn foram maiores no ano agrícola de 2010/11, enquanto que apenas os teores de N, Mn e Fe foram maiores no ano agrícola de 2011/12.

A produção de matéria seca, o número de espigas por planta, o número de grãos por espiga e a massa de 100 grãos foram maiores nos tratamentos que receberam calagem, em 43, 10, 15, e 11%, respectivamente, em relação ao controle, e a calagem associada ao gesso, em 42, 18, 18 e 14 %, respectivamente, em relação ao controle (Tabela 11). Apenas no número de espigas por planta foi observado aumento com a calagem associada ao gesso em relação à calagem, da ordem de 8%. A gessagem também incrementou o número de grãos por espiga e a massa de 100 grãos, em 10 e 7%, respectivamente, em relação ao controle. Assim, a produtividade de grãos aumentou com a gessagem, em 11% comparado ao controle; com a calagem, em 39 e 25% comparado ao controle e à gessagem, respectivamente; e com a calagem associada ao gesso, em 55, 40 e 12% comparado ao controle, gessagem e calagem, respectivamente.

Tabela 11. Teores de macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Cu, Zn, Mn e Fe), produção de matéria seca de parte aérea, população de plantas, número de espigas por planta, grãos por espiga, massa de 100 grãos e produtividade de grãos de milho em função da gessagem e calagem superficial, num Latossolo Vermelho distroférico, em SPD. Na safra 2010/11 e 2011/12. Botucatu, SP, 2014.

| Fatores | N | P | K | Ca | Mg | S | Cu | Zn | Mn | Fe |
|--------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|------------------------|---------|---------|---------|---------|
| <u>Tratamentos</u> | ----- g kg ⁻¹ ----- | | | ----- mg kg ⁻¹ ----- | | | | | | |
| Controle | 24,9 b | 3,3 b | 10,6 a | 4,1 c | 1,4 b | 1,6 b | 11,1 a | 24,4 a | 71,7 a | 201 a |
| Gesso (G) | 26,2 b | 3,4 b | 10,4 a | 4,5 b | 1,0 c | 1,9 a | 11,2 a | 24,4 a | 75,6 a | 187 a |
| Calcário (C) | 30,7 a | 3,6 a | 9,2 b | 5,1 a | 1,7 a | 1,6 b | 7,6 b | 21,4 b | 54,0 b | 145 b |
| C + G | 30,9 a | 3,6 a | 9,3 b | 5,2 a | 1,6 ab | 2,0 a | 8,6 b | 20,4 b | 49,1 b | 147 b |
| <u>Safra</u> | | | | | | | | | | |
| 2010/11 | 26,7 b | 3,8 a | 11,2 a | 5,2 a | 1,6 a | 2,2 a | 10,5 a | 30,7 a | 59,0 b | 147 b |
| 2011/12 | 29,7 a | 3,2 b | 8,5 b | 4,2 b | 1,3 b | 1,3 b | 8,7 b | 14,6 b | 66,2 a | 192 a |
| Bloco | 0,5751 | 0,1489 | 0,9993 | 0,1479 | 0,1121 | 0,7552 | 0,9850 | 0,3018 | 0,5358 | 0,2095 |
| Tratamentos (T) | <0,0001 | <0,0001 | 0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,0005 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |
| Safra (S) | 0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,0003 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,0215 | <0,0001 |
| T x S | 0,1008 | 0,1296 | 0,1197 | 0,1001 | 0,1026 | 0,1200 | 0,0901 | 0,2234 | 0,1374 | 0,2192 |
| Fatores | Matéria seca | População | Espigas por planta | Grãos por espiga | Massa de 100 grãos | Produtividade de grãos | | | | |
| <u>Tratamentos</u> | kg ha ⁻¹ | mil pl ha ⁻¹ | nº | nº | g | kg ha ⁻¹ | | | | |
| Controle | 10394 b | 66 a | 0,92 c | 448 c | 26,13 c | 6877 d | | | | |
| Gesso (G) | 10989 b | 65 a | 0,88 c | 494 b | 28,08 b | 7618 c | | | | |
| Calcário (C) | 14836 a | 62 a | 1,01 b | 517 a | 28,95 ab | 9529 b | | | | |
| C + G | 14741 a | 62 a | 1,09 a | 530 a | 29,79 a | 10644 a | | | | |
| <u>Safra</u> | | | | | | | | | | |
| 2010/11 | 16990 a | 63 a | 0,95 b | 591 a | 30,73 a | 10799 a | | | | |
| 2011/12 | 8489 b | 64 a | 1,00 a | 404 b | 25,74 b | 6534 b | | | | |
| Bloco | 0,1535 | 0,8293 | 0,2924 | 0,6582 | 0,1886 | 0,1423 | | | | |
| Tratamentos (T) | <0,0001 | 0,1181 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | | | | |
| Safra (S) | <0,0001 | 0,3321 | 0,0100 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | | | | |
| T x S | 0,0922 | 0,7272 | 0,1474 | 0,5837 | 0,2269 | 0,1322 | | | | |

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t (p<0,05).

Quanto ao fator safra, apenas a população de plantas não foi alterada nas duas safras. Na safra 2010/11 foram obtidos os maiores valores de quantidade de matéria seca de parte aérea, número de grãos por espiga, massa de 100 grãos e produtividade de grãos (Tabela 11). Na safra 2011/12, apenas o número de espigas por planta foi superior.

6.1.4.2 Cultura do Crambe

Na Tabela 12 estão contidos os resultados de teores de nutrientes, produção de matéria seca da parte aérea, componentes da produção e produtividade de grãos de crambe em função da aplicação calcário e gesso e da safra. Não houve interação significativa dos fatores. A quantidade acumulada dos macronutrientes pela parte aérea das plantas, independentemente dos tratamentos, ocorreu na seguinte ordem: $N > K > Ca > P > S > Mg$. Os teores de N, P e K não foram influenciados pelos tratamentos.

Os teores na planta de Ca, Mg e S foram incrementados com a calagem, em 20, 20 e 35%, respectivamente, e com a calagem associada ao gesso, em 36, 15 e 60%, respectivamente, quando os tratamentos foram comparados ao controle (Tabela 12). A calagem associada ao gesso elevou os teores na planta de Ca e S em relação à calagem, em 13 e 19%, respectivamente. A gessagem apenas influenciou os teores de Mg na planta, com redução em relação ao controle de 15%.

Com relação aos teores de Cu, Zn, Mn e Fe, houve redução nos tratamentos que receberam calcário, de 25, 30, 42 e 30%, respectivamente, e nos que receberam calagem associada ao gesso, de 26, 28, 53 e 47%, quando comparados ao controle (Tabela 12). A aplicação de gesso apenas reduziu os teores foliares de Mn, em 20% em relação ao controle.

Quanto ao fator safra, os teores de K, Ca, S, Zn e Mn foram maiores na safra de 2011 (Tabela 12). Na safra de 2012, apenas foram maiores os teores na planta de P, Cu e Fe.

A produção de matéria seca, a população de plantas e o número de grãos por planta tiveram os maiores valores com a aplicação de calcário, na ordem de 36, 31 e 88%, respectivamente, e com a aplicação de calcário associado ao gesso, de 25, 27 e 72%, respectivamente, quando foram comparados ao controle (Tabela 12).

Tabela 12. Teores de macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Cu, Zn, Mn e Fe), produção de matéria seca da parte aérea, população de plantas, grãos por planta, massa de 1000 grãos e produtividade de grãos de crambe em função da gessagem e calagem superficial, num Latossolo Vermelho distroférico, em SPD. Safra de 2011 e 2012. Botucatu, SP, 2014.

| Fatores | N | P | K | Ca | Mg | S | Cu | Zn | Mn | Fe |
|--------------------|--------------------------------|-------------------------|---------|------------------|--------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| <u>Tratamentos</u> | ----- g kg ⁻¹ ----- | | | | | ----- mg kg ⁻¹ ----- | | | | |
| Controle | 17,9 a | 3,2 a | 11,7 a | 10,1 c | 2,0 b | 2,0 c | 6,1 a | 32,8 a | 133 a | 609 a |
| Gesso (G) | 17,4 a | 3,4 a | 11,3 a | 10,5 c | 1,7 c | 2,2 c | 5,4 ab | 33,1 a | 106 b | 507 ab |
| Calcário (C) | 19,8 a | 3,4 a | 11,5 a | 12,1 b | 2,4 a | 2,7 b | 4,6 b | 23,1 b | 77 c | 422 bc |
| C + G | 16,5 a | 3,6 a | 12,8 a | 13,7 a | 2,3 a | 3,2 a | 4,5 b | 23,6 b | 62 c | 320 c |
| <u>Safra</u> | | | | | | | | | | |
| 2011 | 17,4 a | 2,6 b | 12,9 a | 12,8 a | 2,2 a | 2,8 a | 3,1 b | 31,1 a | 92 a | 348 b |
| 2012 | 18,5 a | 4,2 a | 10,6 b | 10,4 b | 2,0 a | 2,3 b | 7,2 a | 25,2 b | 97 a | 581 a |
| Bloco | 0,9952 | 0,1462 | 0,5032 | 0,2148 | 0,2408 | 0,3412 | 0,5627 | 0,1687 | 0,1461 | 0,6797 |
| Tratamentos (T) | 0,0790 | 0,0048 | 0,1162 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,0012 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 |
| Safra (S) | 0,2144 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,1280 | 0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,5477 | <0,0001 |
| T x S | 0,2814 | 0,1301 | 0,3889 | 0,1047 | 0,1801 | 0,3004 | 0,1674 | 0,0129 | 0,2080 | 0,3204 |
| Fatores | Matéria seca | População | | Grãos por planta | Massa de 100 grãos | Produtividade de grãos | | | | |
| <u>Tratamentos</u> | kg ha ⁻¹ | mil pl ha ⁻¹ | | nº | g | kg ha ⁻¹ | | | | |
| Controle | 2148 b | 369 c | | 298 c | 8,28 a | 922 c | | | | |
| Gesso (G) | 1986 b | 416 b | | 388 b | 8,17 a | 1076 b | | | | |
| Calcário (C) | 2917 a | 484 a | | 561 a | 7,85 a | 1730 a | | | | |
| C + G | 2684 a | 467 a | | 513 a | 8,43 a | 1613 a | | | | |
| <u>Safra</u> | | | | | | | | | | |
| 2011 | 3647 a | 398 b | | 593 a | 8,13 a | 1905 a | | | | |
| 2012 | 1221 b | 469 a | | 287 b | 8,25 a | 765 b | | | | |
| Bloco | 0,7079 | 0,5881 | | 0,3785 | 0,2808 | 0,3272 | | | | |
| Tratamentos (T) | 0,0001 | <0,0001 | | <0,0001 | 0,1662 | <0,0001 | | | | |
| Safra (S) | <0,0001 | 0,0001 | | <0,0001 | 0,4672 | <0,0001 | | | | |
| T x S | 0,3501 | 0,1211 | | 0,0911 | 0,5137 | 0,1239 | | | | |

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t (p<0,05).

A aplicação de gesso também aumentou a população de plantas e o número médio de grãos por planta em relação ao controle, em 13 e 30%, respectivamente.

A produtividade de grãos da cultura do crambe seguiu o mesmo padrão observado nos componentes da produção, ou seja, a calagem e a calagem associada ao gesso proporcionaram as maiores produtividades, bem como a gessagem em relação ao controle. Assim, foram observados incrementos de 808 e 691 kg ha⁻¹, ou 88 e 74%, com a calagem e a calagem associada ao gesso, respectivamente, e 154 kg ha⁻¹, ou 17%, com a gessagem, quando comparados ao controle.

Com relação ao fator safra, a produção de matéria seca de parte aérea, o número de grãos por planta e a produtividade de grãos foram maiores na safra de 2011 (Tabela 12). Na safra de 2011, apenas a população de plantas apresentou os maiores valores.

6.1.4.3 Cultura do Feijão Caupi

Na Tabela 13 estão contidos os resultados de teores de nutrientes, produção de matéria seca da parte aérea, componentes da produção e produtividade de grãos de feijão-caupi em função da aplicação calcário e gesso e da safra. Não houve interação significativa dos fatores. Os teores de K, S e Fe não foram influenciados pelos tratamentos.

Os teores foliares de N e P foram maiores nos tratamentos que receberam a calagem e a calagem associada ao gesso (Tabela 13). Em relação ao controle, a calagem e a calagem associada ao gesso incrementaram os teores de N, em 10 e 19%, e os teores de P, em 14 e 17%, respectivamente.

A aplicação do gesso, calcário e calagem associada ao gesso incrementaram os teores foliares de Ca, em 25, 16 e 24%, respectivamente, em relação ao controle (Tabela 13). Os teores foliares de Mg aumentaram no tratamento que recebeu calagem, em 20, 38 e 16%, comparativamente ao controle, à gessagem e à calagem associada ao gesso, respectivamente. A gessagem reduziu os teores foliares do Mg em relação a todos os tratamentos.

Com relação aos teores de Cu, Zn, e Mn, houve redução nos tratamentos que receberam calcário, associado ou não ao gesso, em relação aos demais tratamentos (Tabela 13). Assim, em relação ao controle, as reduções para o Cu, Zn e Mn

foram de 17, 34 e 57%, com a calagem, e de 23, 38 e 60%, respectivamente, com a calagem associada ao gesso.

Tabela 13. Teores de macro (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Cu, Zn, Mn e Fe), produção de matéria seca da parte aérea, população de plantas, vagens por planta, grãos por vagem, massa de 100 grãos e produtividade de grãos de feijão-caupi em função da gessagem e calagem superficial, num Latossolo Vermelho distroférico, em SPD. No ano de 2011 e 2012. Botucatu, SP, 2014.

| Fatores | N | P | K | Ca | Mg | S | Cu | Zn | Mn | Fe |
|--------------------|--------------------------------|-------------------------|-------------------|-----------------|--------------------|---------------------------------|---------|---------|---------|--------|
| <u>Tratamentos</u> | ----- g kg ⁻¹ ----- | | | | | ----- mg kg ⁻¹ ----- | | | | |
| Controle | 37,5 b | 3,5 b | 23,6 a | 7,6 b | 3,0 b | 1,11 a | 7,8 a | 42,7 a | 510 a | 265 a |
| Gesso (G) | 37,7 b | 3,7 ab | 24,2 a | 9,5 a | 2,6 c | 1,24 a | 8,8 a | 41,2 a | 474 a | 178 a |
| Calcário (C) | 41,1 ab | 4,0 a | 24,3 a | 8,8 a | 3,6 a | 1,01 a | 6,5 b | 28,2 b | 221 b | 241 a |
| C + G | 44,8 a | 4,1 a | 24,1 a | 9,4 a | 3,1 b | 1,22 a | 6,0 b | 26,5 b | 206 b | 249 a |
| <u>Safra</u> | | | | | | | | | | |
| 2011 | 39,1 a | 3,8 a | 11,8 b | 11,9 a | 2,5 b | 1,45 a | 4,2 b | 27,8 b | 258 b | 235 a |
| 2012 | 41,4 a | 3,9 a | 36,3 a | 5,8 b | 3,6 a | 0,84 b | 10,4 a | 41,5 a | 448 a | 231 a |
| Bloco | 0,4232 | 0,3696 | 0,1014 | 0,2923 | 0,1005 | 0,1509 | 0,1623 | 0,1490 | 0,4533 | 0,3874 |
| Tratamentos (T) | 0,0025 | 0,0035 | 0,9866 | 0,0004 | <0,0001 | 0,0006 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,0967 |
| Safra (S) | 0,1337 | 0,3889 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | 0,8650 |
| T x S | 0,4472 | 0,5190 | 0,3043 | 0,2856 | 0,7014 | 0,3830 | 0,1007 | 0,8268 | 0,3114 | 0,2275 |
| | Matéria seca | População | Vagens por planta | Grãos por vagem | Massa de 100 grãos | Produtividade de grãos | | | | |
| <u>Tratamentos</u> | kg ha ⁻¹ | mil pl ha ⁻¹ | nº | nº | g | kg ha ⁻¹ | | | | |
| Controle | 2991 b | 215 a | 4,4 b | 9,7 b | 16,9 b | 1580 b | | | | |
| Gesso (G) | 2831 b | 221 a | 4,8 b | 10,4 ab | 16,8 b | 1733 b | | | | |
| Calcário (C) | 3265 a | 203 a | 5,6 a | 11,2 a | 17,6 a | 1998 a | | | | |
| C + G | 3283 a | 204 a | 6,1 a | 11,0 a | 17,5 a | 2194 a | | | | |
| <u>Safra</u> | | | | | | | | | | |
| 2011 | 2811 b | 206 a | 2,9 b | 11,6 a | 16,9 b | 1167 b | | | | |
| 2012 | 3374 a | 215 a | 7,5 a | 9,6 b | 17,5 a | 2586 a | | | | |
| Bloco | 0,0838 | 0,7832 | 0,0745 | 0,0409 | 0,3018 | 0,9869 | | | | |
| Tratamentos (T) | 0,0007 | 0,5201 | 0,0002 | 0,0048 | <0,0001 | <0,0001 | | | | |
| Safra (S) | <0,0001 | 0,3563 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | <0,0001 | | | | |
| T x S | 0,6768 | 0,7866 | 0,2281 | 0,0743 | 0,0901 | 0,0647 | | | | |

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t (p<0,05).

Quanto ao fator safra, os teores foliares de K, Mg, Cu, Zn e Mn foram maiores na safra 2012 (Tabela 13). Na safra de 2011, apenas foram maiores os teores foliares de Ca e S.

A produção de matéria seca, o número de vagens por planta, o número de grãos por vagem e a massa de 100 grãos aumentaram com a calagem, em 9, 27, 15 e 4%, e com a calagem associada ao gesso, em 10, 39, 13 e 4%, respectivamente, quando comparados ao controle (Tabela 13). A produtividade de grãos aumentou com a calagem e a calagem associada ao gesso, em 418 e 614 kg ha⁻¹, ou em 26 e 39%, respectivamente, em relação ao controle.

Na safra de 2012, foi observada a maior produção de matéria seca de plantas, de vagens por planta, de massa de 100 grãos e de produtividade de grãos (Tabela 13). Na safra de 2011, apenas o número de grãos por vagem teve o maior valor.

6.2 Discussão

6.2.1 Atributos Químicos do Solo

A calagem, associada ou não ao gesso, superficial corrigiram a acidez no perfil do solo (Figura 5). Caires et al. (2005, 2011) verificaram que a aplicação superficial de calcário, sob SPD no sul do Brasil, foi efetiva na redução da acidez do solo em longo prazo em todo perfil avaliado após 120 meses da aplicação (0-0.20 m), e após 84 meses da aplicação (0-0.60 m), respectivamente.

A correção ocorre à medida em que há aumento da concentração de hidroxila, produto da dissociação do calcário no solo, sendo que uma fração dessa hidroxila reage com o excesso de H⁺ na solução, reduzindo a concentração de H + Al e aumentando o pH do solo, e o restante promove a precipitação do alumínio em Al(OH)₃, composto não tóxico as plantas (OLIVEIRA; PAVAN, 1996). Assim, a correção em profundidade pode ocorrer devido a diversos fatores, tais como: o deslocamento físico das partículas finas de calcário mediante o movimento descendente da água, através de canais formados por raízes mortas e organismos (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; RHEINHEIMER et al., 2000), principalmente em área com 10 anos sem revolvimento e com cultivo constante de pelo menos duas culturas por ano, e através de planos de fraqueza (AMARAL et al., 2004), mantidos intactos, em razão do mínimo revolvimento do solo em SPD.

Outro fator que pode ser atribuído ao efeito da calagem superficial em profundidade é a movimentação de íons. O aumento do pH na superfície do solo, em virtude da aplicação superficial, pode acelerar a velocidade com que o íon HCO_3^- , acompanhado por Ca e Mg, movimenta-se para o subsolo para reagir com a acidez (CAIRES et al., 2003). De acordo com Rheinheimer et al. (2000), os efeitos da aplicação do calcário em profundidade somente ocorreram quando o pH em água, na zona de dissolução do calcário, atingiu valores entre 5,2 e 5,6. Nessa situação, ocorreram a formação e a migração de $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ e $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ para as camadas subsuperficiais. Esse efeito em profundidade é conhecido como “frente de alcalinização”, conforme observado por vários autores (PÖTTKER; BEN, 1998; CAIRES et al., 2006b; SORATTO; CRUSCIOL, 2008c).

A gessagem superficial, em comparação ao controle, influenciou os teores de Al^{3+} (Figura 5). A redução nos teores de Al^{3+} também foi verificada por Soratto e Crusciol (2008a) em todas as profundidades após 12 meses da aplicação. Esses resultados têm sido atribuídos a uma reação de troca de ligantes na superfície das partículas de solo, envolvendo óxidos hidratados de ferro e alumínio, com o SO_4^{2-} deslocando OH^- e, assim, promovendo neutralização parcial da acidez (REEVE; SUMNER, 1972). Poderia também ocorrer precipitação de Al com a formação de minerais (ADAMS; RAWAJFIH, 1977). Outra possibilidade seria a lixiviação de Al, o que pode ser, em parte, favorecida pela formação, principalmente, de pares iônicos ou complexos AlSO_4^+ (PAVAN; BINGHAM; PRATT, 1984).

Verificou-se ainda que, após 24 meses da última aplicação, ocorreu acidificação do solo, comparativamente à amostragem realizada após 12 meses (Figura 5). Tal efeito pode sugerir que grandes quantidades do corretivo já reagiram até 24 meses, pois, a partir da reação total dos corretivos, é provável que os processos de acidificação se manifestem mediante os valores de pH, tendo em vista o poder tampão do solo e os processos de extração de nutrientes e pelo aumento no uso de adubos nitrogenados de base amoniacal na produção intensiva de grãos (JUO; DABIRI; FRANZLUEBBERS, 1995; SUMNER, 1995; CAIRES et al., 2005). Ciotta et al. (2002) e Caires et al. (2015) verificaram acidificação do solo no SPD e relacionaram tal efeito ao processo de nitrificação do amônio, proveniente dos fertilizantes de reação ácida.

A calagem, associado ou não ao gesso, superficial elevaram os teores de P nas camadas superficiais do solo (Figura 6). A elevação do pH do solo,

aumenta a concentração e atividade dos íons OH^- em solução, promove a precipitação de Fe e Al da solução, reduzindo a precipitação de fosfatos de ferro e alumínio de baixa solubilidade; há, também, geração de cargas negativas pela desprotonação de hidroxilas expostas nas argilas e matéria orgânica, ocorrendo repulsão entre o fosfato e a superfície adsorvente (MACBRIDE, 1994). Fageria e Baligar (2008) relataram, em Latossolos brasileiros, aumento linear de P disponível com aumento do pH do solo na faixa de 5,3-6,9, justificando que o aumento da disponibilidade de P neste intervalo esteve associado à liberação de íons de P de óxidos de Fe e Al, responsáveis pela fixação desse elemento em solos tropicais. Assim, com a adição anual de fósforo na adubação de semeadura das culturas de forma localizada e sem revolvimento do solo, faz com que o aumento do pH decorrente da calagem, associada ou não ao gesso, proporcione maior disponibilidade de P ao diminuir a força com que o fósforo é retido no solo (ALVARADO; CAJUSTE, 1993).

Os teores de K aumentaram na superfície do solo com a aplicação dos insumos, especialmente o calcário (Figura 6). Efeitos diretos da correção do solo nos teores de K ainda é assunto controverso. Della Flora, Ernani e Cassol (2007) e Castro e Crusciol (2013b) observaram melhor disponibilidade após aplicação dos corretivos da acidez do solo. Este efeito pode estar relacionado com aumento do pH e das cargas negativas na camada mais superficial do solo, onde os íons de K^+ são adsorvidos (DELLA FLORA; ERNANI; CASSOL, 2007). Além disso, o aumento nos teores de K no solo também pode estar relacionado com lixiviação deste dos tecidos das plantas (ROSOLEM et al., 2007), uma vez que a produção de matéria seca e o consequente acúmulo de K foram maiores com a correção do solo (Tabelas 11, 12 e 13).

Os teores de sulfato (S-SO_4^{2-}) somente foram influenciados com a aplicação de gesso e de calcário associado ao gesso (Figura 6). Caires et al. (2006) verificaram que, após 53 meses a aplicação superficial de gesso (3, 6 e 9 Mg ha^{-1}), ocorreu elevação nos teores de sulfato em todo perfil do solo (até 0,80 m), contudo, apenas uma pequena parte encontrava-se na camada de 0-0,20 m, e o restante havia sido lixiviado para as camadas mais profundas. Caires et al. (2011) também constataram efeitos semelhantes após 84 meses da aplicação superficial de gesso agrícola (9 Mg ha^{-1}).

A pequena retenção do sulfato nas camadas superficiais do solo se deve aos maiores valores de pH e de C orgânico total, observadas nessas camadas (Figura 5 e Tabela 6). A elevação do pH promove a predominância de cargas líquidas negativas e a

matéria orgânica gera grande quantidade de cargas negativas no solo, que favorecem a movimentação do sulfato (CAMARGO; RAIJ, 1989; QUAGGIO et al., 1993).

Os teores de Ca trocável foram incrementados em todo perfil do solo, com maior intensidade nas camadas superficiais do solo, com a calagem, com a calagem associada ao gesso e também pela gessagem (Figura 7). Vários trabalhos citam a elevação nos teores de Ca trocável do solo sob influência da calagem superficial ou da gessagem (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; CAIRES et al., 2004; SORATTO; CRUSCIOL, 2008c; CAIRES; JORIS; CHURKA, 2011). Como os dois materiais são fonte de Ca, no presente trabalho foi possível observar os efeitos da calagem e da gessagem, evidenciando que a aplicação em superfície contribuiu para a elevação nos teores de Ca no perfil do solo, corroborando os resultados obtidos por Caires et al. (2003; 2011) e Soratto e Crusciol (2008a).

Com o passar do tempo, assim como observado nos componentes da acidez do solo (Figura 5), houve diminuição nos teores de Ca trocável, o que pode ser atribuído, principalmente, à lixiviação para camadas mais profundas, visto que a exportação deste nutriente é pequena pelas culturas (CAIRES et al., 2015). Caires et al. (2000) e Soratto e Crusciol (2008a) também verificaram efeito semelhante.

Como o calcário também é fonte de Mg, a elevação nos teores de Mg no perfil do solo já era esperado. A lixiviação de magnésio tem sido constatada com frequência em estudos com aplicação superficial de gesso (CAIRES et al., 1998, 2003, 2004, 2006a; GATIBONI et al., 2003; SORATTO; CRUSCIOL, 2008c). Essa movimentação ocorre pela associação de Mg^{2+} com o ânion SO_4^{2-} , dando origem a complexos com carga nula. Nesta forma, eles apresentam maior mobilidade e são mais facilmente lixiviados no perfil do solo (SILVA et al., 1998). Contudo, no presente trabalho, com o uso do calcário dolomítico foram mantidos níveis adequados de Mg trocável no solo por um longo período, independentemente do uso do gesso associado ao calcário (Figura 7).

Quanto à saturação por bases, o comportamento foi semelhante ao observado para os teores de Ca e Mg trocáveis (Figura 7). Os maiores valores de saturação por bases em função da aplicação de gesso nos tratamentos que não receberam calcário devem-se ao aumento nos teores de Ca também verificados nesses tratamentos. Cabe destacar que, a saturação por bases já encontrava-se abaixo do valor recomendado de 70%

na camada de 0-0,20 m, o que é um indicativo de que não é recomendável reduzir a quantidade de calcário aplicado em sistemas intensivos de produção sob SPD.

6.2.2 Alterações na Matéria Orgânica do Solo

A calagem, associada ou não ao gesso, aumentaram os teores de NT no solo (Tabela 6). Aumento nos teores de N também foram observados por Rosolem et al. (2003), os quais atribuíram o efeito ao aumento da mineralização e da nitrificação com a calagem. Dentre as frações do nitrogênio, o NP é a mais sensível do solo (CONCEIÇÃO et al., 2005), sendo a primeira a se tornar disponível às plantas. Assim, a redução da acidez do solo, faz com que este seja mineralizado e disponibilizado às plantas, promovendo sua redução no solo. Contudo, o aumento na quantidade acumulada de matéria seca pode reduzir estas perdas a longo prazo (Tabela 5)

O aumento no COT com a calagem, associada ou não ao gesso, (Tabela 6), provavelmente é devido ao maior aporte de matéria seca através dos resíduos de raízes e parte aérea das plantas nestes tratamentos (Tabela 5). A retenção de resíduos no solo promove maior acúmulo de C nos macroagregados estáveis e aumenta o C orgânico do solo (TIAN et al., 2014), sugerindo que o uso de corretivos do solo é uma prática de manejo com potencial de sequestro de C. Castro et al. (2015) e Briedis et al. (2012a) também observaram aumento no COT na profundidade de 0-0,10 m após 5 anos e de 0-0,20 m após 8 anos da aplicação superficial de calcário, respectivamente. Briedis et al. (2012b) relataram ainda que o maior aumento do COT ocorreu na fração mais lábil da matéria orgânica do solo. De acordo com estes autores, o grande acúmulo de COT na camada mais superficial do solo é comum no SPD, e atribuíram este efeito à contínua adição de resíduos vegetais sem sua incorporação. Esses resultados demonstram que a manutenção da fertilidade do solo com a calagem aumenta o acúmulo do COT em longo prazo, e este efeito supera as possíveis perdas de C na forma de CO₂ pelo aumento da atividade microbiana com a elevação do pH.

A redução no COP pela calagem, associada ou não ao gesso, na camada mais superficial do solo (Tabela 6), pode ser atribuída aos elevados valores de pH nesta camada (Figura 5). Este ocorre devido sua aplicação em superfície no SPD, assim ocorre o aumento da atividade microbiana do solo (EKENLER; TABATABAI, 2003). Isto promove acelerada decomposição da matéria orgânica do solo (YAO et al., 2009), podendo

reduzir os estoques de C no solo (CHAN; HEENAN, 1999). Contudo, os resultados nas camadas mais profundas evidenciam que, a camada mais superficial é a mais propensa à redução de COP com a calagem, contudo, este efeito tende a durar apenas no curto prazo, promovendo, no longo prazo a acumulação de C (RIDLEY et al., 1990; HATI et al., 2008; BRIEDIS et al., 2012a).

O COAM é considerada a fração da matéria orgânica de maior estabilidade (BALESDENT et al., 1988; BUYANOVSKY et al., 1994; BAYER et al., 2001), devido sua interação com a superfície dos minerais, constituindo um mecanismo de proteção coloidal por meio de complexos organominerais (CHRISTENSEN, 2000; DIECKOW et al., 2009), caracterizado como um processo de transição lento. Contudo, a calagem, associada ou não ao gesso, aumentaram o COAM (Tabela 6), corroborando os resultados obtidos por Briedis et al. (2012b) e Castro et al. (2015). Este resultado pode ser relacionado com efeito do corretivo do solo na melhoria da fertilidade do solo e, conseqüentemente, no aumento da produção de matéria seca (raízes e parte aérea) e aporte de C, discutido anteriormente.

Além disso, a calagem em solos de carga variável, pode aumentar a quantidade de cargas dependentes do pH (SOARES et al., 2005; WEBER et al., 2005), porque com o aumento do pH, ocorre a dissociação do H^+ dos grupos OH da matéria orgânica, das argilas minerais e do óxidos de Fe e Al, promovendo aumento da CTC (ALLEONI; CAMBRI; CAIRES, 2005). Concomitantemente a isso, a maior disponibilidade de Ca^{2+} na solução do solo, como resultado da calagem, podem promover a associação entre argila e húmus, que é explicado pela elevada correlação entre os teores de COT e o Ca^{2+} (BRIEDIS et al., 2012b).

De acordo com Muneer e Oades (1989), a presença de pontes catiônicas entre as argilas silicatadas e os radicais orgânicos é um mecanismo comum de estabilização da MOS, com o Ca destacando-se como um dos cátions de grande importância para o estabelecimento dessas pontes. Os autores enfatizaram que a calagem faz com que o Ca^{2+} seja o cátion predominante no complexo de troca, atuando como estabilizante físico da MOS porque permite melhor floculação das partículas, melhorando a agregação, e ela conduz a um aumento da condensação de minerais orgânicos, como resultado do contrabalanço das cargas negativas dos grupos funcionais da MOS. O Ca^{2+} também participa de pontes metálicas entre a MOS e os minerais das frações mais finas do

solo, constituindo uma proteção química dos compostos orgânicos, o que dificulta a sua decomposição (PAUL; CLARK, 1989).

Cabe destacar que, apesar de o gesso agrícola alterar a quantidade de Ca^{2+} trocável no solo (Figura 7), este pouco influenciou a dinâmica da MOS (Tabela 6). É provável que a menor quantidade de COT e a pouca influência sobre as cargas dependentes de pH, não promova de forma eficiente a associação entre argila e húmus, expondo-o com mais facilidade à decomposição por microrganismos.

O aumento na relação C/N, com a aplicação dos corretivos da acidez do solo, é reflexo dos aumentos observados no COT comparativamente ao NT (Tabela 6). Por isso, sugere-se que, nestes tratamentos que promovem maior entrada de C através da matéria seca das culturas, pode haver deficiência de N devido à manutenção do equilíbrio da relação C/N do solo (CASTRO et al., 2015), uma vez que pouco alteraram o NT, principalmente, em superfície (Tabela 5). De acordo com Boddey et al. (2010), em sistemas de rotação de culturas em que há deficiência de N no sistema solo-planta, as perdas de C ocorrem, principalmente através de CO_2 .

Atualmente, além da eficiência agrônômica, os sistemas de produção devem proporcionar ganhos ambientais, como menor emissão de gases causadores de efeito estufa e sequestro de C atmosférico. Assim, quantificar o estoque de COT do solo é sempre indicado, pois, com o acompanhamento destes valores, pode-se inferir quanto à emissão ou sequestro de carbono destes solos.

O aumento do estoque de carbono (Tabela 7) esteve diretamente relacionado ao aumento dos teores de C do solo, conforme já discutido (Tabela 6). Assim, os resultados obtidos pela aplicação do calcário, associado ou não ao gesso, sugerem que esta prática de manejo tem grande potencial no sequestro de C. A melhoria na fertilidade do solo e o aumento do sequestro de C, em um Latossolo Vermelho, em regiões de clima subtropical e tropical foram reportadas por Briedis et al. (2012a) e Castro et al. (2015), respectivamente, e mostraram que a aplicação de calcário em superfície aumentou o estoque de COT, na camada de 0-0,20 m, que variaram de 52,7 a 57,5 e 34,67 a 35,37 Mg ha^{-1} durante período de 15 e 5 anos, e com taxa média de sequestro de carbono de 0,19-0,51 e 0,66-0,80 $\text{Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente.

6.2.3 Atributos Físicos do solo

A calagem em solos tropicais com PCZ baixo (próximo de 4), em que predomina a caulinita, eleva a carga líquida negativa e mesmo os com PCZ alto, em que predominam os óxidos de Fe e Al, reduz o efeito flocculante dos cátions trivalentes com maior espessura da dupla camada difusa, e, conseqüentemente, estes solos podem ficar suscetíveis à desagregação física (PRADO, 2003). Contudo, este efeito tende a prevalecer apenas no curto prazo (CASTRO; LOGAN, 1991; CHAN; HEENAN, 1999), sendo constantes os relatos da ausência de efeito ou até mesmo o aumento na agregação do solo pela aplicação de corretivos da acidez em SPD em estudos de médio e longo prazos, ou seja, após 24 meses (CASTRO; CALONEGO; CRUSCIOL, 2011), 27 meses (CORRÊA et al., 2009), 5 anos (COSTA et al., 2004) e 12 anos (BORTOLUZZI et al., 2010), semelhantes aos constatados no presente estudo (Tabela 8).

Corrêa et al. (2009), em um Latossolo Vermelho distrófico textura média, constataram maior percentagem de agregados, na peneira de 4,0–2,0 mm, com a aplicação em superfície do calcário em relação ao controle, nas profundidades de 0-0,05 e 0,05-0,10 m, o que permitiu os autores inferirem que a calagem também promove agregação das partículas do solo em profundidade, mesmo quando aplicado sobre a superfície do solo em SPD. Em outro estudo, Briedis et al. (2012b) constataram que o DMP de agregados, em um Latossolo Vermelho, foi influenciado pela aplicação de calcário, em que 6 Mg ha⁻¹ e a reaplicação sete anos depois de mais 3 Mg ha⁻¹ proporcionaram maior DMP do que a aplicação isolada realizada somente em um ano.

Estes efeitos foram atribuídos à elevação dos teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ no solo, os quais podem favorecer a formação de pontes entre esses cátions e os polímeros da matéria orgânica com a superfície dos coloides do solo (CASTRO FILHO, 2002; OLIVEIRA, 2008). Resultados semelhantes também foram verificados no presente estudo, principalmente, pela elevada correlação positiva entre as saturações por Ca e Mg com a DMP e DMG (Tabela 9). Vale destacar ainda que o Ca também pode fazer ligações entre os grupos fenólicos e carboxílicos da matéria orgânica com os coloides do solo, em razão do aumento de pH (CASTRO FILHO; LOGAN, 1998).

A correlação negativa da saturação por Al com o DMP e DMG (Tabela 9) é indicativo de que o controle do Al, pela calagem, associada ou não ao gesso, influenciou na agregação do solo. Este efeito pode ser atribuído ao maior desenvolvimento radicular, que promove aumento da pressão mecânica e o enovelamento das partículas organominerais. Assim, ocorre maior aporte de C, de parte aérea e raízes, resultante da

aplicação de corretivos da acidez do solo, bem como aumento da atividade microbiana, contribuindo para a manutenção da estabilidade de agregados e compensando o efeito dispersante desses corretivos. Os benefícios proporcionados pelos corretivos sobre a produção de matéria seca desde a implantação do estudo pode ter beneficiado ou minimizado o efeito deletério da dispersão da argila.

A melhoria no DMP e DMG com a aplicação de calcário associado ao gesso (Tabela 8), pode ter sido resultado do aumento das cargas negativas pela calagem que, ao associar à gessagem, pode aumentar a concentração de eletrólitos da água pluvial que infiltra no solo (SERAFIM et al., 2012), aumentando o Ca nos pontos de troca e em solução, o que promove a floculação das partículas de argila (FAVARETTO et al., 2006; TIRADO-CORBALÁ et al., 2013), favorecendo, assim, a agregação do solo. Resultados semelhantes foram obtidos por Bertollo (2014) em um Latossolo Vermelho distrófico típico, sendo que após três anos da aplicação de calcário e gesso houve aumento linear no DMG com as doses de gesso (0, 2, 4 e 6 Mg ha⁻¹), na profundidade de 0,15-0,20 m, para os tratamentos que receberam 2 Mg ha⁻¹ de calcário em superfície.

A porosidade do solo foi alterada pela aplicação do calcário, com aumento da Mic e, conseqüentemente, da Pt (Tabela 8), possibilitando maior armazenamento de água no solo (Tabela 10). Apesar dos microporos serem relativamente menos influenciados pelos manejos de solo do que os macroporos (DA SILVA; KAY, 1997), é provável que o efeito observado seja reflexo da melhor agregação proporcionada pela calagem, pois a microporosidade está relacionada com a organização das partículas minerais primárias do solo isoladas e com os microagregados (LAL; SHUKLA, 2004), conforme constatado nos valores de DMP, DMG e IEA.

Com relação à macroporosidade, apesar de não ter sido influenciada pela aplicação dos insumos, cabe destacar que, na profundidade de 0-0,20 m a quantidade foi próxima a 0,10 cm³ cm⁻³, ou seja, no limite crítico de 0,10 cm³ cm⁻³ preconizado para que não ocorra limitação na aeração do solo (JONG VAN LIER, 2010), o que pode afetar o adequado desenvolvimento da maioria das culturas, por restringir a difusão e as trocas gasosas.

Diferentemente do que foi observado por Borges et al. (1997), Rosa Júnior et al. (2007) e Chi et al. (2012) com aplicação de gesso agrícola, não foi observado no presente estudo alterações significativas nos atributos físicos do solo pela

gessagem. É provável que a quantidade de gesso utilizada, considerando o tempo após a aplicação, não foi suficiente para que promovesse tais efeitos.

Cabe destacar que, os efeitos positivos, em longo prazo, da aplicação dos corretivos em superfície superam os possíveis efeitos deletérios na estruturação do solo que sua aplicação poderia implicar, principalmente, na camada mais superficial, pois apesar da redução nos teores do COT e COP, os valores de DMP, DMG e IEA foram superiores ao controle (Tabela 6 e 8).

A menor resistência à penetração (Tabela 10) é consequência da melhor agregação do solo (Tabela 8). Contudo, é importante ressaltar que em todos os tratamentos e em todas as profundidades estavam acima de 2 MPa, valor considerado como limitante para o desenvolvimento das culturas (TAYLOR; ROBERSON; PARKER, 1966). Pesquisas recentes apontam que no SPD ocorre formação de camada com maior estado de compactação entre 0,10 a 0,20 m (FRANCHINI et al., 2009; RÓS; FILHO; BARBOSA, 2013). A resistência do solo à penetração tem sido utilizada como ferramenta para avaliar o estado de compactação dos solos. O impedimento que o solo proporciona à penetração da haste é semelhante ao impedimento imposto pelo solo ao desenvolvimento do sistema radicular. Assim, os valores obtidos na resistência à penetração são utilizados como forma de identificar camadas compactadas, uma vez que a inserção da haste no solo é capaz de avaliar a resistência em diferentes profundidades.

6.2.4 Teores de Nutrientes, Produção de Matéria Seca da Parte Aérea, Componentes da Produção e Produtividade de Grãos

6.2.4.1 Cultura do Milho

Na cultura do milho, os teores foliares de P, Ca, S, Cu, Zn, Mn e Fe, encontravam-se dentro da faixa considerada adequada para a cultura (CANTARELLA; VAN RAIJ; CAMARGO, 1997). Os teores foliares de N e Mg, nos tratamentos controle e gessagem, e os de K, em todos os tratamentos, encontravam-se abaixo da faixa considerada adequada para a cultura. Assim, estes resultados podem indicar que, para a cultura do milho, o N e o Mg são os nutrientes com grande probabilidade de limitar a produção em condições de acidez do solo. Visualmente na área experimental, observou-se as plantas, no tratamento controle e no gesso, amareladas, principalmente nas folhas mais velhas, com

sintoma típico deficiência de nitrogênio, ou seja, provavelmente, plantas com baixo teor de clorofila. É importante destacar, que o Mg é o átomo central da clorofila e, este composto, é formado ainda por quatro átomos de N (Marschner, 2012). Além disso, a elevada acidez, reduz da disponibilidade de Mo e isto reduz a assimilação do nitrogênio pela planta em razão deste nutriente participar da atividade da nitrato redutase (MARTENS; WESTERMANN, 1991).

Os maiores teores de N e P com a calagem, associada ou não ao gesso, na cultura do milho (Tabelas 11), pode ser decorrente da elevação do pH (Figura 5), que pode aumentar a atividade da nitrificação em até 5 vezes, de 0,18 para 0,93 $\mu\text{g NO}_3^- \text{N/g.h}$ (ISLAM; WHITE; CHEN, 2006), a mineralização de N orgânico do solo (ROSOLEM et al., 1990) e a disponibilidade de P no solo (Figura 6) (MACBRIDE, 1994). Castro e Crusciol (2013b) e Castro e Crusciol (2013a), num Latossolo Vermelho, avaliaram a aplicação de calcário e silicato de cálcio e magnésio, e observaram efeito semelhante para os teores de N na cultura do milho, e para os teores de P na braquiária (*Urochloa ruziziensis*), com a aplicação dos corretivos da acidez.

Os teores de K nas plantas de milho reduziram (Tabela 11), evidenciando que pode ter ocorrido competição pelos sítios de troca de absorção com o Ca e Mg, mas principalmente com o Mg, pela similaridade de raio iônico e potencial eletroquímico de absorção de ambos (RAHMATULLAH; BAKER, 1981; REHM; SORENSEN, 1985; PECK; MACDONALD, 1989; PATEL et al., 1993; FONSECA; MEURER, 1997). Caires et al. (2002) também observaram elevado desequilíbrio nutricional entre o Mg e K, contudo não constataram efeito na produtividade de grãos.

A calagem superficial é conhecida por influenciar positivamente a absorção de Ca e Mg nas culturas em SPD estabelecido (Tabela 11), uma vez que os produtos da dissociação do calcário elevam a disponibilidade de Ca e Mg trocável no perfil do solo, corroborando os resultados obtidos por Castro e Crusciol (2013b) e Castro e Crusciol (2013a) na cultura do milho. Porém, nota-se que os teores de Mg foram menores com a aplicação de gesso, provavelmente, pela menor disponibilidade do elemento na zona explorada pelo sistema radicular, decorrente do processo de lixiviação do Mg^{2+} (QUAGGIO; DECHEN; VAN RAIJ, 1982; ROSOLEM; MACHADO, 1984), conforme constatado, principalmente, aos 12 meses após aplicação (Figura 7). Com relação ao gesso agrícola, por ser fonte de Ca, também pode aumentar a absorção de Ca pelas culturas (CAIRES et al., 2001, 2006a).

Os maiores teores foliares de S com a gessagem e a calagem associada ao gesso (Tabelas 11), é decorrente do aumento nos teores de $S-SO_4^{2-}$ no solo pela gessagem (Figura 6). O gesso agrícola é um subproduto da fabricação de ácido fosfórico possuindo em sua composição quantidades substanciais de enxofre (16% de S). Esses resultados corroboram os obtidos por Caires et al. (2001, 2002) e Soratto e Crusciol (2008d) em cevada, trigo e aveia-preta, respectivamente.

Os teores de Cu, Zn, Mn e Fe reduziram com a calagem, associada ou não ao gesso (Tabelas 11). O aumento do pH proporcionado pela calagem reduz a disponibilidade dos micronutrientes catiônicos no solo, aumentando a retenção no complexo coloidal ou reduzindo a solubilidade das formas químicas que controlam a sua concentração na solução do solo (QUAGGIO, 2000).

Com relação à produção de matéria seca e os componentes da produção, sendo este último pouco estudado nos trabalhos relacionados acidez do solo e aplicação de corretivos, a avaliação permite entender o porquê a acidez reduz a produtividade de grãos, ou seja, qual(is) estrutura(s) que comporá(ão) a produção da planta é mais sensível a acidez do solo, pois na grande totalidade dos trabalhos nesta linha de pesquisa avaliam apenas a produtividade de grãos e, ainda, em um número maior a produção de matéria seca da parte aérea.

Assim, constatou-se que a produção de matéria seca foi maior com a calagem, associada ou não ao gesso (Tabela 11), semelhantes aos resultados observados por Melo et al. (2011). Os autores atribuíram este efeito à melhor nutrição das plantas de milho proporcionada pela calagem.

A calagem associada ao gesso proporcionou o maior número de espigas por planta, seguida do tratamento calagem (Tabela 11). Isto pode ter ocorrido em decorrência da elevada acidez do solo ter prejudicado o desenvolvimento inicial das plantas, fase em que as espigas potenciais começam a ser determinadas, da fase V3 até a V5 (RITCHIE; HANWAY; BENSON, 2003). Prado (2001) observaram os maiores valores de espigas por plantas, de 0,99, na saturação por bases de 65% comparados à saturação por bases de 45%, com valores de 0,94, contudo os autores salientam que não houve diferença significativa.

O número de grãos por espiga e a massa de 100 grãos foram maiores nos tratamentos calagem e calagem associada ao gesso, seguidos da gessagem (Tabela 11), evidenciando que estes componentes ficaram limitados sob condições de

elevada acidez. Estes resultados podem ser atribuídos aos maiores teores de Ca nestes tratamentos, visto que este nutriente é essencial na viabilidade e germinação do grão de pólen e no crescimento do tubo polínico, que garantirão a fecundação da flor (MARSCHNER, 2012). Assim, condições desfavoráveis durante o desenvolvimento dos grãos além de causar abortamento destes (JACOBS; PEARSON, 1991), pode também reduzir a capacidade dos drenos de mobilizar fotoassimilados, ou seja, reduz a massa de 100 dos grãos (Tabela 11). Castro e Crusciol (2013b) e Castro e Crusciol (2013a) também verificaram maiores quantidades de grãos por espiga na cultura do milho, com a aplicação de calcário e silicato de cálcio e magnésio, evidenciando que este componente da produção parecer ser o mais afetado pela acidez do solo na cultura do milho.

A produtividade de grãos aumentou em ordem crescente em função da aplicação de gesso, calcário e calcário associado ao gesso (Tabela 11). Este efeito foi reflexo dos observados nos componentes da produção, ou seja, os maiores número de grãos por espiga e massa de 100 grãos no tratamento gessagem, em relação ao controle, e na calagem e calagem associada ao gesso, em relação ao controle e a gessagem, bem como, o maior número de espigas por planta no tratamento calagem associada ao gesso, em relação ao controle, a gessagem e a calagem, foram determinantes para a produtividade de grãos.

Aumentos consideráveis na produção de milho com a aplicação de calcário incorporado ao solo em sistema de preparo convencional têm sido descritos na literatura (GONZALEZ-ERICO et al., 1979; CAMARGO et al., 1982; RAIJ et al., 1983; ERNANI; NASCIMENTO; OLIVEIRA, 1998), mesmo para genótipos com tolerância ao Al (RAIJ et al., 1998). Em solos ácidos manejados em plantio direto na região tropical do Brasil, trabalhos revelam respostas expressivas do milho à aplicação superficial de calcário (CASTRO; CRUSCIOL, 2013b). Respostas positivas do milho à aplicação de gesso têm sido observadas em variadas condições de solo e clima (CARVALHO et al., 1986; FARINA; CHANNON, 1988; RAIJ et al., 1998; CAIRES et al., 1999)

Quanto às safras, a melhor nutrição de plantas, os maiores valores nos componentes produtivos e, portanto, maior produtividade, na safra agrícola de 2010/11 (Tabelas 11), foi decorrente da maior precipitação pluvial e melhor distribuição de chuvas durante o desenvolvimento da cultura (Figura 1). Destaca-se ainda que a semeadura mais tardia do milho em 2011/12, associadas à baixa precipitação pluvial, certamente prejudicaram o desenvolvimento das plantas e a produtividade de grãos.

6.2.4.2 Cultura do Crambe

Na cultura do crambe, os teores foliares de macronutrientes foram semelhantes aos observados por Mauad et al. (2013), com exceção do K, que encontrava-se muito acima dos valores observados pelos autores (Tabela 12). Os autores constataram que, aos 42 dias após emergência (início do florescimento), a ordem de extração foi $N > Ca > S > Mg > P > K$, e os teores na planta inteira foram de 16,2, 4,3, 3,8, 11,7, 4,4 e 4,5 g kg⁻¹, respectivamente.

Com relação aos teores de Ca e Mg (Tabela 12), os efeitos positivos da calagem superficial são conhecidos para diversas culturas cultivadas sob plantio direto consolidado, uma vez que os produtos da dissociação do calcário também podem chegar a uma grande área explorada pelas raízes das plantas (CAIRES; BARTH; GARBUIO, 2006; CASTRO, 2012; CASTRO; CRUSCIOL, 2013b). Resultados semelhantes na cultura do crambe foram observados por Castro (2012), os quais avaliaram a aplicação de calcário e silicato de cálcio e magnésio. Porém, nota-se que os teores de Mg foram menores com a aplicação de gesso, conforme constatado na cultura do milho. Com relação à calagem associada ao gesso, por ambos serem fontes de Ca, também podem aumentar a absorção de Ca pelas culturas (CAIRES et al., 2001, 2006a).

O maior teor de S pelas plantas de crambe no tratamento calcário associado ao gesso, seguido do tratamento calcário (Tabelas 12), pode ser decorrente da liberação de pequenas quantidades sulfato adsorvido ou ainda por maior mineralização da matéria orgânica, em decorrência da elevação do pH das camadas superficiais do solo com a calagem (Figura 5). No tratamento calcário associado ao gesso houve aumento nos teores de $S-SO_4^{2-}$ no solo, especialmente nas camadas mais profundas, possibilitando maior absorção de S pelas plantas (Figura 6). Efeitos da aplicação de gesso no teores de S foram observados também em outras culturas (Caires et al., 2001; 2002; Soratto e Crusciol, 2008d).

Os teores de Cu, Zn, Mn e Fe reduziram com a calagem, associado ou não ao gesso (Tabelas 12). O aumento do pH proporcionado pela calagem reduz a disponibilidade dos micronutrientes catiônicos no solo, aumentando a retenção no complexo coloidal ou reduzindo a solubilidade das formas químicas que controlam a sua concentração na solução do solo (QUAGGIO, 2000).

Quanto à produção de matéria seca e os componentes da produção, assim como para a cultura do milho, são escassos os trabalhos que estudam a influência da acidez do solo na sua determinação. A produção de matéria seca foi maior com calagem, associada ou não ao gesso (Tabela 12), semelhantes aos resultados observados por Castro (2012) com a aplicação de calcário e silicato de cálcio e magnésio. O autor atribuiu este efeito à melhor nutrição das plantas do crambe proporcionada pela aplicação dos corretivos.

A calagem, associada ou não ao gesso, proporcionaram as maiores populações de planta e número de grãos por planta, seguidas do tratamento gessagem (Tabela 12). Isto pode ter ocorrido em decorrência da elevada acidez do solo, que prejudicou o desenvolvimento das plantas, principalmente por limitar o crescimento do sistema radicular, o qual é agravado pela baixa disponibilidade hídrica durante este período, interferindo diretamente na população de plantas.

O número de grãos por planta pode estar relacionado com os maiores teores de Ca nestes tratamentos, visto que, este nutriente é essencial na germinação do grão de pólen e no crescimento do tubo polínico, os quais garantirão a fecundação da flor (MARSCHNER, 2012). Castro (2012) observou maiores população de plantas e número de grãos por planta com a aplicação de corretivos da acidez. O autor observou, na média dos tratamentos de corretivos, incremento de 13% na população de plantas e de 72% no número de grãos por planta, em relação ao controle, valores estes que foram próximos aos observados no presente trabalho.

A produtividade de grãos foi maior nos tratamentos calagem, associado ou não ao gesso, seguidos da gessagem (Tabela 12). Este efeito foi reflexo dos observados nos componentes da produção, ou seja, as maiores populações de planta e número de grãos por planta no tratamento gessagem, em relação ao controle, e na calagem e calagem associada ao gesso, em relação ao controle e à gessagem, foram determinantes na produtividade de grãos.

Segundo Janegitz et al. (2010), a saturação por bases adequada para o desenvolvimento e produtividade de grãos do crambe em solos de textura média encontra-se entre 50-65%. Contudo, esta faixa sugerida pelos autores é muito ampla e regionalizada, pois no presente trabalho a aplicação do calcário, visando elevar a saturação por bases a 70%, incrementou em média a produção de grãos em 81%, indicando que a acidez do solo é limitante na produção de grãos de crambe. Castro (2012) também

observou aumento de 48% em média na produção de grãos de crambe com a aplicação de corretivos, também visando elevar a saturação por bases a 70%.

Assim, faz-se necessário o aprofundamento dos estudos de calagem e gessagem para esta cultura, a fim de estabelecer recomendações que possam suprir as necessidades nutricionais da cultura.

Quanto às safras, os menores teores de nutrientes e menores valores de componentes da produção refletiram diretamente na produtividade de grãos na safra 2012 (Tabela 13) o que pode ser atribuído à maior incidência de doenças foliares devido a maior umidade no período, o qual reduziu drasticamente a área foliar fotossinteticamente ativa da cultura.

6.2.4.3 Cultura do Feijão-caupi

Na cultura do feijão-caupi (Tabela 13), apenas os teores foliares de Cu encontrava-se dentro da faixa considerada adequada, enquanto que os teores de N e P estavam acima e os de K, Ca, Mg, S e Fe abaixo (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Os teores foliares de Zn e Mn, nos tratamentos calagem, associado ou não ao gesso, encontravam-se abaixo da faixa considerada adequada para a cultura. Contudo, esta redução parece não ter limitado o desenvolvimento e produtividade da cultura, mas indica a necessidade de estudos para estabelecer os níveis adequados para novos materiais.

O incremento nos teores de N e P com a calagem, associada ou não ao gesso, na cultura do feijão-caupi (Tabelas 13), pode ser decorrente da elevação do pH (Figura 5), que aumenta a atividade da nitrificação (ISLAM; WHITE; CHEN, 2006), a mineralização de N orgânico do solo (ROSOLEM et al., 1990) e a disponibilidade de P no solo (Figura 6) (MACBRIDE, 1994). Além disso, a calagem pode exercer efeito benéfico no processo biológico de fixação de N₂, associados principalmente à maior disponibilidade de Mo (CAIRES; BANZATTO; FONSECA, 2000). Assim como observado no presente trabalho, Soratto e Crusciol (2008) e Castro e Crusciol (2013a) também observaram maiores teores de P pelas culturas da aveia preta e soja, respectivamente.

Em relação ao aumento nos teores foliares de Ca e Mg proporcionado pela calagem, deve se levar em conta que o calcário é excelente fonte Ca e Mg, contribuindo para o aumento dos teores destes no solo. Assim, como o calcário o gesso também é fonte de Ca, resultando também no aumento da disponibilidade deste no

solo. Porém, nota-se que os teores de Mg foram menores com a aplicação de gesso e no tratamento que o gesso foi associado à calagem, o que é resultado da lixiviação de Mg^{2+} (QUAGGIO; DECHEN; VAN RAIJ, 1982; ROSOLEM; MACHADO, 1984), reduzindo a quantidade disponível para absorção das plantas.

Os teores de Cu, Zn e Mn reduziram com a calagem superficial (Tabelas 13). O aumento do pH proporcionado pela calagem reduz a disponibilidade dos micronutrientes catiônicos no solo, aumentando a retenção no complexo coloidal ou reduzindo a solubilidade das formas químicas que controlam a sua concentração na solução do solo (QUAGGIO, 2000).

Quanto à produção de matéria seca e os componentes da produção, assim como para a cultura do milho e do crambe, são escassos os trabalhos que estudam a influência da acidez do solo na sua determinação. A produção de matéria seca foi maior com a calagem, associada ou não ao gesso (Tabela 13), diferentemente dos resultados observados por Fernandes et al. (2013). Contudo, os autores trabalharam com uma amplitude de saturação por bases pequena, de 50 e 60%, o que pode justificar os resultados obtidos no presente estudo.

A calagem, associado ou não ao gesso, proporcionaram os maiores números de vagens por planta, grãos por vagem e massa de 100 grãos (Tabela 13). Apesar da cultura do feijão-caupi ter boa tolerância ao Al (ARAÚJO; WATT, 1988; CRAVO; SMYTH, 1990; SMYTH; CRAVO, 1992; IRINO, 2007), os resultados evidenciaram que a correção da acidez do solo foi essencial na determinação dos componentes da produção. Assim, a produtividade de grãos foi reflexo dos efeitos observados nos componentes da produção, ou seja, os maiores número de vagens por planta, grãos por vagem e massa de 100 grãos. Esses resultados corroboram os de Fernandes et al. (2013), que constataram, na dose de calcário para elevar a saturação por bases a 60%, maior número de grãos por planta, em relação à saturação por bases de 50% e, conseqüentemente, maior produção de grãos.

Quanto às safras, os maiores teores de nutrientes e maiores valores de componentes da produção refletiram diretamente na produtividade de grãos na safra 2012 (Tabela 13), pois houve maior precipitação e melhor distribuição pluvial (Figura 1).

É importante ressaltar que os efeitos benéficos proporcionados pela calagem superficial na produção das culturas, foram observados mesmo em anos com disponibilidade hídrica adequada, diferentemente do que ocorre em alguns estudos na

região Sul do país, de clima subtropical, caracterizado pelas precipitações pluviais bem distribuídas ao longo do ano, onde há diversos relatos da ausência de resposta das culturas à aplicação de corretivos da acidez em SPD (MOREIRA et al., 2001; CAIRES et al., 2006a, 2008a, 2008b; CAIRES; JORIS; CHURKA, 2011).

Essas constatações na região Sul do Brasil pode ser atribuída ao elevado aporte de resíduo vegetal e, posterior transformação em matéria orgânica, proporcionados pelo SPD, com teores superiores a 30 g dm^{-3} , mesmo nos tratamentos sem correção de acidez do solo. Conforme observado neste estudo, o acúmulo de C orgânico no sistema foi extremamente dependente da correção da acidez do solo (Tabela 6). Assim, fica evidente que no SPD não é prudente reduzir a quantidade de calcário aplicado, visto que os benefícios na produção das culturas são constantemente observados com a adequada correção da acidez do solo.

7 CONCLUSÕES

A aplicação do calcário, associado ou não ao gesso, na superfície do solo, foram efetivas em reduzir a acidez do solo até a profundidade de 0,20 m.

Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo aumentaram em superfície e subsuperfície com a calagem superficial, com maiores teores de Ca^{2+} quando associado ao gesso.

O gesso agrícola aplicado em superfície reduziu a acidez trocável (Al^{3+}) e aumentou os teores de Ca^{2+} e S-SO_4^{2-} em superfície e subsuperfície, mas reduziram os teores de Mg^{2+} em superfície.

A aplicação do calcário, associado ou não ao gesso, na superfície do solo, promoveram aumento do COP, COAM e COT abaixo da camada mais superficial do solo, resultando nos maiores estoques de C na camada de 0-0,20 m.

A aplicação de calcário, associado ou não ao gesso, na superfície do solo, em sistema plantio direto, melhorou a agregação, a microporosidade e a capacidade de retenção de água do solo, e reduziu a resistência à penetração, com efeitos mais pronunciados na agregação com a calagem associada ao gesso.

Os teores de nutrientes das culturas foram beneficiados pela calagem, associada ou não ao gesso, principalmente, os de Ca e Mg.

O componente da produção que foi mais afetado pela acidez do solo nas culturas de milho, crambe e feijão-caupi, foi o número de grãos por espiga, número de grãos por planta e número de grãos por vagens, respectivamente.

A correção da acidez resultou em maiores produtividades de grãos. A gessagem foi eficiente em amenizar os efeitos negativos da acidez do solo nas culturas do milho e crambe, refletindo em aumento da produtividade de grãos, e quando associada à calagem, aumentou a produção de grãos de milho.

8 REFERÊNCIAS

ADAMS, F.; RAWAJFIH, Z. Basaluminite and alunite: A possible cause of sulfate retention by acid soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 41, p. 686–692, 1977.

ADAMS, W. E.; WHITE, A. W.; DAWSON, R. N. Influence of Lime Sources and Rates on “Coastal” Bermudagrass Production, Soil Profile Reaction, Exchangeable Ca and Mg. **Agronomy Journal**, v. 59, n. 2, p. 147–149, 1967.

ALCARDE, J. C. **Corretivos de acidez do solo: características e interpretações técnicas (Boletim técnico, 6)**. [s.l: s.n.].

ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um latossolo de cerrado sob plantio direto, de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 923–934, 2005.

ALVARADO, J.; CAJUSTE, L. J. Encalado y retención de fósforo en suelos derivados de cenizas volcánicas. **Turrialba**, v. 43, p. 235–241, 1993.

ALVES, J. M.; LEANDRO, W. M.; NETO, S. A. S. O.; LEÃO, A. K. M.; ALVES, C. C. F. Effect of base saturation and nitrogen dose on cultivation of crambe. v. 10, n. 1, p. 14–22, 2015.

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I. Alteração de parâmetros químicos do solo pela reaplicação superficial de calcário no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 4, p. 695–702, 2001.

AMARAL, A. S.; ANGHINONI, I.; DESCHAMPS, F. C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 115–123, 2004.

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 Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 359–367, 2004.

AMBROSANO, E. J.; TANAKA, R. T.; MASCARENHAS, H. A. A.; VAN RAIJ, B.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H. Leguminosas e oleaginosas. In: VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo, 2nd ed. Bol. Tec. 100**. Campinas: IAC, 1997. p. 189–203.

ARAÚJO, A. R. **Calagem e extrato vegetais hidrossolúveis na movimentação de íons em solo**. 2003. Universidade Federal de Lavras, 2003.

ARAÚJO, J. P. P.; WATT, E. E. **O caupi no Brasil**. Goiânia: Embrapa - CNPAF; Ibadan: IITA, 1988.

AZEVEDO, A. C.; KÄMPF, N.; BOHNEN, H. Alterações na dinâmica evolutiva de latossolo bruno pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 191–198, 1996.

BERTOLLO, A. M. **Propriedades físicas de um latossolo após calagem, gessagem em manejos de solo**. 2014. Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; DOS SANTOS, H. P.; DENARDIN, J. E.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, v. 16, n. 2, p. 784–795, 2010.

BOHN, H. L.; MCNEAL, B. L.; O'CONNOR, G. A. **Soil chemistry**. 3rd. ed. New York: Wiley, 2001.

BONINI, C. S. B.; ALVES, M. C. Qualidade física de um Latossolo Vermelho em recuperação há dezessete anos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 4, p. 329–336, 2012.

BORGES, E. N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G. F.; COSTA, L. M. Misturas de gesso e matéria orgânica alterando atributos físicos de um latossolo com compactação simulada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 1, p. 125–130, 1997.

BORGHI, E.; COSTA, N. V.; CRUSCIOL, C. a. C.; MATEUS, G. P. Influência da distribuição espacial do milho e da *Brachiaria brizantha* consorciados sobre a população de plantas daninhas em sistema plantio direto na palha. **Planta Daninha**, v. 26, n. 3, p. 559–568, 2008.

BORTOLUZZI, E. C.; POLETO, C.; BAGINSKI, Á. J.; SILVA, V. R. Da. Aggregation of subtropical soil under liming: a study using laser diffraction. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 725–734, 2010.

BRAGA, F. A.; VALE, F. R.; MUNIZ, J. A. Movimentação de nutrientes no solo, crescimento e nutrição mineral no eucalipto, em função de doses de gesso e níveis de irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, p. 69–77, 1995.

BRIEDIS, C.; DE MORAES SÁ, J. C.; CAIRES, E. F.; DE FÁTIMA NAVARRO, J.; INAGAKI, T. M.; BOER, A.; DE OLIVEIRA FERREIRA, A.; NETO, C. Q.; CANALLI, L. B.; BÜRKNER DOS SANTOS, J. Changes in organic matter pools and increases in carbon sequestration in response to surface liming in an oxisol under long-term no-till. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 1, p. 151, 2012a. Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/76/1/151>>. Acesso em: 30 maio. 2014.

BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. D. M.; CAIRES, E. F.; NAVARRO, J. D. F.; INAGAKI, T. M.; BOER, A.; NETO, C. Q.; FERREIRA, A. D. O.; CANALLI, L. B.; SANTOS, J. B. Dos. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. **Geoderma**, v. 170, p. 80–88, jan. 2012b.

Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706111002965>>. Acesso em: 30 maio. 2014.

BRIEDIS, C.; SÁ, J. C. de M.; CAIRES, E. F.; NAVARRO, J. de F.; INAGAKI, T. M.; FERREIRA, A. O. Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 7, p. 1007–1014, 2012c.

BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1-2, p. 3–22, jan. 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706104000898>>. Acesso em: 27 maio. 2014.

CAIRES, E. F. **Correção da acidez do solo em sistema plantio direto** Informações agronômicas IPNI-International Plant Nutrition Institute, , 2013. . Disponível em: <[http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/4A4F64F9876B415683257B3F00708191/\\$FILE/Page1-13-141.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/4A4F64F9876B415683257B3F00708191/$FILE/Page1-13-141.pdf)>.

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, n. 3, p. 791, 2005. Disponível em: <<https://www.agronomy.org/publications/aj/abstracts/97/3/0791>>. Acesso em: 23 maio. 2014.

CAIRES, E. F.; BANZATTO, D. A.; FONSECA, A. F. Calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 1, p. 161–169, 2000.

CAIRES, E. F.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Lime application in the establishment of a no-till system for grain crop production in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 89, n. 1, p. 3–12, ago. 2006. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198705001819>>. Acesso em: 26 jul. 2012.

CAIRES, E. F.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Correção da acidez do solo, crescimento radicular e nutrição do milho de acordo com a calagem na superfície em sistema plantio direto. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v. 26, p. 1011–1022, 2002a.

CAIRES, E. F.; BLUM, J.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; KUSMAN, M. T. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 275–286, abr. 2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832003000200008&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.

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

CAIRES, E. F.; CHURKA, S.; GARBUIO, F. J.; FERRARI, R. A.; MORGANO, M. A. Soybean yield and quality as a function of lime and gypsum applications. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 4, p. 370–379, 2006a.

CAIRES, E. F.; CRISTOVÃO, J.; CORRÊA, 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, n. 5, p. 502–509, 2006b.

CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 2, p. 357–364, 2002b.

CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da cevada em função da calagem e aplicação de gesso. **Bragantia**, v. 60, n. 3, p. 213–223, 2001.

CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; FELDHAUS, I. C.; BLUM, J. Crescimento radicular e nutrição da soja cultivada no sistema plantio direto em resposta ao calcário e gesso na superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 1029–1040, 2001.

CAIRES, E. F.; FONSECA, A. F.; MENDES, J.; CHUEIRI, W. A.; MADRUGA, E. F. Produção de milho, trigo e soja em função das alterações das características químicas do solo pela aplicação de calcário e gesso na superfície, em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 315–327, 1999.

CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A. Calagem superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 87–98, 2006c.

CAIRES, E. F.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S.; BARTH, G.; CORRÊA, J. C. L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, v. 28, n. 1, p. 57–64, jan. 2008a. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1161030107000524>>. Acesso em: 7 set. 2012.

CAIRES, E. F.; HALISKI, A.; BINI, A. R.; SCHARR, D. A. Surface liming and nitrogen fertilization for crop grain production under no-till management in Brazil. v. 66, p. 41–53, 2015.

CAIRES, E. F.; JORIS, H. a. W.; CHURKA, S. Long-term effects of lime and gypsum additions on no-till corn and soybean yield and soil chemical properties in southern Brazil. **Soil Use and Management**, v. 27, n. 1, p. 45–53, 12 mar. 2011. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1475-2743.2010.00310.x>>. Acesso em: 26 jul. 2012.

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 Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 125–136, 2004.

CAIRES, E. F.; PEREIRA FILHO, P. R. S.; ZARDO FILHO, R.; FELDHAUS, I. C. Soil acidity and aluminium toxicity as affected by surface liming and cover oat residues under a

no-till system. **Soil Use and Management**, v. 24, n. 3, p. 302–309, set. 2008b. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1111/j.1475-2743.2008.00166.x>>. Acesso em: 23 maio. 2014.

CAMARGO, A. P.; RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; ROCHA, T. R.; NAGAI, V.; MASCARENHAS, H. A. A. Efeito da calagem nas produções de cinco cultivos de milho, seguidos de algodão e soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 17, n. 7, p. 1007–1012, 1982.

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**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2009.

CAMARGO, O. A.; RAIJ, B. van. Movimento do gesso em amostras de latossolos com diferentes propriedades eletroquímicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, p. 275–280, 1989.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 777–783, 1992. Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/56/3/SS0560030777>>.

CANTARELLA, H.; VAN RAIJ, B.; CAMARGO, C. E. O. Cereais. In: VAN RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo, 2nd ed. Bol. Tec. 100**. 2. ed. Campinas: IAC, 1997. p. 40–54.

CARVALHO, L. J. C. B.; GOMIDE, R. L.; RODRIGUES, G. C.; SOUZA, D. M. G.; FREITAS JR., E. Resposta do milho à aplicação de gesso e déficit hídrico em solos de cerrado. In: Seminário sobre o uso de fosfogesso na agricultura, Brasília. **Anais...** Brasília: EMBRAPA-DDT, 1986.

CARVALHO, W. A.; ESPÍNDOLA, C. R.; PACCOLA, A. A. **Levantamento de solos da Fazenda Experimental Lageado – Estação Experimental “Presidente Médici”**. [s.l.: s.n.].

CASTRO, C.; LOGAN, T. J. **Liming effects on the stability and erodibility of some brazilian oxisols** *Soil Science Society of America Journal*, 1991. .

CASTRO FILHO, C. Atributos do solo avaliados pelos seus agregados. In: MORAES, M. E.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. (Ed.). **Qualidade física do solo: Métodos de estudo – sistema de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. p. 225.

CASTRO FILHO, C.; LOGAN, T. Soil aggregation mechanisms affected by liming. In: WORLD CONGRESS OF SOIL SCIENCE, **Anais...**1998.

CASTRO, G. S. .; CRUSCIOL, C. A. .; NEGRISOLI, E.; PERIM, L. **Sistemas de produção de grãos e incidência de plantas daninhas** *Planta Daninha*, 2011. .

- CASTRO, G. S. A. **Atributos do solo decorrentes dos sistemas de produção e da aplicação superficial de corretivos**. 2012. Universidade Estadual Paulista, 2012.
- CASTRO, G. S. A.; CALONEGO, J. C.; CRUSCIOL, C. A. C. Propriedades físicas do solo em sistemas de rotação de culturas conforme o uso de corretivos da acidez. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 12, p. 1690–1698, 2011.
- CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Yield and mineral nutrition of soybean, maize, and congo signal grass as affected by limestone and slag. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 1, p. 673–681, 2013a.
- CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. **Geoderma**, v. 195-196, p. 234–242, mar. 2013b. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706112004235>>. Acesso em: 23 maio. 2014.
- CASTRO, G. S. A.; CRUSCIOL, C. A. C.; CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Management Impacts on Soil Organic Matter of Tropical Soils. **Vadose Zone Journal**, v. 14, n. 1, 2015. Disponível em: <<https://dl.sciencesocieties.org/publications/vzj/abstracts/14/1/vzj2014.07.0093>>.
- CHAN, K. Y.; HEENAN, D. P. Lime-induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, p. 1841–1844, 1999.
- CHI, C. M.; ZHAO, C. W.; SUN, X. J.; WANG, Z. C. Reclamation of saline-sodic soil properties and improvement of rice (*Oriza sativa* L.) growth and yield using desulfurized gypsum in the west of Songnen Plain, northeast China. **Geoderma**, v. 187-188, p. 24–30, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.04.005>>.
- CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; ERNANI, P. R.; FONTOURA, S. M. V.; ALBUQUERQUE, J. A.; WOBETO, C. Acidificação de um latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 1055–1064, 2002.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 1 jan. 2015.
- CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v. 29, n. 4, p. 777–788, 2005.
- CORRÊA, J. C.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MARCELINO, R. Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 9, p. 1307–1317, 2007.
- CORRÊA, J. C.; BULL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MORAES, M. H. Alteração de atributos físicos em latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal,

lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 263–272, 2009.

COSTA, A.; ROSOLEM, C. a. Liming in the transition to no-till under a wheat-soybean rotation. **Soil and Tillage Research**, v. 97, n. 2, p. 207–217, 2007.

COSTA, C. H. M. **Efeito residual da aplicação superficial de calcário e gesso nas culturas de soja, aveia-preta e sorgo granífero**. 2011. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, 2011.

COSTA, M. J. Da; ROSA JUNIOR, E. J.; ROSA, Y. B. C. J.; SOUZA, L. C. F. De; ROSA, C. B. J. Atributos químicos e físicos de um Latossolo sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 5, p. 701–708, 2007.

COSTA, F. D. S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE, J. A.; MARA, S. F. V. Calagem e as propriedades eletroquímicas e físicas de um latossolo em plantio direto Liming effect on electrochemical and physical properties of a no-tilled oxisol. **Ciência Rural**, v. 34, n. 1, p. 281–284, 2004.

CRAVO, M. S.; SMYTH, T. J. Sistemas de cultivos contínuos com altos insumos na Amazônia Brasileira. In: TALLER LATINO-AMERICANO DE MANEJO DE SUELOS TROPICALES, 2, San José, Costa Rica. **Anais...** San José, Costa Rica: 1990.

CRUSCIOL, C. A. C.; GARCIA, R. A.; CASTRO, G. S. A.; ROSOLEM, C. A. Nitrate role in basic cation leaching under no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 1975–1984, 2011.

DA SILVA, A. P.; KAY, B. D. **Estimating the least limiting water range of soils from properties and management** *Soil Science Society of America Journal*, 1997. .

DELLA FLORA, L. P.; ERNANI, P. R.; CASSOL, P. C. Mobilidade de cátions e correção da acidez de um cambissolo em função da aplicação superficial de calcário combinado com sais de potássio. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1591–1598, 2007.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T.; KASSAM, A.; HONGWEN, L. Current status of adoption of no-till farming in the world and some of its main benefits. **Int J Agric & Biol Eng**, v. 3, n. 1, p. 1–26, 2010.

ECHEVENGUÁ, A. **Crambe surge como nova opção para produzir biodiesel**. Disponível em: <www.ecoeacao.com.br>. Acesso em: 1 jan. 2011.

EKENLER, M.; TABATABAI, M. a. Effects of liming and tillage systems on microbial biomass and glycosidases in soils. **Biology and Fertility of Soils**, v. 39, n. 1, p. 51–61, 1 nov. 2003. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s00374-003-0664-8>. Acesso em: 29 maio. 2014.

EMBRAPA. **Feijão-caupi é exportado para seis países**. Disponível em: <<http://www.embrapa.br/imprensa/noticias/2007/dezembro/2a-semana/feijao-caupi-exportado>>. Acesso em: 1 jan. 2010.

EMBRAPA, - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Cultivo do Feijão-Caupi**. Disponível em: <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Feijao/FeijaoCaupi/index.htm>>.

EMBRAPA, E. A. B. D. P. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

ERNANI, P. R.; NASCIMENTO, J. A. L.; OLIVEIRA, L. C. Increase of grain and green matter of corn by liming. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 275–280, 1998.

ERNANI, P. R.; RIBEIRO, M. S.; BAYER, C. Modificações químicas em solos ácidos ocasionadas pelo método de aplicação de corretivos de acidez e de gesso agrícola. **Scientia Agrícola**, v. 58, n. 4, p. 825–831, 2001.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Ameliorating soil acidity of tropical oxisols by liming for sustainable crop production. **Advances in Agronomy**, v. 99, n. 08, p. 345–399, 2008.

FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. **Influence of pH on growth and nutrient uptake by crop species in an Oxisol** *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998. .

FARINA, M. P. W.; CHANNON, P. Acid-subsoil amelioration. II. Gypsum effects on growth and subsoil chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, p. 175–180, 1988.

FAVARETTO, N.; NORTON, L. D.; JOERN, B. C.; BROUDER, S. M. Gypsum amendment and exchangeable calcium and magnesium affecting phosphorus and nitrogen in runoff. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 5, p. 1788, 2006.

FERNANDES, A. R.; FONSECA, M. R.; BRAZ, A. M. S. Produtividade de feijão caupi em função da calagem e fósforo. **Revista Caatinga**, v. 26, n. 4, p. 54–62, 2013.

FERREIRA, D. F. SISVAR: a program for statistical analysis and teaching. **Revista Symposium**, v. 6, p. 36–41, 2008.

FONSECA, J. A.; MEURER, E. J. Inibição da absorção de magnésio pelo potássio em plântulas de milho em solução nutritiva. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 47–50, 1997.

FRANCHINI, J. C.; DEBIASI, H.; SACOMAN, A.; NEPOMUCENO, A. L.; FARIAS, J. R. B. **Manejo do solo para redução das perdas de produtividade pela seca** *Embrapa Soja, Documentos*, 314. [s.l: s.n.].

FRANCHINI, J. C.; HOFFMANN-CAMPO, C. B.; TORRES, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Organic composition of green manure during growth and its effect on cation mobilization in an acid oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 34, n. 13-14, p. 2045–2058, 2003. Disponível em:

<<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0042698319&partnerID=40&md5=71d585cb7a14bd9252299dda76dea3fd>>.

FRANCHINI, J. C.; MEDA, A. R.; CASSIOLATO, M. E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Potencial de extratos de resíduos vegetais na mobilização do calcário no solo por método biológico. **Scientia Agricola**, v. 58, n. 2, p. 357–360, 2001.

FREIRE FILHO, F. R.; RIBEIRO, V. Q.; ROCHA, M. de M.; SILVA, K. J. D.; NOGUEIRA, M. do S. da R.; RODRIGUES, E. V. **Feijão-caupi no brasil: produção, melhoramento genético, avanços e desafios**. [s.l.: s.n.]

FUNDAÇÃO MS. **Crambe – Uma opção rentável para sua safrinha**. Disponível em: <<http://www.fundacaoms.org.br/page.php>>.

GARCIA, J. C.; MATTOSO, M. J.; DUARTE, J. O.; CRUZ, J. C. Aspectos Econômicos da Produção e Utilização do Milho. **Circular Técnica 74**, 2006.

GASSEN, D. N.; GASSEN, F. R. **Plantio direto**. Passo Fundo, RS: Aldeia Sul, 1996.

GATIBONI, L. C.; SAGGIN, A.; BRUNETTO, G.; HORN, D.; FLORES, J. P. C.; RHEINHEIMER, D. dos S.; KAMINSKI, J. Alterações nos atributos químicos de solo arenoso pela calagem superficial no sistema plantio direto consolidado. **Ciência Rural**, v. 33, n. 2, p. 283–290, 2003.

GONZALEZ-ERICO, E.; KAMPRATH, E. J.; NADERMAN, G. C.; SOARES, W. V. Effect of Depth of Lime Incorporation on the Growth of Corn on an Oxisol of Central Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 43, p. 1155–1158, 1979. Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/43/6/1155>>.

GREENLAND, D. J. Changes in the nitrogen status and physical condition of soils under pastures, with special reference to the maintenance of the fertility of Australian soils used for growing wheat. **Soils Fertility**, v. 34, p. 237–251, 1971.

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, n. 2, p. 173–179, dez. 2008. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706108002632>>. Acesso em: 29 maio. 2014.

HERNANI, L. C.; KURIHARA, C. H.; SILVA, W. M. Sistemas de manejo de solo e perdas de nutrientes e matéria orgânica por erosão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 145–154, 1999.

IBGE. **Sistema de recuperação automática – SIDRA**.

IRINO, V. H. F. **Produção do feijão-caupi e atributos químicos de um latossolo amarelo, em função da calagem, na região nordeste paraense**. 2007. Universidade Federal Rural da Amazônia-UFRA, 2007.

ISLAM, A.; WHITE, R. E.; CHEN, D. Nitrification activity in acid soils of north-eastern Victoria, Australia, as affected by liming and phosphorus fertilisation. **Australian Journal of Soil Research**, v. 44, p. 739–744, 2006.

JACOBS, B. C.; PEARSON, C. J. Potential yield of maize, determined by rates of growth and development of ears. **Field Crops Research**, v. 27, n. 3, p. 281–298, 1991.

JANEGITZ, M. C.; SOUZA-SCHLICK, G. D.; TROPALDI, L.; CARDOSO, S. M. Influência da saturação por bases no crescimento e produção de crambe. **Cultivando o Saber**, v. 3, n. 4, p. 175–182, 2010.

JONG VAN LIER, Q. **Física do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.

JUO, a. S. R.; DABIRI, a.; FRANZLUEBBERS, K. Acidification of a kaolinitic Alfisol under continuous cropping with nitrogen fertilization in West Africa. **Plant and Soil**, v. 171, n. 2, p. 245–253, abr. 1995. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF00010278>>.

LAL, R.; SHUKLA, M. K. **Principles of soil physics**. New York: Marcel Dekker, 2004.

LIMA, C. J. G. D. S.; OLIVEIRA, F. D. A. De; MEDEIROS, J. F. De; OLIVEIRA, M. K. T.; JÚNIOR, A. B. D. A. Resposta do feijão caupi a salinidade da água de irrigação. **Revista verde de agroecologia e desenvolvimento sustentável**, v. 2, n. 2, p. 79–86, 2007.

LOPES, A. S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. **Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo, SP: ANDA, 2004.

LUCHESE, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos de química do solo**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2001.

MACBRIDE, M. B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1994.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997.

MARQUES, R. R. **Aplicação superficial de calcário e gesso em manejo conservacionista de solo para cultivo de amendoim e aveia branca**. 2008. Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, 2008.

MARRIOTT, E. E.; WANDER, M. M. Total and labile soil organic matter in organic and conventional farming systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 3, p. 950–959, 2006. Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/70/3/950>>. Acesso em: 23 maio. 2014.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. Amsterdam: Elsevier; Academic Press, 2012.

MARTENS, D. C.; WESTERMANN, D. T. Fertilizers application for correcting micronutrients deficiencies. In: MORTVEDT, J. J.; COX, F. R.; SHUMAN, L. M.; WELCH, R. M. (Ed.). **Fertilizers applications for correcting micronutrient deficiencies: micronutrients in agriculture**. 2. ed. Madison: Soil Science Society of America, 1991. p. 549–592.

MAUAD, M.; GARCIA, R. A.; VITORINO, A. C. T.; SILVA, R. M. M. F.; GARBIATE, M. V.; COELHO, L. C. F. Matéria seca e acúmulo de macronutrientes na parte aérea das plantas de Crambe. **Ciência Rural**, v. 43, n. 3, p. 771–778, 2013.

MEDA, A. R.; PAVAN, M. A.; MIYAZAWA, M.; CASSIOLATO, M. E. Plantas invasoras para melhorar a eficiência da calagem na correção da acidez subsuperficial do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 1, p. 647–654, 2002.

MELLO, J. C. A.; VILLAS BÔAS, R. L.; LIMA, E. V.; CRUSCIOL, C. A. C.; BÜLL, L. T. Alterações nos atributos químicos de um Latossolo distroférico decorrentes da granulometria e doses de calcário em sistemas plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 553–561, 2003.

MELO, L. C. A.; AVANZI, J. C.; CARVALHO, R.; SOUZA, F. S.; PEREIRA, J. L. A. R.; MENDES, A. D. R.; MACEDO, G. B. Nutrição e produção de matéria seca de milho submetido a calagem e adubação sulfatada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 2, p. 193–199, 2011.

MIRANDA, L. N. De; MIRANDA, C. J. C. de; REIN, T. A. Utilização de calcário em plantio direto e convencional de soja e milho em Latossolo Vermelho Lime under no-tillage and conventional planting systems for soybean. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 6, p. 563–572, 2005.

MIRANDA, L. N.; MIRANDA, J. C. C. Efeito residual do calcário na produção de milho e soja em solo Glei pouco húmico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 1, p. 209–215, 2000.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J. C. Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais. **Informações Agrônômicas**, n. 92, p. 8, 2000.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J. C. Evaluation of plant residues on the mobility of surface applied lime. **Brazilian archives of biology and technology**, v. 45, n. 3, p. 251–256, 2002.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; SANTOS, J. C. F. Effects of addition of crop residues on the leaching of Ca and Mg in Oxisols. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PLANT-SOIL INTERACTIONS AT LOW pH, 4., Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; EMBRAPA; CPAC, 1996.

MORAES, M. F.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; COSCIONE, A. R. Mobilidade de íons em solo ácido com aplicação de calcário, ácido orgânico e material vegetal em superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 673–684, 2007.

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

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

NAHAS, E.; DELFINO, J. H.; ASSIS, L. C. Atividade microbiana e propriedades bioquímicas do solo resultantes da aplicação de gesso agrícola na cultura do repolho. **Scientia Agricola**, v. 54, n. 3, p. 160–166, 1997.

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

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. 3 ed ed. Piracicaba: FEALQ, 2008.

PATEL, S. K.; RHOADS, F. M.; HANLON, E. A.; BARNETT, R. D. Potassium and magnesium uptake by wheat and soybean roots as influenced by fertilizer rate. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 24, n. 13-14, p. 1543–1556, 1 ago. 1993. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1080/00103629309368897>>.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. **Soil microbiology and biochemistry**. [s.l: s.n.]

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Toxicity of aluminum to coffee in ultisols and oxisols amended with CaCO₃, MgCO₃, and CaSO₄ · 2H₂O. **Soil Science Society of America Journal**, v. 46, n. July, p. 1201–1207, 1982.

PAVAN, M. A.; BINGHAM, F. T.; PRATT, P. F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium, and aluminum following lime and gypsum applications to a Brazilian Oxisol. v. 48, p. 33–38, 1984.

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

PECK, N. H.; MACDONALD, G. E. Sweet corn plant responses to P and K in the soil and to band-applied monoammonium phosphate, potassium sulfate, and magnesium sulfate. **American Society for Horticultural Science Journal**, v. 114, n. 2, p. 269–272, 1989.

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

PIRES, F. R.; SOUZA, C. M.; QUEIROZ, D. M.; MIRANDA, G. V.; GALVÃO, J. C. C. Alterações de atributos químicos do solo e estado nutricional e características agrônomicas de plantas de milho, considerando as modalidades de calagem em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 121–131, 2003.

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

PRADO, R. D. M. A calagem e as propriedades físicas de solos tropicais : revisão de literatura. **Revista Biociência**, v. 9, n. 3, p. 7–16, 2003.

PRADO, R. de M. **Saturação por bases e híbridos de milho sob sistema plantio direto** Scientia Agricola, 2001. .

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2000.

QUAGGIO, J. A.; DECHEN, A. R.; VAN RAIJ, B. Efeitos da aplicação de calcário e gesso sobre a produção de amendoim e lixiviação de bases do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 6, p. 189–194, 1982.

QUAGGIO, J. A.; VAN RAIJ, B.; GALLO, P. B.; MASCARENHAS, H. A. A. Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, n. 3, p. 375–383, 1993.

RAHMATULLAH; BAKER, D. E. Magnesium accumulation by corn (*Zea mays* L.) as a function of potassium-magnesium exchange in soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 45, p. 899–903, 1981. Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/sssaj/abstracts/45/5/899>>.

RAIJ, B. van. **Gesso na agricultura**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2008.

RAIJ, B. van; CAMARGO, A. P.; CANTARELLA, H.; SILVA, N. M. Alumínio trocável e saturação em bases como critérios para recomendação de calagem. **Bragantia**, v. 42, n. 13, p. 149–156, 1983.

RAIJ, B. van; FURLANI, P. R.; QUAGGIO, J. A.; PETTINELLI JÚNIOR, A. Gesso na produção de cultivares de milho com tolerância diferencial a alumínio em três níveis de calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 1, p. 101–108, 1998.

REEVE, N. G.; SUMNER, M. E. Amelioration of subsoil acidity in Natal Oxisols by leaching of surface-applied amendments. **Agrochimophysics**, v. 4, p. 1–6, 1972.

REHM, G. W.; SORENSEN, R. C. Effects of Potassium and Magnesium Applied for Corn Grown on an Irrigated Sandy Soil. **Soil Science**, v. 49, p. 1446–1450, 1985. Disponível em: <<https://dl.sciencesocieties.org/publications/sssaj/abstracts/49/6/1446>>.

RHEINHEIMER, D. S.; SANTOS, E. J. S.; KAMINSKI, J.; BORTOLUZZI, E. C.; GATIBONI, L. C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 797–805, 2000.

RIDLEY, A. M.; SLATTERY, W. J.; HELYAR, K. R.; COWLING, A. The importance of the carbon cycle to acidification of a grazed annual pasture. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 30, p. 529–537, 1990.

RITCHEY, K. D.; SILVA, S. E.; COSTA, V. F. No TitCalcium deficiency in clayey B horizons of savannah Oxisols. **Soil Science**, v. 133, p. 378–382, 1982.

RITCHEY, K. D.; SOUZA, D. M. G.; LOBATO, E.; CORREA, O. **Calcium Leaching to Increase Rooting Depth in a Brazilian Savannah Oxisol** *Agronomy Journal*, 1980. .

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. Como a planta de milho se desenvolve. **Informações Agronômicas**, v. 103, p. 1–20, 2003.

RÓS, A. B.; FILHO, J. T.; BARBOSA, G. M. D. C. Propriedades físicas de solo e crescimento de batata-doce em diferentes sistemas de preparo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 242–250, 2013.

ROSA JUNIOR, E. J.; MARTINS, R. M. G.; ROSA, Y. B. C. J.; CREMON, C. Calcário e gesso como condicionantes físico e químico de um solo de cerrado sob três sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)**, v. 36, n. 1, p. 37–44, 2007. Disponível em:
<<http://www.revistas.ufg.br/index.php/pat/article/view/2170>>.

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S.; GARCIA, R. A. Potássio lixiviado da palha de aveia-preta e milheto após a dessecação química. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 8, p. 1169–1175, ago. 2007. Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2007000800014&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.

ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; OLIVEIRA, R. H. De. 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, fev. 2003. Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-204X2003000200018&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.

ROSOLEM, C. A.; MACHADO, J. R. Efeito da calagem e gessagem na produção de algodão e na lixiviação de bases em dois latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 8, p. 103–109, 1984.

ROSOLEM, C. A.; PEREIRA, H. F. M.; BESSA, A. M.; AMARAL, P. G. Nitrogen in soil and cotton growth as affected by liming and N fertilizer. In: WRIGHT, R. J.; BALIGAR, V. C.; MURRMANN, R. P. (Ed.). **Plant-soil interactions at low pH**. Dordrecht: Kluwer, 1990. p. 321–325.

ROTH, C. H.; PAVAN, M. A. Effects of lime and gypsum on clay dispersion and infiltration in samples of a Brazilian Oxisol. **Geoderma**, v. 48, p. 351–361, 1991.

SÁ, J. C. D. M.; CERRI, C. C.; DICK, W. A.; LAL, R.; VENSKE FILHO, S. P.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 1486–1499, 2001.

SÁ, J. C. D. M.; LAL, R. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 46–56, abr. 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198708001736>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

SERAFIM, M. E.; DE LIMA, J. M.; LIMA, V. M. P.; ZEVIANI, W. M.; PESSONI, P. T. Alterações físico-químicas e movimentação de íons em latossolo gibbsítico sob doses de gesso. **Bragantia**, v. 71, n. 1, p. 75–81, 2012.

SILVA, A. A.; VALE, F. R.; FERNANDES, L. A.; NETO, A. E. F.; MUNIZ, J. A. Efeitos de relações CaSO₄/CaCO₃ na mobilidade de nutrientes no solo e no crescimento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 451–457, 1998.

SILVA, C. A.; VALE, F. R. Disponibilidade de nitrato em solos Brasileiros sob efeito da calagem e de fontes e doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 12, p. 2461–2471, 2000.

SILVA, F. A. S. E.; AZEVEDO, C. A. V. Principal components analysis in the software Assistat-statistical attendance. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, Reno-NV-USA. **Anais...** Reno-NV-USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.

SININBU, F. Safra recorde de feijão-caupi no Centro-Oeste. **Jornal do Centro de Pesquisa Agropecuária do Meio Norte**, v. 12, n. 29, p. 5, 2009. Disponível em: <<http://www.cpamn.embrapa.br/informativo/jornal29.pdf>>.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil and Tillage Research**, v. 79, n. 1, p. 7–31, set. 2004. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198704000881>>. Acesso em: 23 maio. 2014.

SMYTH, T. J.; CRAVO, M. Aluminium and calcium to continuous crop production in a Brazilian Amazon Oxisol. **Agronomy Journal**, v. 84, p. 843–850, 1992.

SOARES, M. R.; ALLEONI, L. R. F.; VIDAL-TORRADO, P.; COOPER, M. Mineralogy and ion exchange properties of the particle size fractions of some Brazilian soils in tropical humid areas. **Geoderma**, v. 125, n. 3-4, p. 355–367, 2005.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Nutrição e produtividade de grãos da aveia-preta em função da aplicação de calcário e gesso em superfície na implantação do sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 715–725, 2008a.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Métodos de determinação de cálcio e magnésio trocáveis e estimativa do calcário residual em um latossolo submetido a aplicação de calcário e gesso em superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 663–673, 2008b.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Atributos químicos do solo decorrentes da aplicação em superfície de calcário e gesso em sistema plantio direto recém-implantado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 675–688, 2008c.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Dolomite and phosphogypsum surface application effects on annual crops nutrition and yield. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 2, p. 261–270, 2008d.

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Produção de fitomassa e acúmulo de nutrientes pela aveia-preta em função da aplicação de calcário e gesso em superfície na implantação do sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, n. 4, p. 928–935, ago. 2008e. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782008000400004&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt>.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. A. **Uso do gesso agrícola nos solos dos cerrados** Planaltina, 1996. .

STEVENSON, F. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. New York: Wiley, 1994.

SUMNER, M. E. Amelioration of subsoil acidity with minimum disturbance. In: JAYAWARDANE, N. S.; STEWART, B. A. (Ed.). **Subsoil management techniques**. [s.l.: s.n.]p. 147–185.

SUMNER, M. E.; SHAHANDEH, H.; BOUTON, J.; HAMMEL, J. Amelioration of an acid soil prolife through deep liming an surface application of gypsum. **Soil Science Society American Journal**, v. 50, p. 1254–1278, 1986.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength-root penetration relations for medium- to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, n. 1, p. 18–22, 1966.

TEDESCO, J.; GIANELLO, C. Escolha do corretivo da acidez do solo. In: KAMINSKI, J. (Ed.). **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto (Boletim, 4)**. Pelotas, RS: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 96–113.

TIAN, S.; WANG, Y.; NING, T.; LI, N.; ZHAO, H.; WANG, B.; LI, Z.; CHI, S. Continued no-till and subsoiling improved soil organic carbon and soil aggregation levels. **Agronomy Journal**, v. 106, n. 1, p. 212–218, 2014. Disponível em:

<<https://www.agronomy.org/publications/aj/abstracts/106/1/212>>. Acesso em: 10 set. 2014.

TIRADO-CORBALÁ, R.; SLATER, B. K.; DICK, W. A.; BIGHAM, J.; MCCOY, E. Hydrologic properties and leachate nutrient responses of soil columns collected from gypsum-treated fields. **Soil and Tillage Research**, v. 134, p. 232–240, 2013.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. **Soil fertility and fertilizers**. 3. ed. New York: McMillan, 1984.

TISDALL, J.; OADES, J. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v. 33, n. 2, p. 141–163, 1982. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x/full>>.

VAN RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001.

VIEIRA, F. C. B.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; HE, Z. L. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. **Soil and Tillage Research**, v. 96, n. 1-2, p. 195–204, out. 2007. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0167198707001110>>. Acesso em: 29 jul. 2014.

WEBER, O. L. D. S.; CHITOLINA, J. C.; ANTONIO DE CAMARGO, O.; ALLEONI, L. R. F. Cargas elétricas estruturais e variáveis de solos tropicais altamente intemperizados. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 29, n. 6, p. 867–873, 2005.

WUTKE, E. B.; BULISANI, E. A.; MASCARENHAS, H. A. A. **Curso de adubação verde no instituto agrônômico**. Campinas, SP: Instituto Agrônômico, 1993.

YAO, H.; BOWMAN, D.; RUFTY, T.; SHI, W. Interactions between N fertilization, grass clipping addition and pH in turf ecosystems: Implications for soil enzyme activities and organic matter decomposition. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 7, p. 1425–1432, jul. 2009. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S003807170900128X>>. Acesso em: 21 ago. 2014.

ZHANG, X. C.; NORTON, L. D. Effect of exchangeable Mg on saturated hydraulic conductivity, disaggregation and clay dispersion of disturbed soils. **Journal of Hydrology**, v. 260, n. 1-4, p. 194–205, 2002.

ZIGLIO, C. M.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. a. Formas orgânicas e inorgânicas de mobilização do cálcio no solo. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 42, n. 2, p. 257–262, 1999.