

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

**QUALIDADE FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO EM FUNÇÃO DO  
SISTEMA DE PRODUÇÃO E DA APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE  
SILICATO E CALCÁRIO EM EXPERIMENTO DE LONGA  
DURAÇÃO**

**JAYME FERRARI NETO**

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

BOTUCATU – SP  
Março de 2016

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

**QUALIDADE FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO EM FUNÇÃO DO  
SISTEMA DE PRODUÇÃO E DA APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE  
SILICATO E CALCÁRIO EM EXPERIMENTO DE LONGA  
DURAÇÃO**

**JAYME FERRARI NETO**

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Costa Crusciol

Co-orientador: Prof. Dr. Ciro Antonio Rosolem

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

BOTUCATU – SP  
Março de 2016

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

F375q Ferrari Neto, Jayme, 1985-  
Qualidade física e química do solo em função do sistema de produção e da aplicação superficial de silicato e calcário em experimento de longa duração / Jayme Ferrari Neto. - Botucatu : [s.n.], 2016  
xiv, 184 f. : fots. color., grafs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2016  
Orientador: Carlos Alexandre Costa Crusciol  
Coorientador: Ciro Antonio Rosolem  
Inclui bibliografia

1. Cultivos agrícolas. 2. Plantio direto. 3. Solo - Acidez. 4. Solo - Correção. 5. Carbono. I. Crusciol, Carlos Alexandre Costa. II. Rosolem, Ciro Antonio. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. IV. Título.



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: QUALIDADE FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO EM FUNÇÃO DO SISTEMA DE PRODUÇÃO E DA APLICAÇÃO SUPERFICIAL DE SILICATO E CALCÁRIO EM EXPERIMENTO DE LONGA DURAÇÃO

AUTOR: JAYME FERRARI NETO

ORIENTADOR: CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

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. JULIANO CARLOS CALONEGO  
Dep de Produção e Melhoramento Vegetal / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES  
Dep Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

Prof. Dr. MUNIR MAUAD  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

Prof. Dr. GUSTAVO SPADOTTI AMARAL CASTRO  
EMBRAPA - Amapá

Botucatu, 18 de março de 2016.

*Aos meus queridos pais, Jayme Ferrari  
Junior e Aparecida Odiléia de S. Ferrari  
Às minhas irmãs Ana Carolina Ferrari e  
Adriana Cristina Ferrari*

**DEDICO**

*À minha noiva Lívia,  
E aos meus amigos do coração*

**OFEREÇO**

*“Sejam alegres na esperança, pacientes na  
tribulação e perseverantes na oração.”*

**(Rm 12, 12)**

## AGRADECIMENTOS

A Deus.

A Nossa Senhora Aparecida pela intercessão junto a Deus.

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

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

Ao Prof. Dr. Alan Franzluebbbers, da Universidade Estadual da Carolina do Norte – Raleigh (EUA), pela oportunidade, colaboração e ensinamentos durante o estágio no exterior, e acima de tudo, à amizade, e também às suas técnicas, Ellen Leonard e Erin Silva, que me ajudaram muito nas análises realizadas, à elas meu respeito, consideração, admiração e amizade.

Aos grandes amigos que fiz durante o período que passei em Raleigh-Carolina do Norte: Carolina Mata Machado, Wedisson Santos, Carolina Benjamin, Luciano Gattiboni, sua esposa Marisa e seu filho Eduardo, Michael Hukulak, Caroline Rodrigues, Rodolfo Vieira, Thays Quadros, Dircélio Nascimento, Oswaldo Medina, Wilmer Javier Pacheco, Kristie Yamamoto, Petra Chang, Liliane Borsatti, Bruna Line, Leonardo Deiss, Thays Schneider, Naiana Manzke, Ana Sevarolli Loftus, Ashty Mizelle, Mary “Molly” Pershing, Janet “Janny” Chappell, Alceu Assmann, Tangriani Assmann, Sarah Lyons, Anthea Saez, Juan Calviño, Juliana Silva, Christiane Martins, Sheila Santos, Mariana Mesquita, Andrew Whitaker, Elizabeth “Liz” Gillispie, Shelby, Adam Shelton, Fatemeh, Ling OU, Angel Cruz e Sean.

À Universidade Estadual da Carolina do Norte, pela oportunidade e suporte para realização do estágio no exterior.

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

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pela concessão da bolsa de estudos (no país Processo FAPESP nº 2011/10566-6 e no exterior Processo FAPESP nº 2013/18594-4).

Aos membros da banca examinadora, Dr. Gustavo Spadotti Amaral Castro, Prof. Dr. Munir Mauad, Prof. Dr. Juliano Carlos Calonego e Prof. Dr. Dirceu Maximino

Fernandes pela disponibilidade, atenção, correções, sugestões e críticas construtivas que contribuíram muito para o resultado final desta tese.

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

À Matsuda, unidade de Presidente Prudente-SP, representada pelo Engenheiro Agrônomo Pedro Henrique Lopes Lourençoni, pela concessão das sementes da forrageira semeada em 2013.

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 amigos da pós graduação: Fábio Rafael Echer, Rodrigo Foltran, Rodrigo Garcia, Edemar Moro, Francisco Rafael da Silva Pereira, Juliana Campana, Breno Kennedy, Ewerton Gasparetto, Antonio Carlos Carmeis Filho, Jader Nantes, Jorge Martinelli, Bruno C Aires, Letusa Momesso, Katiuça Sueko, Ariani Garcia, Renata Marques, Maurício Mancuso, Samuel Fioreze, Gustavo Castoldi, Laércio e Laerte Pivetta, Danielle Scudelleti, Otavio Bagiotto Rossato, Cleiton Alves, Murilo de Souza, João Paulo Rigon, Silvia Capuani, Danilo Almeida, Rubiana, Renake, Denise Basso, Bruna Luiza de Souza, Camila T Aquino, Fabiany Lilianny, Leticia Moreno, Lucas Perim, Tiara Guimarães, Natalia Corniani e Gabriela Ferraz pelo companheirismo de sempre.

A todos os amigos da agronomia turma XL, em especial a André Alencar Giorgetti, André Godoy da Silva, Hermelindo Giacon Neto, Bianca Franco Schrepel, Pamela Stuani, Vanessa Van Mellis, Hélio Makoto Umemura, Johnny Oliveira, Rodrigo Félix, Monique Medeiros e Alexandre Barreiro.

Aos queridos amigos da turma XLI da agronomia: Rodrigo Werle, Marcella Menegale, Samuel Zoca e da turma XLVI: Jéssica Danila Silva, Aline Retz e Débora Pantojo de Souza.

Aos queridos Matheus Gabriel Palhano e Aline Coelho Frasca que iniciaram essa empreitada como estagiários e hoje são pós graduandos, eu agradeço a colaboração, profissionalismo e entusiasmo que demonstraram e também a amizade e aos momentos de descontração que tivemos.

A João Arthur Antonangelo pela parceria realizada e por sua amizade.

Aos ex-estagiários Felipe de Andrade Faleco, Gabriela R. Roque, Daniele D. Becero, Dênis E. Bôa, Lucas A. Rozas, Luiz E. Ricardo, Manoela C. Oliveira, Mariana Damha, Rafael Soares, Tamires E. Ferreira, e Yuri Kacuta, pela essencial ajuda na condução deste trabalho e pela amizade.

Aos meus amigos Gustavo S. A. Castro e Claudio Hideo Martins da Costa pelos anos de boa convivência e pela parceria em diversas experimentações desde a graduação.

Aos amigos de Botucatu-SP, Italo Farias Noesse, Felipe Alves, Gabriel Canavarro, Tiago Donini, Hermes Moreira Junior, Giórgia Bonini, Diego Acerra Calani, Júlio e Nando Bull pela descontração nas horas de descanso e apoio nos momentos difíceis, fundamentais para a conclusão desta tarefa.

À minha noiva Lívia, por seu amor, incentivo, companheirismo, estando sempre ao meu lado nos bons e maus momentos. À família da minha noiva a qual considero como minha família também.

Aos meus pais e irmãs, pelo amor incondicional e apoio em todos os momentos, vocês foram meu maior incentivo para vencer os desafios que apareceram em minha vida. Também ao meu cunhado Rodrigo Acerra Calani por sua amizade e companheirismo de longa data.

Gostaria de deixar os meus votos de sincera gratidão a todos os que me ajudaram a superar um pequeno problema de saúde com orações, indicações de profissionais, conversas e conselhos. Seria impossível colocar o nome de todos e seria injusto se eu me esquecesse de alguém. Muito obrigado, terei vocês sempre em meu coração.

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

## SUMÁRIO

Lista de Tabelas .....	IX
Lista de Figuras .....	XII
1. RESUMO .....	1
2. SUMMARY .....	3
3. INTRODUÇÃO.....	5
4. Revisão de literatura .....	9
4.1. Sistema plantio direto .....	9
4.2. Correção da acidez do solo em SPD.....	10
4.3. Uso do silicato como corretivo da acidez do solo .....	17
4.3.1. O Silício.....	19
4.3.2. O Silício no solo .....	19
4.3.3. O Silício nas plantas .....	22
4.4. Rotação de culturas para regiões de inverno seco .....	24
4.5. Importância e dinâmica da matéria orgânica dos solos (MOS) .....	33
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	41
5.1. Localização e caracterização climática da área experimental.....	41
5.2. Histórico da área experimental .....	43
5.3. Delineamento experimental e tratamentos.....	44
5.4. Critérios para aplicação e características dos corretivos de acidez do solo.....	46
5.5. Condução do experimento .....	47
5.5.1. Culturas de verão – Safra.....	47
5.5.2. Cultura de safrinha.....	49
5.5.3. Adubos verdes .....	50
5.5.4. Forrageira perene - <i>Urochloa brizantha</i> .....	51
5.5.5. Pousio .....	52
5.6. Amostragens e avaliações realizadas .....	52
5.6.1. Atributos químicos do solo.....	52
5.6.2. Atributos físicos do solo .....	52
5.6.3. Quantidade acumulada de massa de matéria seca .....	54
5.6.4. Carbono e nitrogênio total e mineralizável, carbono da biomassa microbiana e fracionamento físico da matéria orgânica do solo – Universidade Estadual Da Carolina Do Norte – EUA. ....	55
5.6.5. Análises do C e N total, mineralizável, C da biomassa microbiana, fracionamento físico da matéria orgânica e estoque de C. ....	55
5.6.6. Produção de massa de matéria seca de parte aérea e diagnose de macronutrientes e Si das culturas .....	59
5.6.7. Componentes da produção e produtividade de grãos .....	60
5.7. Análise estatística .....	61
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	62
6.1. Matéria orgânica do solo.....	62
6.2. C e N total, mineralizável, carbono da biomassa microbiana (CBMS) e fracionamento físico da matéria orgânica do solo. ....	67
6.3. Características químicas do solo.....	79
6.3.1. Doze meses após a última aplicação dos corretivos.....	80
6.3.2. Vinte e quatro meses após a última aplicação dos corretivos.....	100
6.4. Atributos físicos do solo .....	118
6.5. Produção de massa de matéria seca de parte aérea, nutrição, componentes da produção e produtividade de grãos.....	125

6.5.1.	Ano agrícola 2011/2012 .....	125
6.5.2.	Ano Agrícola 2012/2013 .....	141
7.	Respostas às hipóteses .....	155
8.	CONCLUSÕES .....	157
9.	Referências Bibliográficas.....	159

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características químicas iniciais do solo avaliadas de 0 a 0,60m de profundidade em 2006. ....	42
Tabela 2. Caracterização granulométricas do solo da área experimental realizada em 2006. ....	42
Tabela 3. Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA) do solo por ocasião da caracterização da área experimental realizada em 2006. ....	42
Tabela 4. Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (Mic) e macroporosidade (Mac) do solo, por ocasião da caracterização da área experimental realizada em 2006. ....	42
Tabela 5. Esquema das rotações de culturas de 2006 a 2013 que compuseram os sistemas I (safra-forrageira), II (safra-safrinha), III (safra-adubo verde) e IV (safra-pousio). ....	44
Tabela 6. Valores da saturação por bases (V%) e capacidade de troca catiônica (CTC) na camada de 0 a 0,20 m do solo verificados em dezembro de 2010 nos 4 sistemas de produção estudados onde a correção da acidez do solo foi realizada em 2006 por meio da aplicação do calcário ....	46
Tabela 7. Quantidade de massa de matéria seca acumulada, em Mg ha <sup>-1</sup> , de 2006 a 2013, em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos da acidez do solo. ....	63
Tabela 8. Probabilidade dos valores de F referentes ao N e C mineralizáveis e carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS) nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade do solo em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos....	70
Tabela 9. N e C Mineralizáveis e C da biomassa microbiana (CBMS) nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade do solo. ....	71
Tabela 10. Probabilidade dos valores de F para nitrogênio total (NT), C orgânico total (COT), N particulado (NP), C orgânico particulado (COP), C associado aos minerais (COAM), relação C/N e labilidade da matéria orgânica (COP/COAM), nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos. ....	75
Tabela 11. Nitrogênio total (NT), C orgânico total (COT), C orgânico particulado (COP), N particulado e C orgânico associado aos minerais (COAM), nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos. ....	76
Tabela 12. Relação C/N e labilidade da matéria orgânica do solo (COP/COAM) nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos.....	77
Tabela 13. Desdobramento da interação dos sistemas de produção e corretivos da acidez do solo quanto à labilidade da matéria orgânica do solo COP/COAM na profundidade de 0 a 0,05 m. ....	78

Tabela 14. Estoques de carbono orgânico total (COT) nas camadas 0,00-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m do solo em função em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos. ....	79
Tabela 15. Probabilidade dos valores de F para densidade do solo (DS), micro (MIC), macro (MAC) e porosidade total do solo (PT), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade dos agregados (IEA) e resistência mecânica do solo à penetração (RP) nas profundidades de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos. ....	119
Tabela 16. Densidade (DS), micro (MIC), macro (MAC) e porosidade total do solo (PT) nas profundidades 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos. ....	120
Tabela 17. Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade dos agregados (IEA) e resistência mecânica do solo à penetração nas profundidades 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos. ....	121
Tabela 18. Teores foliares de macronutrientes e Si do feijão em função da aplicação dos corretivos da acidez do solo e dos sistemas de produção em sistema plantio direto. ....	126
Tabela 19. Produção de massa de matéria seca de parte aérea, componentes da produção e produtividade da cultura do feijão em função da aplicação dos corretivos da acidez do solo e dos sistemas de produção em sistema plantio direto. ....	129
Tabela 20. Teores foliares de macronutrientes e silício das plantas de trigo em função da aplicação dos corretivos da acidez do solo em sistema de plantio direto. ....	133
Tabela 21. Massa de matéria seca de parte aérea, componentes da produção e produtividade do trigo em função da aplicação dos corretivos da acidez do solo em sistema plantio direto. ....	134
Tabela 22. Teores de macronutrientes e silício da massa de matéria seca de parte aérea do milho por ocasião do 1o e 2o cortes, 52 e 130 DAE, respectivamente, em função da aplicação dos corretivos da acidez do solo em sistema plantio direto. ....	136
Tabela 23. Massa de matéria seca de parte aérea por ocasião do 1º e 2º cortes, 52 e 130 DAE, respectivamente, antes da dessecação aos 190 DAE, e massa de matéria seca de parte aérea total do milho em função da aplicação dos corretivos em sistema plantio direto. ....	138
Tabela 24. Teores de macronutrientes e silício da matéria seca da parte aérea da Urochloa brizantha antes do manejo com triturador de palha horizontal (130 DAE) em função da aplicação dos corretivos da acidez do solo em sistema plantio direto. ....	139
Tabela 25. Massa de matéria seca de parte aérea antes do manejo com triturador de palha horizontal (130 DAE) e antes da dessecação (190 DAE) e massa de matéria seca total da Urochloa brizantha em função da aplicação superficial de calcário e silicato. ....	140
Tabela 26. Teores de macronutrientes e Si foliares do arroz em função da aplicação dos corretivos e dos sistemas de produção em sistema plantio direto. ....	142
Tabela 27. Produção de massa de matéria seca de parte aérea, componentes da produção e produtividade da cultura do arroz em função da aplicação superficial de calcário e silicato e dos sistemas de produção em sistema plantio direto. ....	145

Tabela 28. Produção de massa de matéria seca de parte aérea e teores de macronutrientes e silício por ocasião do florescimento da crotalária em função da aplicação de calcário e silicato em sistema de plantio direto.....	149
Tabela 29. Teores de macronutrientes e silício da massa de matéria seca da parte aérea da Urochloa brizantha aos 110 DAE em função da aplicação de calcário e silicato em sistema de plantio direto. Botucatu, Estado de São Paulo, Brasil, 2013. ....	150
Tabela 30. Teores foliares de macronutrientes e silício do trigo em função da aplicação calcário e silicato em sistema de plantio direto. ....	152
Tabela 31. Massa de matéria seca de parte aérea, componentes da produção e produtividade do trigo em função da aplicação de calcário e silicato. ....	153

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Precipitação pluvial (■), temperaturas máxima (—) e mínima (—), registradas durante a condução do experimento, nos anos agrícolas de 2011/12 e 2012/13. .... 43
- Figura 2. Incubador (A), Amostras “branco” referente a cada caixa e termômetros dentro do incubador (B), Caixas com capacidade para armazenar 25 frascos de 1L cada dentro do incubador (C), Amostras de solo acondicionadas nos dessecadores (D) e amostras prontas para serem tituladas (E). .... 58
- Figura 3. Valores de matéria orgânica (M.O.) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos corretivos da acidez do solo. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD. .... 65
- Figura 4. Valores de matéria orgânica (M.O.) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 24 meses após a última aplicação dos corretivos da acidez do solo. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD. .... 66
- Figura 5. Valores do potencial hidrogeniônico (pH) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD. .... 81
- Figura 6. Valores de hidrogênio e alumínio (H + AL) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD. .... 82
- Figura 7. Valores de alumínio trocável (Al<sup>+3</sup>) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD. .... 85
- Figura 8. Valores de fósforo (P) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD. .... 87
- Figura 9. Valores de potássio (K) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. .... 90

Figura 10. Valores de cálcio (Ca) do solo em diferentes sistemas de produção (FORAGEIRA (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD..... 93

Figura 11. Valores de magnésio (Mg) do solo em diferentes sistemas de produção (FORAGEIRA (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD..... 94

Figura 12. Valores de silício (Si) do solo em diferentes sistemas de produção (FORAGEIRA (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD..... 95

Figura 13. Valores de saturação por bases (V%) do solo em diferentes sistemas de produção (FORAGEIRA (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD..... 97

Figura 14. Valores do potencial hidrogeniônico (pH) do solo em diferentes sistemas de produção (FORAGEIRA (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD..... 100

Figura 15. Valores de hidrogênio e alumínio (H + AL) do solo em diferentes sistemas de produção (FORAGEIRA (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD..... 102

Figura 16. Valores de alumínio trocável (Al<sup>+3</sup>) do solo em diferentes sistemas de produção (FORAGEIRA (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD..... 104

Figura 17. Valores de fósforo (P) do solo em diferentes sistemas de produção (FORAGEIRA (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD..... 106

Figura 18. Valores de potássio (K) do solo em diferentes sistemas de produção (FORAGEIRA (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD..... 109

Figura 19. Valores de cálcio (Ca) do solo em diferentes sistemas de produção (FORAGEIRA (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD..... 112

Figura 20. Valores de magnésio (Mg) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD. .... 113

Figura 21. Valores de silício (Si) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD. .... 114

Figura 22. Valores de saturação por bases (V%) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD. .... 115

## 1. RESUMO

A adoção do sistema plantio direto (SPD) foi um dos grandes avanços da agricultura brasileira, e, diversos sistemas de produção agrícola são empregados nesse sistema. Da mesma forma que no sistema convencional de manejo do solo, no SPD também existe a necessidade de aplicação de insumos, especialmente, materiais corretivos da acidez. Os objetivos foram avaliar a influência da aplicação superficial dos corretivos da acidez do solo e dos sistemas de produção nas características físicas e químicas, bem como nas frações da matéria orgânica do solo, nutrição e produtividade das culturas graníferas em região de inverno seco. Este projeto foi continuação de um experimento instalado no ano agrícola 2006/2007, na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP, localizada no município de Botucatu (SP), e foi conduzido durante os anos agrícolas 2011/2012 e 2012/2013. As parcelas foram constituídas por quatro sistemas de produção (I. Sistema “Safrã consorciada com Forrageira”; II. Sistema “Safrã – safrinha”; III. Sistema “Safrã – Pousio”; IV. Sistema “Safrã – Adubo Verde/Planta de Cobertura”) e as subparcelas por duas fontes de corretivos de acidez aplicados em outubro de 2006 e 2011, e o tratamento controle (I – Correção com calcário dolomítico; II – Correção com silicato de cálcio e magnésio; III – Sem correção). O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, no esquema de parcelas subdivididas, com quatro repetições. Foram realizadas as seguintes avaliações: as frações da matéria orgânica do solo (MOS) aos 24

meses após a última aplicação dos corretivos, os atributos químicos do solo aos 12 e 24 meses após a última aplicação dos corretivos, os atributos físicos do solo aos 24 meses após a última aplicação dos corretivos, teores de macronutrientes e silício e produção de massa de matéria seca de parte aérea em todas as culturas, componentes da produção e produtividade das culturas graníferas. O uso de espécies do gênero *Urochloa* em rotação com culturas graníferas aumenta os valores do C mineralizável, C da biomassa microbiana do solo (CBMS), C orgânico particulado (COP), C orgânico associado aos minerais (COAM) e do C orgânico total (COT) na camada de 0 a 0,05 m do solo. Quanto aos corretivos da acidez, aos 24 meses após a última aplicação dos corretivos, nota-se que há mais C mineralizável e CBMS na camada de 0 a 0,05 m do solo, por consequência da calagem. Quanto aos atributos químicos do solo, no período entre 12 e 24 meses após a última aplicação dos corretivos ocorre máxima reação dos corretivos da acidez no solo, aumentando a saturação por bases até a profundidade de 0,40 m. A reação do silicato é mais rápida que a reação do calcário, sendo o silicato mais eficiente que o calcário, principalmente, com relação à disponibilização de P, além de aumentar a concentração de Si no solo. O uso de forrageiras na rotação de culturas (sistema safra-forrageira) melhora a microporosidade na camada de 0 a 0,05 m de profundidade e a estabilidade dos agregados na camada de 0,10 a 0,20 m do solo. Com relação aos corretivos da acidez do solo, do mesmo modo que constatado para à MOS, não há efeito negativo da aplicação dos corretivos da acidez do solo nos atributos físicos do mesmo. As produtividades do feijão, arroz e do trigo cultivado na entressafra do primeiro ano agrícola são superiores por consequência da aplicação do silicato. As culturas do feijão e arroz são mais produtivas quando cultivadas sobre a fitomassa de forrageiras (sistema safra-forrageira). A produtividade do arroz quando cultivado após o trigo é baixa, não sendo indicada a sucessão de cultivos entre essas culturas.

**Palavras-chave:** sistema plantio direto, culturas anuais, correção da acidez do solo, carbono-orgânico.

**PHYSICAL AND CHEMICAL QUALITY OF THE SOIL AS A FUNCTION OF THE CROP SYSTEM AND SURFACE APPLICATION OF SILICATE AND LIME IN A LONG TERM EXPERIMENT Botucatu, 2016, p. 184.**

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

Author: Jayme Ferrari Neto

Adviser: Carlos Alexandre Costa Crusciol

Co-adviser: Ciro Antonio Rosolem

## **2. SUMMARY**

The adoption of the no-tillage system (NTS) was one of the great advances in Brazilian agriculture, and several crop systems are used in this system. As well as observed in conventional soil management in a NTS there is also the need for application of soil acidity amendments. The aims were to evaluate the influence of surface application of soil acidity amendments and crop systems in the physical and chemical attributes, as well as in the fractions of soil organic matter, nutrition and grain yield of the crops in dry winter region. The present study was conducted in 2011/2012 and 2012/2013 and it was a sequence of a long term study that had been conducted since 2006/2007 in the College of Agricultural Sciences – FCA/UNESP, in Botucatu-SP, Brazil. The experimental design was the complete randomized block with split plots and four replications. Main plots consisted of four cropping rotations (“Season-Forage”; “Season-off-season”; “Season-Fallow” and “Season-Green manure”) and subplots by two sources of soil acidity amendments (dolomitic lime, calcium/magnesium silicate) plus a control, with no soil acidity correction. The following evaluations were performed: soil organic matter (SOM) fractions at 24 months after the last application of soil acidity amendments, chemical soil properties at 12 and 24 months after the last application of soil acidity amendments, soil physical properties at 24 months after the last application of soil acidity amendments, macronutrients and silicon concentrations and shoot dry matter of all crops, yield components and grain yield of the cash crops. The use of *Urochloa spp* in rotation with cash crops increases the values of mineralizable C, soil microbial biomass C (CBMS),

particulate organic carbon (POC), organic carbon associated with minerals (COAM) and total organic carbon (TOC) in the 0 to 0.05 m from the ground. At 24 months after the last application of the soil acidity amendments there are more mineralizable C and CBMS in the 0 to 0,05 m from the ground, as a consequence of the superficial liming. Between 12 and 24 months after the last application of the soil acidity amendments occurs maximum reaction of lime and silicate, increasing the base saturation to a depth of 0.40 m. The silicate reaction is faster than lime reaction, being silicate more efficient than lime, particularly in increase P availability, besides increase the Si concentration in the soil. The use of the forage crop rotation (Season- forage system) improves microporosity in the 0 to 0.05 m depth and stability of aggregates in the 0.10 to 0.20 m depth. Regarding the soil acidity amendments, as well as observed for the MOS, there are not negative effect as a consequence of the application of soil acidity amendments in the soil physical attributes. The grain yield of common bean, rice and wheat grown in the off season of the first year are higher as a consequence of the application of silicate. The grain yields of common bean and rice are higher when grown on the straw of forage (Season - forage). The grain yield of rice when grown after wheat is low and is not recommended the succession between these crops.

**Keywords:** no tillage system, annual crops, correction of soil acidity, organic carbon.

### 3. INTRODUÇÃO

Os solos tropicais são caracterizados por serem ácidos, altamente intemperizados e de baixa fertilidade natural. Assim, um dos grandes avanços da agricultura brasileira foi a descoberta da correção da acidez do solo por meio da aplicação e posterior incorporação do calcário no solo por operações mecânicas como as arações e gradagens.

Outro grande avanço da agricultura nacional foi a adoção do sistema plantio direto (SPD) que trouxe consigo benefícios relacionados à manutenção de fitomassa vegetal sobre a superfície do solo, como a proteção do solo contra agentes erosivos, notadamente o impacto das águas das chuvas, a maior conservação de água no solo ao serem reduzidas as perdas de água pelo processo de evaporação bem como menores amplitudes térmicas nas camadas superficiais do solo que são favoráveis aos processos fisiológicos como a germinação das sementes e posterior crescimento das plantas, bem como a fixação biológica de nitrogênio por bactérias.

Ainda sobre os benefícios do SPD, na literatura existem relatos positivos quanto às propriedades químicas, físicas e biológicas do solo e também com relação ao estoque de carbono e às frações da matéria orgânica do mesmo, porém esses benefícios são mais difíceis de serem alcançados em regiões que possuem distribuição de chuvas irregular em determinado período do ano, como as regiões de inverno seco, pois muitas vezes não se consegue realizar um segundo cultivo durante o ano agrícola.

Nesse sentido, a maior limitação para a sustentabilidade do SPD em regiões de inverno seco, como na grande maioria do território do Estado de São Paulo e do Brasil Central, caracterizada pelo Bioma Cerrado, é a baixa produção de fitomassa no período de outono/inverno e inverno/primavera, devido às condições climáticas desfavoráveis, notadamente baixa disponibilidade hídrica e elevadas temperaturas. Assim, ocorre a rápida decomposição da fitomassa de plantas graníferas leguminosas e gramíneas cultivadas no verão, como soja, milho, arroz e feijão, havendo alta probabilidade de insucesso das culturas de safrinha. Logo, muitas áreas destas regiões ficam ociosas durante sete meses do ano e com baixa cobertura vegetal sobre o solo, comprometendo a viabilidade e sustentabilidade do sistema plantio direto.

Para minimizar este problema, os produtores estão optando pela integração de culturas como milho, soja, arroz, feijão e sorgo, com plantas forrageiras, notadamente as espécies do Gênero *Urochloa* (Syn. *Brachiaria*), semeadas concomitantemente ou em rotação, como forma de produção de forragem no período de menor disponibilidade nessa região, e, de fitomassa para o sistema plantio direto na safra seguinte. Trabalhos têm relatado vários efeitos benéficos do consórcio entre culturas graníferas e forrageiras perenes, como, reciclagem de nutrientes, maior estabilidade de agregados, maior aeração e retenção de água no solo, supressão de plantas daninhas, além do aumento do estoque de carbono total, do carbono contido nas frações lábeis ou até mesmo nas frações estáveis da matéria orgânica do solo, garantindo assim estabilidade ao sistema de produção.

Assim, como descrito para as forrageiras, os adubos verdes e ou plantas de cobertura, também são opções de culturas a serem semeadas no período de entressafra, visando melhorar as propriedades do solo. O cultivo da crotalária adiciona nitrogênio ao sistema por meio da fixação simbiótica, além disso, essa leguminosa é eficiente na supressão de nematóides, sendo essa última característica responsável pelo aumento do cultivo dessa espécie de adubo verde nas regiões produtoras de grãos do Cerrado.

O milheto é uma planta de cobertura eficaz na produção de massa de matéria seca, reciclagem de nutrientes, dentre outros, sendo apontado como uma das culturas responsáveis pela expansão do SPD na Região Central do Brasil. Essa planta de cobertura produz quantidade de fitomassa que pode ser superior a 14 Mg ha<sup>-1</sup>, cobre rapidamente a superfície do solo, sendo eficiente em competir com as plantas daninhas por

água, luz e nutrientes. Além disso, o milheto possui crescimento radicular vigoroso, que também pode promover melhorias nos atributos físicos do solo como aumentar a aeração e a retenção de água e também pode contribuir para reduzir a compactação. Dentro desse contexto, a utilização dos adubos verdes ou plantas de cobertura pode ser viabilizada semeando-os em sucessão à cultura granífera no final da estação chuvosa.

O cultivo de uma cultura granífera no período de entressafra é uma das formas de se evitar os períodos de pousio e também aumentar a renda do produtor rural. Nesse contexto, o cultivo do trigo na entressafra no bioma Cerrado deve ser incentivado pelos órgãos governamentais devido à importância da cultura para o Brasil e para o mundo, pois esse cereal de inverno está entre os principais produtos utilizados para a alimentação da população brasileira e mundial. Na região do Cerrado, o cultivo do cereal pode ser realizado sob regime de sequeiro ou irrigado, permitindo também a semeadura no período de entressafra no SPD.

No entanto, além da escolha das espécies vegetais que irão compor as rotações de culturas, a correção da acidez do solo deve ser feita, pois o não revolvimento do solo no SPD e o conseqüente acúmulo de resíduos vegetais e fertilizantes na superfície aceleram o processo de acidificação do solo.

A calagem é prática essencial para que sejam alcançados os tetos produtivos das culturas, tendo como benefício a neutralização da acidez do solo, o fornecimento de cálcio e magnésio, a redução da toxidez de alumínio, o aumento da disponibilidade de nutrientes e o aumento da saturação por bases do solo. Contudo, no SPD, a calagem é realizada mediante a aplicação do calcário na superfície do solo, sem incorporação. Porém, esse método de calagem ainda é bastante questionado, pois o calcário é um produto que apresenta baixa solubilidade em água.

Outro problema relacionado à aplicação de calcário em superfície, no sistema plantio direto, é a correção da acidez em subsuperfície, que limita, em muitos casos, o crescimento radicular e a absorção de água e nutrientes pelas plantas. Isso porque a reação lenta do calcário pode não corrigir a acidez e a deficiência de cálcio e magnésio e aumentar a disponibilidade de nutrientes e a saturação por bases em subsuperfície, em tempo hábil para evitar que o agricultor corra risco de não alcançar produtividades satisfatórias em razão da ocorrência de veranicos, além da possibilidade de ocorrer uma superdosagem do calcário nos primeiros centímetros do solo.

Os silicatos de cálcio e magnésio provenientes das escórias de siderurgia são materiais que se comportam de forma semelhante ao calcário, e geralmente são materiais mais solúveis que o calcário, podendo a aplicação superficial destes ser uma alternativa viável para correção da acidez e aumentar a disponibilidade de nutrientes e a saturação por bases do solo em profundidade e em menor tempo que o calcário, além de fornecer silício às plantas, elemento benéfico capaz de proteger as plantas, principalmente as gramíneas, contra estresses bióticos e abióticos e também aumentar sua eficiência fotossintética.

Outro ponto a ser considerado é o interesse em se identificar sistemas de produção que favoreçam não só o aporte de C, mas que promovam a estabilidade da matéria orgânica dos solos (MOS), para que sejam promovidas as melhorias nos atributos químicos do solo, como o aumento da CTC, nos atributos físicos, como o aumento da macro, micro e porosidade total do solo, além de aumentar o estoque de C dos solos tropicais.

No entanto, pesquisas sobre a dinâmica da correção da acidez do solo nos diferentes sistemas de produção agrícola por meio da aplicação superficial do calcário e silicato em SPD, em experimentações de longa duração, são escassas, mas são extremamente importantes para que se possa conhecer a influência dos corretivos nas frações da MOS, nas características físicas e químicas do solo dos diferentes sistemas de produção, bem como na nutrição e produtividade das culturas graníferas em região de inverno seco.

Assim, o presente trabalho possui as seguintes hipóteses: 1- O silicato de cálcio e magnésio corrige mais rapidamente a acidez do perfil do solo que o calcário no sistema plantio direto. 2 – O sistema safra consorciada com forrageira promove as melhores condições edáficas, por consequência da inserção de forrageiras no sistema de produção. 3 – As produtividades das culturas de verão são maiores no sistema safra consorciada com forrageira. 4 – As produtividades das culturas graníferas são superiores quando a correção da acidez do solo é feita por meio da aplicação superficial do silicato, comparativamente, à calagem superficial.

Dessa forma, os objetivos do trabalho foram avaliar a influência da aplicação superficial dos corretivos da acidez do solo e dos sistemas de produção nas características físicas e químicas, bem como nas frações da matéria orgânica do solo, nutrição e produtividade das culturas graníferas em região de inverno seco.

## **4. REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1. Sistema plantio direto**

A introdução do SPD, a partir da década de 70 no sul do Brasil, foi um dos maiores avanços no processo produtivo da agricultura brasileira (LOPES et al., 2004; GARCIA et al., 2013). Desde então, a área cultivada sob esse sistema aumentou de forma exponencial, e recentemente ocupou aproximadamente 27 milhões de hectares (CAIRES, 2013).

O Cerrado é o bioma predominante do Brasil central, e abrange cerca de 205 milhões de hectares. A maioria dos solos dessa região são Latossolos (46%) caracterizados por serem solos altamente intemperizados, profundos, de baixa fertilidade natural, alta saturação de alumínio, e alta fixação de P (FAGERIA; BALIGARD, 2008). Embora de baixa fertilidade natural, estas áreas possuem topografia favorável para agricultura e temperaturas adequadas para o crescimento das plantas durante todo o ano. A introdução do sistema plantio direto foi um dos fatores que tornou possível a exploração contínua e racional do Cerrado, trazendo incrementos na produção agrícola nacional, elevando a produtividade e a competitividade de nossos produtos.

O SPD tem se destacado como uma das estratégias mais eficientes para melhorar a sustentabilidade do sistema agrícola em regiões de clima tropical e subtropical, reduzindo as perdas de solo e nutrientes por erosão (HOBBS et al, 2008), e a expansão de áreas sobre SPD ocorre de maneira mais rápida na América do Sul, onde

países como Argentina, Brasil, Paraguai e Uruguai utilizam este sistema em aproximadamente 70% do total de sua área agricultável (DERPSCH; FRIENDRICH, 2009).

A adequada utilização do SPD preconiza o não revolvimento do solo, exceto nos sulcos de semeadura (AMARAL et al., 2004a) e a manutenção dos restos culturais sobre a superfície do solo, resultando na proteção contra o impacto das gotas da chuva, o que favorece a infiltração, reduz as perdas de água por escoamento superficial e de solo e nutrientes por erosão, e diminui a amplitude térmica do solo ao longo do dia (HERNANI et al., 1999).

Como os solos tropicais brasileiros são ácidos, há a necessidade de estudos relacionados à correção da acidez do solo no SPD, por meio da aplicação superficial de corretivos da acidez do solo (CASTRO, 2012).

#### **4.2. Correção da acidez do solo em SPD**

A acidez do solo é um dos fatores que mais limitam a produtividade das culturas. Cerca de 17% da África, 6% da Austrália e Nova Zelândia, 10% da Europa, 26% da Ásia e 41% da América possuem solos ácidos (VON UEXKULL; MUTERT, 1995). Estas áreas ácidas representam parte significativa de pelo menos 48 países em desenvolvimento localizados principalmente em áreas tropicais, sendo mais freqüentes em Latossolos e Argissolos na América do Sul e em Latossolos africanos (NARRO et al., 2001).

Na América do Sul, 85% dos solos são ácidos, e aproximadamente 850 milhões de hectares desta área não são devidamente aproveitados (FAGERIA; BALIGAR, 2008). O cerrado brasileiro, principal região produtora de grãos do país, possui 205 milhões de hectares, sendo a maioria dos solos desta região representados por Latossolos (46%), Argissolos (15%) e Neossolos (15%), solos estes caracterizados por possuírem baixa fertilidade natural, deficiência em Ca e Mg, alta saturação por alumínio e alta capacidade de fixação do P (FAGERIA; STONE, 1999).

Apesar dessas características negativas, quando as limitações químicas são eliminadas pela aplicação de corretivos da acidez do solo e utilização de adequadas quantidades de fertilizantes, as produtividades das culturas obtidas nesses solos situam-se entre as maiores do mundo (SANCHEZ; SALINAS, 1981).

No entanto, a não movimentação promove modificações químicas no solo em função do acúmulo de resíduos vegetais, corretivos e fertilizantes na sua superfície e, segundo Rheinheimer et al. (1998), 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.

A calagem é prática usual na correção da acidez do solo e por consequência de sua reação no solo os valores do pH e a saturação por bases são elevados, as concentrações de Ca e Mg aumentam e as concentrações do Al diminuem, alterando a disponibilidade de nutrientes para as plantas (MIRANDA; MIRANDA, 2000).

Além do calcário, outros materiais podem ser utilizados como corretivos de acidez, desde que contenham um “constituente neutralizante” ou “princípio ativo”, óxidos, hidróxidos, carbonatos e silicatos de cálcio e/ou magnésio (ALCARDE, 1985).

Os silicatos de cálcio e magnésio são semelhantes aos carbonatos em sua composição, portanto, estas fontes podem substituir, e com vantagens, o calcário (CARVALHO-PUPATTO et al., 2004; RAMOS et al., 2006). Devido à semelhança entre os corretivos, a recomendação de aplicação dos silicatos pode ser baseada em qualquer um dos métodos utilizados para recomendação de calagem. Segundo Alcarde e Rodela (2003) o silicato de cálcio é 6,78 vezes mais solúvel que o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3 = 0,014 \text{ g dm}^{-3}$ ;  $\text{CaSiO}_3 = 0,095 \text{ g dm}^{-3}$ ), sendo uma boa opção para aplicação superficial no SPD (CARVALHO-PUPATTO et al., 2004).

Castro e Crusciol (2013ab) obtiveram resultados positivos com o uso de ambas as fontes de correção da acidez do solo em SPD, os autores observaram aos 6 meses após a aplicação dos corretivos, silicato e calcário, aumento dos valores de pH, Ca, Mg e V% e decréscimo das concentrações de Al e H+Al até 0,10 m de profundidade, e aos 18 meses após a aplicação dos corretivos esses efeitos foram observados até 0,40 m, sendo verificada menor concentração de Al na profundidade de 0,20 a 0,40 m por consequência da silicatagem em relação à calagem. Com relação ao P os efeitos ficaram restritos às camadas superficiais do solo, pois aos 6 meses após a aplicação dos corretivos houve aumento da concentração desse elemento até 0,05 m do perfil do solo, sendo esse aumento maior em função da silicatagem, e, aos 18 meses a concentração de P aumentou até 0,10 m de profundidade, não havendo diferenças quanto as fontes dos corretivos da acidez aplicados.

Os materiais corretivos utilizados são pouco solúveis e os produtos da reação do calcário têm mobilidade limitada, a ação da calagem superficial normalmente fica restrita às camadas superficiais do solo, conforme observado por Ritchey et al. (1982), Caires et al. (1998), Alleoni et al. (2005) e Caires et al. (2006), porém alguns pesquisadores têm demonstrado que os benefícios acima citados podem ocorrer também na subsuperfície do solo (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; CAIRES et al., 1999; RHEINHEIMER et al., 2000; FRANCHINI et al., 2000; CAIRES et al., 2011; CASTRO; CRUSCIOL, 2013ab).

A amenização da acidez abaixo da camada de deposição do corretivo da acidez do solo só ocorre quando o pH na zona de dissolução do calcário atinge valores da ordem de 5,0 a 5,6 (RHEINHEIMER et al., 2000; CAIRES et al., 2005).

Conforme relatado por Caires (2013), nos solos ácidos com cargas variáveis a calagem superficial normalmente não tem efeito rápido na redução da acidez das camadas subsuperficiais do solo. No entanto, ao longo dos anos os efeitos nocivos da acidez das camadas mais profundas do solo podem ser amenizados. Assim, em função do tempo após a aplicação superficial do calcário, vai ocorrendo a correção da acidez da superfície em direção às camadas mais profundas do solo.

Mello et al. (2003) destacaram que em apenas 12 meses, os atributos químicos do solo (pH, H+Al, Ca e Mg) podem ser alterados positivamente, na camada de 0 a 0,10 m em função da aplicação superficial do calcário. Soratto e Crusciol (2008), observando os resultados da aplicação superficial de doses de calcário ao longo de 18 meses, observaram a elevação dos teores de Ca e Mg nas camadas de 0 a 0,05 m e 0,05 a 0,10 m nos primeiros 6 meses e até a camada de 0,20 a 0,40 m aos 12 e 18 meses após a aplicação inicial do corretivo. O mesmo foi observado por Marcolan e Anghinoni (2003), porém segundo os autores, isto só ocorre em SPD consolidado (8 – 12 anos de SPD). Nestas condições, Caires et al. (2011) observaram elevação do pH do solo até a profundidade de 0,60 m, 8 anos após a aplicação do calcário.

Caires et al. (2008) demonstraram que a reaplicação superficial de calcário em solo já corrigido por meio da calagem superficial pode facilitar a movimentação dos produtos da reação do calcário para as camadas subsuperficiais, proporcionando melhorias ainda mais acentuadas na acidez do perfil do solo. Nesse estudo, os autores relataram que quando foi aplicado superficialmente 3 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário a aproximadamente 7 anos após a primeira aplicação de 6 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário, foram

observados os mais baixos níveis de  $Al^{3+}$  trocável e de saturação por  $Al^{3+}$  até a profundidade de 0,60 m do perfil do solo.

Os mecanismos que podem estar envolvidos na melhoria das condições de acidez em subsuperfície por meio da aplicação superficial de corretivos em SPD são o deslocamento vertical das partículas finas do corretivo decorrentes de condições favoráveis de estruturação do solo, mobilização química dos corretivos em formas inorgânicas, principalmente sais de nitrato e sulfato, e orgânicas.

O deslocamento físico das partículas do corretivo através de canais formados por raízes mortas, mantidos intactos em razão da ausência de revolvimento do solo é relatado por diversos autores (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; PETRERE; ANGHINONI, 2001; AMARAL et al., 2004b). Também ocorre a formação de planos de fraqueza no solo que permitem o deslocamento físico das partículas finas dos corretivos da acidez do solo através do movimento descendente da água (PETRERE; ANGHINONI, 2001; AMARAL et al., 2004b).

Conforme relatado por 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 indício de que não deve ocorrer acentuado deslocamento físico do calcário, devendo a elevação do pH nas camadas subsuperficiais do solo ser atribuída a outros mecanismos. Dessa forma, a maior parte do efeito da calagem em profundidade é devido à movimentação de íons (TEDESCO; GIANELLO, 2000). Assim, a água que infiltra no solo, normalmente está enriquecida com os produtos da dissolução do calcário, responsáveis pela neutralização da acidez e aumento dos cátions de reação básica, permitindo as melhorias das condições da acidez em subsuperfície (RHEINHEIMER et al., 2000).

Pode ocorrer também, o arrasto das partículas dos corretivos pela água de infiltração 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, dentre outros).

A incorporação biológica do corretivo da acidez pela ação dos microorganismos também pode ocorrer, pois corresponde a mais de 95% da decomposição ocorrida no solo, sendo que os outros 5% da fauna participam com o rearranjo dos detritos e sua desintegração, podendo haver assim a incorporação dos restos vegetais da superfície juntamente com o corretivo aplicado (HOLTZ; SÁ, 1995).

A pequena mobilização do solo que ocorre na linha de semeadura em 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).

Dentro desse contexto, conforme relatado por Tedesco e Gianello (2000), a maior parte do efeito da calagem em profundidade é devido à movimentação de íons. Nesse mecanismo, a dissolução do calcário em solos ácidos, promove a liberação dos ânions  $\text{OH}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$ , que reagem com os cátions de reações ácidas da solução do solo  $\text{H}^+$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ , ocorrendo, posteriormente, a formação e a migração de  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  e  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$  para as camadas subsuperficiais do solo (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; RHEINHEIMER et al., 2000).

Costa (2000), em estudos com calagem superficial em SPD, verificou aumento nos teores de Mg na solução do solo, em todo o perfil do solo, indicando 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, cálcio e magnésio facilitando o seu movimento no perfil do solo. Quando o pH da solução do solo alcança valores superiores a 5,5, a espécie  $\text{HCO}_3^-$  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 et al., 1979). Nessas condições, o  $\text{HCO}_3^-$  pode migrar com o  $\text{Ca}^{2+}$  e o  $\text{Mg}^{2+}$ , corrigindo a acidez do solo além do local de aplicação do calcário (OLIVEIRA; PAVAN, 1996). Entretanto, enquanto existir cátions ácidos na camada superficial a reação de neutralização da acidez ficará limitada à essa camada, não havendo o efeito nas camadas subsuperficiais do solo (RHEINHEIMER et al., 2000).

A eficiência da calagem superficial sobre a elevação do pH, movimentação de bases trocáveis e redução da acidez potencial ( $\text{H}+\text{Al}$ ), nas camadas subsuperficiais, tem sido associada por alguns autores ao manejo de resíduos orgânicos (MIYAZAWA et al., 1996; OLIVEIRA; PAVAN, 1996; FRANCHINI et al., 2001; MEDA et al., 2001; MEDA et al., 2002; MIYAZAWA et al., 2000; MIYAZAWA et al., 2002; ZIGLIO et al., 1999). Segundo Caires et al. (2000) e 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 et al., 2004a).

De acordo com Miyazawa et al. (1996) e Franchini et al. (2001), o provável mecanismo de lixiviação de bases trocáveis em áreas de SPD 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 dos solos. Na camada superficial do solo, os ligantes orgânicos complexam o  $\text{Ca}^{2+}$  e o  $\text{Mg}^{2+}$  trocáveis, formando um composto estável ou com carga negativa, o que facilita sua mobilidade no solo (MIYAZAWA et al., 2000). Na camada subsuperficial, o  $\text{Ca}^{2+}$  e o  $\text{Mg}^{2+}$  dos complexos Ca- ligante orgânico e Mg-ligante orgânico são deslocados pelo alumínio trocável do solo, porque os íons  $\text{Al}^{3+}$  formam complexos mais estáveis que o  $\text{Ca}^{2+}$  e o  $\text{Mg}^{2+}$ , diminuindo a acidez trocável e aumentando o cálcio trocável (CAIRES et al., 1998).

O efeito do resíduo vegetal na mobilidade dos produtos da dissolução do calcário no solo varia com a espécie de planta, com as variedades de uma mesma espécie e com o estágio em que a planta é manejada (MEDA et al., 2002; FRANCHINI et al., 2003). Além disso, os resíduos produzidos pelas plantas de cobertura são mais eficientes do que os de culturas comerciais obtidos após a colheita de grãos (FRANCHINI et al., 1999ab; 2003; MEDA et al., 2001; MIYAZAWA et al., 2002).

Franchini et al. (2003) avaliando a composição orgânica da fração solúvel de resíduos vegetais observaram que a capacidade desses materiais na mobilização de cátions em solos ácidos estava relacionada com o teor de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, tais como: cítrico, málico, t-aconítico entre outros, cuja presença na planta está diretamente relacionada com a atividade metabólica e conseqüentemente com seu estágio de desenvolvimento, o que os torna mais abundantes nos resíduos manejados em seu pleno crescimento vegetativo ou início do florescimento, situação comum em plantas de cobertura.

Franchini et al. (2001) verificaram que a presença de compostos orgânicos hidrossolúveis de baixo peso molecular favoreceu o deslocamento do calcário no perfil do solo até os 0,20 m, enquanto que a ausência dos mesmos proporcionou correção da acidez do solo apenas nos 0,05 m iniciais.

Os efeitos dos compostos orgânicos solúveis presentes nas plantas de cobertura sobre a química dos solos ácidos são de curto prazo (MIYAZAWA et al., 1993) e não condizem aos efeitos de longo prazo relacionados à dinâmica da matéria orgânica do solo (FRANCHINI et al., 2004). Além disso, o cultivo de leguminosas na rotação de culturas com as plantas de cobertura e ou a adubação com fontes inorgânicas de N podem causar acidificação do solo com o tempo, e anular o efeito das plantas de cobertura na neutralização da acidez do solo (CAIRES, 2013). Contudo, estudos sobre esse assunto precisam ser realizados em campo em experimentos de longa duração.

Ainda segundo Caires (2013), a melhoria das condições de acidez nas camadas subsuperficiais do solo em função da calagem superficial tem ocorrido com maior frequência em solos com elevado teor de matéria orgânica, há longo período em SPD.

Outro aspecto interessante sobre a correção da acidez do solo no SPD é que tem sido observada menor toxicidade do  $Al^{3+}$  nesse sistema. Concentrações de  $Al^{3+}$  trocável consideradas tóxicas em solos ácidos não tem causado restrição ao crescimento de raízes de soja e milho (CAIRES et al., 2001; 2004), na ausência de limitação hídrica em SPD. Esses efeitos têm sido relacionados com a menor concentração de espécies tóxicas como o  $Al^{3+}$  e  $AlOH^{2+}$  e maior concentração de Al complexado com ligantes orgânicos.

A complexação do Al com ligantes orgânicos no SPD tem ocorrido predominantemente com ácidos orgânicos de alto peso molecular (ALLEONI et al., 2010).

A menor fitotoxicidade do Al também pode ser consequência dos maiores teores de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  trocáveis dos solos manejados em SPD, devido à mais alta CTC a pH 7,0 oriunda do maior aporte de matéria orgânica. Em solos ácidos manejados em plantio direto, os teores de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  trocáveis muitas vezes são suficientes para atender à demanda das culturas (CAIRES et al., 1998; 1999).

O maior teor de matéria orgânica e a maior concentração de nutrientes na superfície do solo sob plantio direto podem alterar a dinâmica do Al em solução (CAIRES, 2013). Essas duas características reduzem a atividade do Al e o seu potencial químico pela formação de complexos de Al ligados à matéria orgânica e pela maior força iônica da solução do solo (SALET et al., 1999).

A maior umidade que ocorre nas camadas superficiais do solo, em razão da cobertura vegetal que reduz as perdas de água por evaporação, pode proporcionar

adequada absorção de nutrientes pelas plantas mesmo em condições de elevada acidez (CAIRES; FONSECA, 2000).

Contudo, o fato da toxicidade do alumínio ser menor em SPD não significa que devem ser aplicadas menores quantidades dos corretivos da acidez do solo, pois em condições de déficit hídrico, o crescimento radicular, a absorção de nutrientes e a produtividade das culturas serão afetados negativamente, conforme Caires et al. (2008b) observaram na cultura do trigo.

Além de tudo o que foi relatado na presente revisão, o poder tampão do solo e a qualidade do corretivo da acidez aplicado também influenciarão na reação do corretivo da acidez no solo.

O tamponamento também afeta a profundidade de atuação das reações de correção do solo provocadas pela calagem (ERNANI et al., 2001). O poder tampão de um solo está ligado à sua capacidade de resistir às aplicações de ácidos ou bases, sem sofrer grandes alterações em seu 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, et al. 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 em comparação a um solo de textura argilosa.

A qualidade do corretivo utilizado também pode ter influência na velocidade de correção da acidez do solo. De modo geral, quanto menor a granulometria do corretivo, mais rápida é a sua reação no solo (GONÇALVES et al., 2011). No entanto, a velocidade de reação e o efeito residual do corretivo são grandezas inversas. Contudo, são necessários estudos a respeito da velocidade de correção bem como do efeito residual dos corretivos da acidez do solo em SPD.

### **4.3. Uso do silicato como corretivo da acidez do solo**

Segundo Alcarde (1985), além do calcário, outros materiais podem ser utilizados como corretivos da acidez do solo, desde que contenham um “constituente neutralizante” ou “princípio ativo” como os óxidos, hidróxidos, carbonatos e silicatos de

cálcio e/ou magnésio. Os silicatos de Ca e Mg, por possuírem composição semelhante aos carbonatos, podem substituir o calcário e com vantagens (CORREA et al., 2007), podendo sua recomendação de aplicação ser baseada em qualquer um dos métodos utilizados para recomendação de calagem.

Uma das vantagens é que o silicato de cálcio é 6,78 vezes mais solúvel que o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3 = 0,014 \text{ g dm}^{-3}$ ;  $\text{CaSiO}_3 = 0,095 \text{ g dm}^{-3}$ ) (ALCARDE; RODELA, 2003), sendo uma boa opção para aplicação superficial no SPD (CARVALHO-PUPATTO et al., 2004).

Um grande número de materiais que possuem o silicato em sua constituição podem ser utilizados para a correção da acidez dos solos como escórias de siderurgia, wollastonita, metassilicato de cálcio, silicato de potássio, silicato de cálcio e silicato de magnésio (PRADO; FERNANDES, 2001; CASTRO, 2009), esses materiais promovem a elevação do pH, dos teores de cálcio e de magnésio trocáveis, da CTC e da saturação por bases dos solos, aumentam a disponibilidade de fósforo e silício e reduzem a toxidez de ferro, manganês e alumínio (CASTRO; CRUSCIOL, 2013ab, PRADO; FERNANDES, 2003; KORNDORFER et al., 2002; PULZ et al., 2008).

Outras vantagens são referentes ao fornecimento de Si para as culturas, pois apesar do silício não ser considerado nutriente, Barbosa Filho et al. (2000) e Korndörfer et al. (2002) relataram que as gramíneas como um todo, quando bem nutridas com silício, conseguem acumular grandes quantidades deste elemento na epiderme foliar, aumentando a resistência da parede celular e assim diminuindo a perda de água por evapotranspiração, elevando a tolerância à pragas e doenças e, também, a eficiência fotossintética.

No Brasil são produzidas cerca de 6,25 milhões de toneladas de escórias de siderurgia (MEDEIROS et al. 2009), como subproduto da mineração do ferro e da produção do aço, consideradas as fontes mais abundantes e baratas de silicatos. Assim, os materiais inertes do minério de ferro e do carvão, que não foram reduzidos no processo siderúrgico de formação do aço, combinam-se com o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) do calcário, dando origem à escória de siderurgia (PEREIRA, 1978).

O uso das escórias de siderurgia na agricultura, além dos benefícios supracitados referentes à correção da acidez do solo e fornecimento de Si às plantas, pode

evitar um problema ambiental ao ser dado destino a um resíduo da indústria siderúrgica, desde que não contenham metais pesados em concentrações tóxicas ou contaminantes ao solo.

#### **4.3.1. O Silício**

O Si é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, tem sido motivo de várias pesquisas que tem demonstrado os seus efeitos benéficos para a agricultura, pois contribui para o crescimento e produção vegetal, principalmente, aumentando a tolerância de grande número de espécies vegetais aos estresses bióticos e abióticos (MA, 2004; GUNES et al., 2007; HATTORI et al., 2005).

O registro da utilização do Si como fertilizante se deu há algum tempo e, curiosamente um dos primeiros experimentos contendo Si ainda está sendo conduzido, depois de 100 anos de avaliação na estação de Rothamsted (Inglaterra). Os efeitos benéficos foram observados até a década de 70, onde as maiores produtividades e disponibilidade de P para as plantas foram encontradas nas parcelas fertilizadas, anualmente, com  $450 \text{ kg ha}^{-1}$  de silicato de sódio (RUSSEL, 1976).

#### **4.3.2. O Silício no solo**

No processo de formação dos solos, o Si se apresenta como um dos principais elementos constituinte dos argilo-minerais e pode afetar de forma significativa à nutrição das plantas. Em geral, os solos possuem de 5 a 40% de Si na sua composição (MA et al., 2001). Essa grande variação percentual deve-se ao grau de intemperismo dos solos. Os mais intemperizados, como os Latossolos, possuem baixos teores, enquanto solos mais jovens como os Cambissolos concentram maiores teores do elemento (TISDALE et al., 1985).

Em solos de textura e idade variadas do Estado de São Paulo, Raij et al. (1973) verificaram os menores valores de Si solúvel em um Latossolo fase arenosa, e os maiores valores num Podzólico argiloso, atribuindo a referida observação à reduzida porcentagem de argila no Latossolo, aliada à menor superfície específica total para o Argissolo, menos intemperizado e mais argiloso. Os autores verificaram ainda, teores de Si extraível com  $\text{CaCl}_2$   $0,0025 \text{ mol L}^{-1}$  variando de 1 a  $43 \text{ mg dm}^{-3}$ , sendo os maiores valores

encontrados nos solos mais argilosos e havendo também relação inversa com o grau de intemperismo.

Considerando-se a série liotrópica dos elementos no solo (FASSBENDER, 1978), onde os nutrientes são classificados de acordo com a susceptibilidade de lixiviação e com seu raio iônico, temos que o silicato é um dos elementos mais facilmente lixiviáveis no perfil do solo. A partir disso, pode-se estabelecer que, assim como o Na e o K, o íon silicato apresenta menor efeito agregante no solo, o que facilita o caminamento do elemento ao longo do perfil, aumentando perdas por lixiviação, evidenciada nos baixos teores deste elemento em solos tropicais (MENEGALE et al., 2015).

Entretanto, o silício está presente no solo de diversas formas, como constituinte dos minerais primários, minerais secundários e adsorvido aos colóides do solo. Contudo, a maior concentração do nutriente se encontra na forma de ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ), disponível na solução do solo, onde a maior parte não se encontra dissociada, elevando a possibilidade de perdas por lixiviação. As principais fontes do nutriente, presentes na solução do solo são provenientes da decomposição de resíduos vegetais, dissociação do ácido silícico polimérico, liberação de Si dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al (JONES; HANDRECK, 1967). Além disso, podemos incluir o nutriente no sistema a partir da adição de fertilizantes silicatados e também da água de irrigação (MENEGALE et al., 2015).

Contudo, a quantidade do elemento disponível na solução do solo é diretamente dependente da estabilidade dos minerais da fase sólida, ocorrendo, portanto, correlação positiva entre os teores do elemento e a quantidade de argila no material coloidal (MEYER; KEEPING, 2001).

Um dos fatores mais estudados e que interfere na solubilidade do silício no solo, em condições aeróbicas, é o pH. A adsorção de silício monomérico por hidróxidos de ferro e alumínio recém-precipitados e por argilas de um Latossolo aumenta com a elevação do pH de 4,0 até 9,0 (MCKEAGUE; CLINE, 1963), fato este evidenciado pela maior absorção de Si observada em plantas de arroz submetidas à elevação do pH do solo (OLIVEIRA et al., 2007). Outros autores também relataram que a absorção desse elemento benéfico pelas plantas está intimamente relacionada ao pH do solo (OLIVEIRA et al., 2007; CASTRO; CRUSCIOL, 2013ab).

Além da correção da acidez do solo realizada pelo silicato podemos citar, também, a “competição” entre os íons silicato e fosfato pelo mesmo sítio de adsorção dentro do complexo de troca de íons no solo. Sugere-se que os íons silicato deslocam os íons fosfato dos colóides, liberando-os para a solução do solo, pelo fato dos ânions silicatos ocuparem os mesmos pontos de adsorção dos ânions fosfatos (EPSTEIN; BLOOM, 2006).

Dentro desse contexto, um estudo realizado por Pozza et al. (2007) a fim de quantificar a dessorção competitiva entre os ânions silicato e fosfato na fração argila gibbsítica de um Gleissolo Melânico, com o silicato e o fosfato previamente adsorvidos ao material coloidal, adicionou-se, em sequência, o fosfato e o silicato intercalados, esse estudo demonstrou que a aplicação prévia do silicato reduziu a fixação de fosfato. Desse modo, a aplicação prévia do silicato favoreceu a disponibilidade do fosfato em solos altamente intemperizados, evidenciando a interação desses ânions.

Pulz et al. (2008), avaliando os efeitos da aplicação do silicato de cálcio e magnésio e calcário na correção da acidez do solo, e sua consequente influência na nutrição e produtividade de tubérculos de batata, relataram que o material silicatado proporcionou maior disponibilidade de P e Si no solo e maior absorção destes elementos pelas plantas de batata, resultando maior produtividade, além da melhor arquitetura das plantas.

Em ensaio realizado em um Latossolo Vermelho distroférrico avaliando-se o efeito de doses de silicato de cálcio combinadas com calcário (0+0, 2+0, 4+0, 6+0, 2+4, 4+2, e 0+6 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) na fertilidade do solo e nas plantas de *Urochloa brizantha* submetidas a diferentes intensidades de pastejo, Luz et al. (2011) verificaram maiores valores de pH e das concentrações de Ca, Mg, K e maior saturação por bases (V%), além da menor concentração de H+Al em função da aplicação do silicato nas profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m em um curto período de reação dos materiais no solo (45 dias); entretanto, o calcário proporcionou melhor efeito de correção a longo prazo (365 dias). Os autores concluíram que as concentrações de nutrientes das folhas não foram influenciadas pela aplicação do silicato de cálcio, mas aumentou-as no solo e nas plantas, culminando na maior produção de massa de matéria seca de parte aérea da forrageira.

### 4.3.3. O Silício nas plantas

O Si não é considerado elemento essencial às plantas (JONES; HANDRECK, 1967) porque não atende aos critérios diretos e indiretos de essencialidade. No entanto, Epstein e Bloom (2006) citaram efeitos benéficos relatados em culturas adubadas com Si como resistência às doenças e pragas, resistência à toxidez provocada por metais, menor evapotranspiração, aumento da nodulação em leguminosas, aumento da atividade de enzimas, efeitos na composição mineral, dentre outros. Por isso, o Si é classificado como elemento benéfico ou útil (MARSCHNER, 1995).

A absorção do Si é um processo ativo, com gasto energético, mesmo quando as raízes estão na presença de altas concentrações do elemento (MALAVOLTA, 2006), pois as plantas absorvem Si exclusivamente como ácido monossilícico, também chamado de ácido ortossilícico  $[\text{Si}(\text{OH})_4]$  (ELAWAD; GREEN JUNIOR, 1979). Essa forma monomérica de ácido silícico é encontrada na água doce e salgada em baixas concentrações, e se gelatiniza formando sílica gel quando em elevadas concentrações ou baixo pH (CALOMME et al., 2002). Contudo, o solo não é o único meio de fornecer Si às plantas. Mitani et al. (2009) identificaram dois genes transportadores de silício presentes em milho, o *ZmLsi1* e o *ZmLsi6*, sendo que o primeiro é mais expressivo em raízes, enquanto o segundo ocorre mais em folhas.

O transporte do Si é feito pelo xilema e sua distribuição depende das taxas de transpiração dos diferentes órgãos da planta. O elemento é imóvel na planta e, em plantas de arroz, é depositado nas lâminas foliares, bainhas foliares, colmos, cascas e raízes, sendo que na lâmina foliar o acúmulo é maior que na bainha foliar (TANAKA; PARK, 1966). O Si acumula-se nos tecidos de todas as plantas, representando entre 0,1 a 10% da massa de matéria seca das mesmas.

Existem duas hipóteses para a ação do Si nas plantas. Na primeira, considerada como barreira física, o Si depositado na epiderme das folhas de arroz está diretamente relacionado à resistência das plantas às doenças fúngicas, cujo mecanismo de resistência mais aceito é de natureza mecânica (BARBOSA FILHO et al., 2000). A segunda é considerada uma barreira química, e explicaria melhor o efeito benéfico do elemento, que tem levado a incrementos no crescimento e na produtividade final das culturas, uma vez que este elemento atua de forma indireta sobre alguns aspectos fotossintéticos e bioquímicos, e especialmente quando estas plantas estão submetidas a algum tipo de estresse, seja de natureza biótica ou abiótica (MA; YAMAJI, 2006;

ABDALLA, 2011). O mais provável, é que ambas possuam sua participação, proporcionando os benefícios observados nas mais diversas culturas.

O fornecimento de Si pode ainda reduzir a perda de água por transpiração (MA; YAMAJI, 2006) e aumentar a superóxido dismutase, a peroxidase e a atividade da catalase (MOUSSA, 2006), minimizando os danos causados por veranicos (CRUSCIOL et al., 2009). Segundo Agarie et al. (1998), o Si estaria também envolvido na biossíntese dos componentes da parede celular, devido às folhas das plantas de arroz tratadas com Si apresentarem níveis mais altos de polissacarídeos do que as folhas das plantas não tratadas com Si.

Muitos estudos têm demonstrado efeitos benéficos da aplicação de Si, em diversas culturas como tomate, pepino, café, girassol, feijão caupi, batata, arroz, aveia branca, cana-de-açúcar, cevada, feijão, milho, pastagens, sorgo, soja e trigo (MA et al., 2001; GONG et al., 2005; HATTORI et al., 2005; LIANG et al., 2005; GUNES et al., 2007; 2008; REIS et al., 2008 MALI; AERY, 2009; PULZ et al., 2008; CRUSCIOL et al., 2009; MANCUSO et al., 2014; CASTRO et al., 2011; SORATTO et al., 2012; CASTRO; CRUSCIOL, 2013ab; CRUSCIOL et al., 2013), abrangendo culturas acumuladoras e não-acumuladoras desse elemento. Porém, os benefícios do Si são mais comumente relatados nas plantas gramíneas acumuladoras de Si como arroz, aveia branca, cana-de-açúcar, milho, trigo dentre outras.

Por outro lado, Pereira Junior et al. (2010), avaliando a influência de doses de Si na cultura da soja não observaram influência sobre as características agronômicas e também sobre a produtividade da cultura. Conforme relatado por Menegale et al. (2015) em revisão sobre o Si no sistema solo planta, ainda não estão muito bem definidos os benefícios do Si sobre plantas leguminosas ou não-acumuladoras, o que depende de estudos mais aplicados, haja vista que, para a mesma cultura, a soja, Castro e Crusciol (2013b) obtiveram resultados positivos com a aplicação de silicato comparativamente à aplicação de calcário.

As plantas acumuladoras são as que absorvem e acumulam de 100 a 150 g kg<sup>-1</sup> de Si, as plantas tidas como intermediárias absorvem e acumulam de 10 a 50 g kg<sup>-1</sup> de Si e as plantas não-acumuladoras possuem concentrações abaixo de 5 g kg<sup>-1</sup> de Si. Plantas consideradas não-acumuladoras, como as dicotiledôneas, absorvem o Si mais lentamente que a absorção de água, o que acaba gerando um aumento na concentração do elemento no meio (ADATIA; BESFORD, 1986).

As respostas à aplicação de Si são potencializadas quando as culturas são submetidas a algum tipo de estresse, seja ele de natureza biótica ou abiótica (MA, 2004; GUNES et al., 2007; 2008; HATTORI et al., 2005). A deficiência hídrica, comum no bioma Cerrado, pode inibir a fotossíntese devido a alterações no conteúdo de clorofila, danos no aparato fotossintético e redução da condutância estomática da folha, além de modificar a atividade de algumas enzimas e o acúmulo de açúcares e proteínas na planta (HATTORI et al., 2005), reduzindo a absorção de nutrientes (GUNES et al., 2008), refletindo em menor crescimento e produtividade das culturas.

A ação benéfica do Si tem sido associada a diversos efeitos indiretos, dentre os quais, destacam-se o aumento da capacidade fotossintética, a melhoria da arquitetura das plantas, a redução da transpiração, aumento da resistência mecânica das células, maior resistência das plantas a pragas e doenças, diminuição do efeito tóxico do B, Mn, Fe e outros metais pesados e aumento da absorção de nutrientes (GUNES et al., 2007).

#### **4.4. Rotação de culturas para regiões de inverno seco**

Na maioria das regiões do Brasil, principalmente nas que possuem distribuição de chuvas irregular, normalmente é realizado apenas um cultivo, na estação chuvosa do ano, deixando-se o solo descoberto e sujeito às intempéries climáticas o resto do ano, o que muitas vezes causa erosão e perda de nutrientes (GASSEN; GASSEN, 1996), sendo esta perda dependente das condições climáticas da região e das culturas utilizadas.

Para Derpsch et al. (1991) a rotação de culturas é um manejo conservacionista, que consiste em alternar espécies vegetais ao longo dos anos em uma mesma gleba ou talhão. Inúmeras vantagens têm sido relacionadas à rotação, dentre elas a diversificação da renda do produtor rural, melhor aproveitamento das máquinas agrícolas, variação no tipo e na profundidade explorada pelos sistemas radiculares, controle de plantas daninhas, pragas e doenças, fixação de nitrogênio pelas leguminosas, efeitos alelopáticos, redução das perdas de água e de solo, além de aumento da produtividade.

Todavia, Calegari (2000) infere que a rotação de culturas é a alternância de espécies vegetais na mesma estação em determinada área, observando-se um período mínimo sem o cultivo da mesma espécie na mesma área. Ademais, Adegas (1997) cita que esta alternância regular e ordenada de culturas em sequência temporal numa

determinada área, dificulta a instalação de plantas invasoras. O fato ocorre pelas características das culturas utilizadas em um sistema de rotação, como rapidez de crescimento, eficiência na ocupação do espaço do solo, sombreamento e liberação de substâncias alelopáticas para as plantas daninhas (CASTRO et al., 2011).

A escolha das espécies a comporem as rotações de culturas é determinante para o sucesso do SPD (ARGENTA et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2002) e depende da manutenção de sistemas capazes de gerar quantidades de fitomassa suficiente para manter o solo coberto durante todo o ano (CERETTA et al., 2002). No entanto, a produção de palhada para o SPD em regiões com inverno seco, está sujeita principalmente às condições de umidade e temperaturas elevadas em boa parte do ano, as quais causam a rápida decomposição da fitomassa depositada sobre o solo. Segundo Bertol et al. (2004), caso não haja esta manutenção, o sistema de cultivo, compreendido como rotação e sucessão de culturas, não influenciará, em geral, as propriedades físicas do solo, tanto em SPD quanto no preparo convencional e, além disso os efeitos benéficos do SPD e da rotação não ocorrerão da forma esperada.

Entretanto, um dos pontos-chaves para que se tenha um melhor aproveitamento do sistema de produção é que sejam evitados os períodos de pousio, e para isso pode-se realizar o cultivo de uma cultura granífera na entressafra como o milho, arroz, feijão, trigo, cevada, dentre outros, pode-se também realizar o cultivo de uma espécie de planta de cobertura e ou adubo verde como a crotalária, guandu-anão, milheto, bem como optar pelo plantio de pastagens como as *Urochloas* spp, as quais podem servir como fonte de alimento para os animais e ou como fonte de cobertura vegetal para o SPD.

Silva e Rosolem (2001) avaliaram várias culturas antecessoras à soja, e constataram que após o pousio, a oleaginosa acumulou menor quantidade de N, K, Ca, Mg e S, mostrando, assim, que o cultivo anterior pode promover maior eficiência no acúmulo dos nutrientes na parte aérea das culturas subsequentes. Com o mesmo enfoque, estudando a rotação de culturas com soja, Santos et al. (1998) verificaram que os menores valores de produtividade de grãos e altura da inserção de vagens estão relacionados diretamente às características da cultura antecessora. Outro fator que deve ser levado em consideração é o aumento da produtividade das culturas quando cultivadas em intervalos maiores na mesma área, conforme observado por Silveira (2002), na região dos cerrados, em que constatou aumento da produtividade de grãos da soja em cultivos bienais.

O cultivo de uma cultura granífera no período de entressafra é uma das formas de se diminuir o período de pousio e também aumentar a renda do produtor rural. Nesse contexto, o cultivo do trigo na entressafra deve ser incentivado devido à importância da cultura para o Brasil e para o mundo, pois esse cereal de inverno está entre os principais produtos utilizados para a alimentação da população brasileira e mundial. Na região do Cerrado, o cultivo do cereal pode ser realizado sob regime de sequeiro ou irrigado, permitindo também a semeadura no período de entressafra no SPD.

O Brasil produziu, na safra de 2015, cerca de 7 milhões de toneladas de grãos de trigo, para um consumo estimado em 12 milhões de toneladas. Esses dados mostram que o Brasil não é auto-suficiente na sua produção, destacando-se como um dos maiores importadores mundial do grão. A importação brasileira tem origem de países como Argentina, Canadá e EUA, pagando-se até 30% mais caro que o produto nacional (CONAB, 2015).

Segundo dados publicados pelo MAPA (2012), a produção projetada de trigo para 2021/2022 esta estimada em 6,9 milhões de toneladas, para um consumo de 11,7 milhões de toneladas no mesmo ano. Destaca-se que o consumo interno do cereal no Brasil deverá crescer em média 1,2% ao ano, entre 2011/12 e 2021/2022. Essas projeções demonstram a necessidade de expansão da área cultivada, além do aumento da produtividade nas áreas já produtoras. Neste contexto, a região do Brasil Central, onde predomina o bioma Cerrado, apresenta grande potencial para a expansão da cultura do trigo, por oferecer ótimas condições de clima, posição estratégica de mercado e capacidade de industrialização.

Dentre os Estados brasileiros com potencial para expansão da cultura, São Paulo é estrategicamente um dos mais interessantes, já que a região concentra a maior parte do polo industrial do cereal. Além do aspecto logístico, a produção paulista pode suprir a demanda na entressafra da produção dos Estados do Sul e da Argentina e com características superiores de qualidade industrial para panificação, o que pode garantir ao produtor melhor rentabilidade (ALBRECHT et al., 2005). Além disso, o desenvolvimento de cultivares modernas, adaptadas às condições edafoclimáticas da região, por inúmeras instituições de pesquisa, favorece a expansão da triticultura no Estado de São Paulo (TRINDADE et al., 2006).

Além do cultivo de uma cultura granífera como o trigo na entressafra, pode-se também realizar o plantio de uma espécie de cobertura e ou adubo verde nesse período. A adubação verde é a prática de cultivo e incorporação de plantas, produzidas no local ou adicionadas, com a finalidade de manter e ou aumentar os teores de matéria orgânica e nutrientes dos solos, indo ao encontro da tendência mundial pela busca de alimentos mais saudáveis, provenientes da agricultura orgânica ou produzidos com a mínima utilização de insumos “químicos” e degradação do ambiente (SILVA et al., 1999).

Uma das principais limitações ao uso da adubação verde na região dos cerrados está relacionada à época de semeadura. Se o produtor optar pela semeadura do adubo verde antes da cultura comercial, pode ocorrer atraso na semeadura de verão, prejudicando o desenvolvimento da mesma. Segundo Pereira et al. (1992), o uso da adubação verde pode ser viabilizado com a semeadura no final da estação chuvosa, após a colheita da cultura comercial, aproveitando o benefício da cobertura vegetal durante toda a entressafra.

A rotação utilizando-se adubos verdes e culturas gramíneas pode ser benéfica pela utilização do nitrogênio residual por parte da gramínea. O fato foi comprovado por Mascarenhas et al. (1998), que demonstraram que a produtividade de grãos do arroz foi maior quando em sucessão a soja e a crotalária, no segundo ano de cultivo, do que quando sucedeu somente a soja, indicando efeito positivo adicional do adubo verde, no caso a crotalária, sobre o arroz. Trabalhos citam que a adubação verde pode provocar incrementos na produção de culturas subsequentes em até 65% em relação a cultivos contínuos. (TANAKA et al., 1992; RODRIGUES FILHO et al., 1996).

Experimentos realizados por Silveira (2002) objetivando avaliar os efeitos da rotação de culturas sobre o feijoeiro, no cerrado brasileiro, permitiram constatar que a rotação arroz consorciado com calopogônio proporcionou as maiores produtividades de grãos do feijoeiro nos seis anos de cultivo. De acordo com o autor a inclusão de leguminosas melhorou as características físicas, químicas e biológicas do solo, além do mais as rotações com leguminosas determinaram os maiores incrementos de nitrogênio total no solo. De modo geral, as piores produtividades do feijoeiro foram alcançadas nas rotações milho-feijão e milho-feijão-milho-feijão-arroz-feijão. A menor produtividade do feijoeiro após o milho foi atribuída, em parte, à deficiência de nitrogênio, devido à maior competição dos microorganismos, para com o nutriente, durante a decomposição da palhada de milho.

Silva et al. (1999) destacaram que o monocultivo de gramíneas, em decorrência de seu sistema radicular fasciculado e superficial, acaba explorando o solo continuamente a uma mesma profundidade, diminuindo o estoque de nutrientes na camada de 0-0,20 m, onde estão concentradas as raízes, além de degradar a estrutura do solo, compactando-o e reduzindo sua porosidade.

Entre as espécies vegetais utilizadas como plantas de cobertura e para adubação verde, as leguminosas se destacam pela associação simbiótica com bactérias fixadoras de nitrogênio (N<sub>2</sub>), que resulta em aporte de quantidades expressivas deste nutriente ao sistema solo-planta (PERIN et al., 2003), contribuindo com a nutrição das culturas subseqüentes (ANDREOLA et al., 2000; ZOTARELLI, 2000). Outra característica de destaque das leguminosas é a baixa relação C/N, que aliada à presença de compostos solúveis, favorece sua decomposição e mineralização por microorganismos do solo e a ciclagem de nutrientes (ZOTARELLI, 2000).

Vários autores relataram que o cultivo de espécies de adubos verde pode resultar em maiores produções das culturas subseqüentes em até 65% em relação a cultivos contínuos. (MIYASAKA et al., 1965; FERRAZ et al., 1977; TANAKA et al., 1992; RODRIGUES FILHO et al., 1996). Entre as diversas leguminosas que são utilizadas para adubação verde na região dos cerrados e na maior parte do Estado de São Paulo, destacam-se: mucuna-preta (*Mucuna aterrima*), guandu (*Cajanus cajan*), crotalárias (*Crotalaria juncea*, *Crotalaria ochroleuca*, *Crotalaria paulina* e *Crotalaria spectabilis*), feijão-bravo-do-ceará (*Canavalia brasiliensis*), feijão-de-porco (*Canavalia ensiformis*), estilosantes (*Stylosanthes guianensis*) (PEREIRA et al., 1992), e dentre as gramíneas o milheto (*Pennisetum glaucum*) vem se destacando no SPD no Centro-Oeste.

As espécies de crotalária se destacam na produção de massa de matéria seca de parte aérea, sendo importantes plantas de cobertura utilizadas no SPD. As principais características dessas espécies são: boa cobertura do solo, proporcionado pelo rápido crescimento, alta produção de biomassa, resistência a pragas e doenças, elevada ciclagem e reciclagem de nutrientes e supressão de nematóides parasitas (INOMOTO et al., 2008). Essa última característica tem acarretado em grande expansão do cultivo dessa espécie nas áreas de produção de grãos na região do cerrado brasileiro (COSTA et al., 2012).

O milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) possui ciclo anual e crescimento ereto, alta adaptabilidade a solos de baixa fertilidade e arenosos, sendo

tolerante à seca (KICHEL, 1998), é o sexto cereal mais cultivado em todo o mundo, sendo utilizado para diversos fins, como para formação de pasto, feno, silagem, cobertura morta para o SPD, podendo ser inserido na rotação ou consorciação com crotalária, guandu-anão entre outras espécies (SILVA et al., 2010; FERRARI NETO et al., 2011). Estima-se que no Brasil, no intervalo das safras 2003/04 e 2008/09, a área cultivada com este cereal tenha passado de quatro para cinco milhões de hectares (EMBRAPA, 2008).

O milheto é eficaz na produção de massa de matéria seca (10 a 14 Mg ha<sup>-1</sup>), promove uniforme cobertura vegetal sobre o solo após manejado, resultando em maior competição com as plantas daninhas, recicla quantidades satisfatórias de nutrientes, principalmente N e K, e possui crescimento radicular vigoroso, promovendo maior aeração do solo e contribui significativamente para reduzir a compactação (TORRES et al., 2005; CRUSCIOL; SORATTO, 2007, 2009; BOER et al.; 2007; TIMOSSI et al., 2007; PIRES et al., 2008; PACHECO et al., 2011; GONÇALVES et al., 2006; BORDIN et al., 2008; CALONEGO; ROSOLEM, 2010; CARNEIRO et al., 2008; SILVA et al., 2010; CASTRO, 2009; BOER et al., 2007; CRUSCIOL; SORATTO, 2009), sendo uma das culturas que contribuiu para a expansão do SPD no Cerrado brasileiro (SALTON; KICHEL, 1997). Nesse sentido, nas regiões brasileiras produtoras de grãos, caracterizadas como de inverno seco, o milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Brown), dentre outras gramíneas, têm sido a principal espécie utilizada como planta de cobertura.

Os benefícios proporcionados pela utilização dos adubos verdes nem sempre trazem melhorias visíveis ou lucro imediato ao produtor. No entanto, a sua utilização quando de forma racional e, se possível inserida dentro de um sistema de rotação ou sucessão de culturas, pode trazer inúmeros benefícios às culturas subsequentes como também ao próprio solo, mediante as melhorias nas suas características físicas, químicas e biológicas.

Outra opção para que sejam evitados os períodos de pousio em regiões de inverno seco é o sistema de integração lavoura – pecuária (ILP), ou sistema safra-forrageira. Diversos autores descreveram os inúmeros benefícios desta prática como a recuperação eficiente da fertilidade do solo, a implantação de pastagens com baixos custos, a melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, o controle de pragas, doenças e plantas daninhas, a reciclagem dos nutrientes do solo, o aproveitamento da adubação residual pelas forrageiras, o aumento da produção de grãos e resíduos vegetais no sistema, o aumento das oportunidades de trabalho, a maior eficiência no emprego de

máquinas, equipamentos e mão de obra, a diversificação do sistema produtivo e o aumento da produtividade e lucratividade (KICHEL et al., 1998; CRUSCIOL et al., 2009; HECKLER et al., 1998; CRUSCIOL, 2007; BORGHI, 2007; SALTON et al., 2008; CRUSCIOL; SORATTO, 2010; PACHECO et al., 2011; GARCIA et al., 2013).

Broch et al. (1997) também relataram os benefícios proporcionados para as lavouras e para as pastagens em função da rotação de culturas graníferas com as pastagens como a melhoria da qualidade das pastagens por meio do aproveitamento dos nutrientes residuais das lavouras, formação de palha com relação C/N alta, proveniente da dessecação das pastagens, o que é fundamental para a instalação do SPD. Dentro deste contexto, Heckler et al. (1998) relataram que as espécies do gênero *Urochloa* são muito utilizadas na integração lavoura pecuária, pois apresentam sistema radicular abundante, agressivo, o que contribui para a melhoria da infiltração de água, da agregação e aeração do solo e, de acordo com Vilela et al. (2001), a participação relativa de espécies do gênero *Urochloa* na região dos cerrados é da ordem de 85%, sendo que a *Urochloa decumbens* ocupa cerca de 55% da área total de pastagem.

Crusciol et al. (2009) relataram que no consórcio de culturas graníferas com forrageiras perenes, a forrageira pode ter dupla finalidade: a primeira, servindo como alimento para a exploração pecuária, a partir do final do verão até o início da primavera e, posteriormente, para a formação de fitomassa, cobertura vegetal do solo, para o SPD; a segunda, como planta exclusiva para a produção de fitomassa, proporcionando cobertura permanente do solo até a semeadura da safra de verão subsequente.

As *Urochloas spp* tem se destacado como plantas de cobertura no SPD, pois além da produção de fitomassa e as melhorias nos atributos do solo, outra característica que tem conferido sucesso a essas forrageiras perenes nos sistemas de produção de grãos em regiões de inverno seco, é sua maior persistência sobre o solo (CRUSCIOL et al., 2009).

Borgi et al. (2008), avaliando a quantidade de fitomassa remanescente na superfície do solo antes da semeadura da safra de verão seguinte, obtiveram valores da ordem de 7000 a 13000 kg ha<sup>-1</sup> na área onde foi cultivado milho consorciado com *Urochloa brizantha*. Esses valores foram muito superiores à média observada na área com milho solteiro (2500 kg ha<sup>-1</sup>) sete meses após a colheita. Aidar et al. (2000) verificaram que as produções de massa de matéria seca de parte aérea dos

consórcios milho + *Urochloa brizantha* e milho + *Urochloa ruziziensis* ultrapassaram 16000 e 17500 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, antes da semeadura do feijão, garantindo a proteção da superfície do solo por mais de 107 dias. Crusciol (2007), comparando a persistência das fitomassas da *Urochloa brizantha* e do milheto, relatou que aos 51 dias após o manejo químico, restava menos de 50% da fitomassa do milheto, enquanto, no caso da *Urochloa brizantha*, ainda havia cerca de 70% da fitomassa remanescente sobre o solo.

Contudo, para que os benefícios do SPD sejam alcançados, principalmente a conservação da umidade no solo e a ciclagem de nutrientes, faz-se necessária a utilização de plantas de coberturas de qualidade, ou seja, que tenham como principais características a capacidade de manter a superfície do solo coberta com fitomassa e que consigam mobilizar elementos lixiviados ou pouco solúveis e liberá-los posteriormente para a próxima cultura, aumentando, assim, a eficiência da utilização dos fertilizantes por essas culturas (CRUSCIOL; SORATTO, 2007; CRUSCIOL et al., 2008; LEITE et al., 2010; PACHECO et al., 2011). Nesse sentido, o cultivo de culturas anuais em sucessão às forrageiras perenes tem proporcionado ganhos de produtividade, eficiência de utilização de fertilizantes e, conseqüentemente, maior sustentabilidade dos sistemas de produção (CRUSCIOL; SORATTO, 2010).

A adequada escolha das espécies de cobertura a comporem o esquema de rotação com as culturas graníferas em SPD deve considerar as condições climáticas da região, as características intrínsecas da espécie de cobertura a ser utilizada, como a capacidade de produção de fitomassa e persistência sobre o solo, e também qual cultura granífera será semeada, objetivando os benefícios relacionados às melhorias nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, prevenção de doenças e infestação por plantas daninhas, os quais resultarão em altas produtividades de grãos com menor custo de produção.

Dentro desse contexto, Lemos et al. (2015) descreveram como sendo as principais vantagens do uso da fitomassa das *Urochloas spp* como plantas de cobertura para o cultivo subsequente do feijão em SPD: a maior eficiência na cobertura da superfície do solo, resultando em melhor conservação de água e menor variação da temperatura do solo ao longo do dia; maior longevidade da cobertura do solo em razão da lenta decomposição de seus resíduos, controle e minimização das doenças, como o mofo branco, podridão radicular seca ou podridão por *Fusarium* e podridão por *Rhizoctonia*, por ação isolante ou alelopática causada pela microflora do solo sobre os patógenos e maior

capacidade da supressão física das plantas daninhas, podendo reduzir ou até mesmo tornar desnecessário o uso de herbicidas pós-emergentes.

Diante desses benefícios a Embrapa/Arroz e Feijão e colaboradores tem difundido o Sistema Santa Fé, esse sistema possui como principais objetivos a produção de forragem para a entressafra e fitomassa em quantidade e qualidade para o SPD (LEMOS et al., 2015). Portanto, a cultura do feijão está entre as que tem apresentado os melhores resultados quando cultivada no SPD, em sucessão as *Urochloas spp*, em comparação com outras plantas utilizadas como plantas de cobertura, principalmente nos cerrados.

No entanto, Moro et al. (2013), em estudo realizado em Botucatu-SP com a cultura do arroz de terras altas, verificaram as seguintes produtividades: 6800, 4200, 4100, 4400 e 6000 kg ha<sup>-1</sup> quando cultivada, respectivamente, sobre as fitomassas do milho, crotalária, *Urochloa brizantha*, *Urochloa decumbens* e da *Urochloa ruziziensis*. Esses autores concluíram que a melhor planta de cobertura a ser cultivada antes da cultura do arroz em SPD é o milho. Já Pacheco et al. (2013) em estudo realizado na área experimental da Embrapa Arroz/ Feijão, no município de Santo Antônio de Goiás – GO, concluíram que a *Urochloa Ruziziensis* consiste na melhor opção de planta de cobertura para cultivo prévio à semeadura do arroz de terras altas em SPD, as produtividades observadas por esses autores sobre as fitomassas da *Urochloa ruziziensis*, *Urochloa brizantha*, milho e *Urochloa ruziziensis* consorciada com feijão guandu foram, respectivamente, de 1554, 1011, 1444 e 1164 kg ha<sup>-1</sup>, sendo essas produtividades consideradas baixas devido ao déficit hídrico que ocorreu quando a cultura do arroz estava em pré-florescimento.

No estudo de Moro et al. (2013) a menor produtividade do arroz cultivado sobre as fitomassas das plantas do gênero *Urochloa* em relação ao milho, com exceção da *Urochloa ruziziensis*, foi explicada por possíveis efeitos alelopáticos que as *Urochloas brizantha* e *decumbens* teriam exercido na germinação e desenvolvimento das plantas de arroz, pois na literatura existem relatos desse efeito alelopático das *Urochloas spp* reduzindo a germinação, desenvolvimento e a produtividade de culturas graníferas (SOUZA FILHO et al., 1997; MARTINS et al., 2006; SOUZA et al., 2006).

O intervalo entre a dessecação das plantas de cobertura e a semeadura do arroz em SPD é um fator que deve ser considerado, pois Nascente (2012) relatou haver translocação do herbicida aplicado nas plantas de cobertura para as plântulas de arroz, e para que isso não ocorra o milho deve ser dessecado com aproximadamente 20 dias e a espécie

de *Urochloa* com aproximadamente 30 dias antes da semeadura do arroz, evitando-se assim que a dessecação dessas espécies de plantas de cobertura interfira negativamente na produtividade de grãos do arroz de terras altas.

#### **4.5. Importância e dinâmica da matéria orgânica dos solos (MOS)**

O clima predominante no Brasil é o tropical e a maioria das regiões produtoras de grãos do país, sendo a principal o Cerrado, estão localizadas em regiões de clima tropical. As condições de clima tropical e dos solos altamente intemperizados criam desafios para a produção de grãos nacional. O Cerrado é dominado pelos Latossolos, os quais caracterizam-se pela baixa capacidade de retenção de água, baixa atividade microbiana, elevada acidez e baixa fertilidade natural devido às deficiências em  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  e P e elevada toxicidade por  $\text{Al}^{3+}$ , além dos problemas com erosão que frequentemente ocorrem nesses solos.

Esses problemas são superados quando são adotadas práticas de manejo que aumentam o teor de matéria orgânica nesses solos, e dentre tais práticas, destacam-se o SPD dentro de um eficiente programa de rotação de culturas que promova melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, além de manter a superfície do solo sempre coberta com resíduos vegetais.

Dentro desse contexto, um dos grandes avanços da agricultura brasileira foi a adoção do SPD no início da década de 1970 que além da redução da erosão, um fator de grande relevância foi o aumento da MOS (FAGERIA; BALIGAR, 2008).

Os efeitos positivos da adoção do SPD podem ser observados nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (GARCIA et al., 2013). Quanto às propriedades físicas um dos principais benefícios é a maior capacidade de armazenamento de água no perfil do solo (BENJAMIN et al., 2003). Quanto às propriedades químicas, tem-se uma maior ciclagem de nutrientes, reduzindo as perdas por lixiviação, além da maior CTC devido ao aumento do teor da MOS (GARCIA et al., 2008; REDDY et al., 2009; CASTRO et al., 2015), sendo a MOS, responsável por 75 a 90% da CTC dos solos tropicais e subtropicais (FONTANA et al., 2006; BORTOLUZZI et al., 2009; BRIEDIS et al., 2012b).

O SPD combinado com a rotação de culturas pode também aumentar a população de microorganismos fixadores do  $\text{N}_2$  e outros microorganismos benéficos ao solo e

às plantas, devido à maior incorporação de resíduos vegetais de diferentes espécies ao longo do tempo (WANG et al., 2007; SIMMONS; COLEMAN, 2008).

Ainda com relação às melhorias nas propriedades físicas do solo, a seleção de espécies com sistema radicular vigoroso é fundamental, pois enquanto crescem através das camadas do solo com alta resistência à penetração, as raízes criam poros que facilitarão o crescimento das raízes das plantas da cultura sucessora (SILVA; ROSOLEM, 2001; GARCIA et al., 2013). E além disso, quando são utilizadas plantas de cobertura, essas irão promover a diversificação dos cultivos (CALONEGO; ROSOLEM., 2010).

Algumas gramíneas como as *Urochloas* spp., milheto, sorgo, dentre outras, possuem sistemas radiculares vigorosos fasciculado que possuem a habilidade de explorar camadas profundas do perfil do solo (GARCIA et al., 2013). Na literatura existem diversos relatos dos efeitos positivos do uso de espécies que possuem sistema radicular fasciculado na estruturação do solo (SILVA; MIELNICZUK, 1997; CALONEGO; ROSOLEM, 2008; SALTON et al., 2008; CASTRO et al., 2011).

No SPD, o aporte de massa de matéria seca e conseqüentemente de matéria orgânica promovido tanto pela parte aérea quanto pelo sistema radicular das plantas de cobertura atuam como agentes agregantes das partículas individualizadas do solo, promovendo a formação de agregados mais estáveis (ANDERS et al., 2012). As raízes vivas ou em estado de decomposição e também os resíduos da parte aérea das culturas liberam compostos ricos em carbono que servem como fonte de energia para a microbiota do solo. Esses microorganismos, por sua vez, são capazes de liberar consideráveis quantidades de polissacarídeos que auxiliam na agregação por serem agentes cimentantes que promovem a união das partículas do solo (BRIEDIS et al., 2012c).

A agregação do solo é resultante do rearranjo das partículas, floculação e união dos microagregados por meio da ação dos agentes cimentantes, esse processo é dependente do conteúdo de carbono orgânico total (COT), de argila, da biota e das ligações iônicas do solo, dentre outros (BRONICK; LAL, 2005). Por consequência da melhor agregação, outras propriedades físicas do solo são indiretamente influenciadas como a densidade, a resistência mecânica à penetração, porosidade, aeração e a capacidade de retenção e infiltração de água no solo (TISDALL; OADES, 1982; BAYER; MIELNICZUC, 2008; CALONEGO; ROSOLEM, 2008).

A inclusão de plantas de cobertura na rotação com as culturas graníferas, é uma prática muito importante para que seja aumentado o teor da MOS e assim

consolidado o sistema plantio direto. A MOS é composta por resíduos vegetais e animais em diversos estágios de decomposição, biomassa microbiana, raízes e a fração húmica da MOS (GUIMARAES et al., 2013).

A MOS é o componente do solo mais complexo, dinâmico e reativo, pois afeta as propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos. Ela possui uma função nutricional, ao servir como fonte de nutrientes para o crescimento de plantas; uma função biológica, ao influir na atividade da microbiota do solo; e uma função física, ao promover uma boa estruturação e aeração do solo e aumentar a retenção de água (STEVENSON, 1994). Em adição, a MOS pode atuar na prevenção da contaminação do meio ambiente, por meio da adsorção de traços de elementos poluentes, pesticidas e demais elementos químicos orgânicos (SILVA; PASQUAL, 1999).

Por ter função essencial na sustentabilidade do sistema solo planta, o estoque do COT tem sido indicador da qualidade do solo. Assim, o COT é tido como a forma mais abundante desse elemento quando se considera o seu ciclo global na superfície, excedendo o conteúdo da atmosfera e da biomassa terrestre, porque é nesse compartimento que o carbono está prontamente disponível para participar do ciclo global (STEVENSON, 1994).

Entretanto, a dinâmica da MOS ou COT tem mostrado baixa sensibilidade às práticas de manejo do solo. Com isso têm sido realizados estudos envolvendo as frações da MOS, as quais são mais sensíveis às práticas de manejo do solo, e também melhores indicadores da dinâmica da MOS (TIROL-PADRE; LADHA, 2004; XAVIER et al., 2006; DOU et al., 2008; YANG et al., 2009; GARCIA et al., 2013; CASTRO et al., 2015).

Uma das maneiras de se estudar as frações em que o C está sendo acumulado tem sido realizada por meio do fracionamento físico da MOS, que pode ser granulométrico, densimétrico ou uma mistura de ambas, porém o carbono contido nas diferentes frações do solo, separadas por tamanho, é um dos melhores indicadores do grau de proteção da MOS (BALABANE; PLANTE, 2004). Nesse fracionamento, a MOS associada às frações mais grosseiras, como a fração areia, também denominada de carbono orgânico particulado (COP), refere-se à matéria orgânica de maior labilidade, composta por resíduos de plantas e hifas de fungos com reconhecível estrutura celular (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992; CHRISTENSEN, 2000; BAYER et al., 2002; GARCIA et al., 2013). Já a MOS associada às frações mais finas, como a fração argila,

também denominada de carbono orgânico associado aos minerais (COAM), é considerada como sendo de maior estabilidade (BALESDENT et al., 1988; BUYANOVSKY et al., 1994; BAYER et al., 2001).

O estudo da MOS compreende uma série de componentes por ser um reservatório heterogêneo de C, sendo uma complexa combinação de materiais, diferindo em origem, composição e dinâmica (CARTER, 2001). A recalcitrância dos materiais constituintes, a formação de complexos organominerais com partículas de argila e a oclusão em agregados constituem os principais fatores de estabilização da MOS (CHRISTENSEN, 2000; BAYER et al., 2006).

A expressão “dinâmica da MOS” refere-se às alterações quantitativas e qualitativas que ocorrem nos estoques de carbono ao longo do tempo. O C pode ser acumulado em frações lábeis ou estáveis, recalcitrantes, da MOS. Os compostos lábeis se decompõem dentro de poucas semanas ou meses, já os compostos recalcitrantes, por serem mais estáveis, demoram mais tempo para se decompor. Quanto mais recalcitrante, ou de difícil decomposição for o material, maior será o tempo de estoque do C no solo (SILVA; PASQUAL, 1999; LORENZ; LAL, 2005; MILORI et al., 2006). A humificação pode ser compreendida como a degradação de compostos lábeis e acúmulo de materiais recalcitrantes (ZECH et al., 1997).

A proteção física das estruturas orgânicas mais lábeis ocorre por mecanismos como a agregação do solo, o qual é normalmente intensificado pelo SPD. Por outro lado, a maior concentração de estruturas recalcitrantes é um indicativo de que o material lábil sofreu um maior grau de mineralização, um processo típico em solos manejados convencionalmente através do preparo com arações e gradagens (DIECKOW et al., 2005).

O acúmulo de C em frações lábeis da MOS principalmente no SPD com adequado aporte de resíduos vegetais pela rotação de culturas é um indicativo do maior estoque de C, pois a ausência de revolvimento e a mínima mobilização do solo reduzem o efluxo de C do solo para atmosfera devido à diminuição das taxas de decomposição da matéria orgânica (BAYER et al., 2000).

Além disso, a rotação de culturas com alto aporte de resíduos vegetais aumenta o influxo de C da atmosfera para o solo, resultando em um balanço positivo em razão da entrada de C ser maior que a saída de C do solo.

Os sistemas de manejo conservacionistas também contribuem com o sequestro de C atmosférico por proporcionarem maior agregação das partículas do solo, reduzindo a oxidação da MOS (CASTRO FILHO et al., 2002; COSTA, et al. 2008) e também aumentando a estabilização da MOS devido a formação de complexos organominerais e a oclusão de partículas lábeis nos agregados (CHRISTENSEN, 2000; BAYER et al., 2006).

No estudo da MOS, o clima é assumido como de grande importância sobre as características da MOS, devido principalmente à influência da temperatura e umidade na intensidade da decomposição microbiana (STEVENSON, 1999). Já as características minerais do solo e a cobertura morta, influenciam o tipo e grau de associação entre compostos orgânicos e minerais e interferem na estabilidade e no nível de recalcitrância química que a MOS possui (SOLLINS et al., 1996; BALDOCK; SKJEMSTAD, 2000).

Estudos tem mostrado que mudanças nos estoques do COP, relacionam-se com o aporte de resíduos dos cultivos ao sistema de produção (SÁ; LAL, 2009; BRIEDIS et al., 2012abc). Assim, Briedis et al. (2012b), em estudo no Sul do Brasil em região de clima Subtropical, obtiveram relação linear positiva entre o carbono acumulado a partir dos resíduos das plantas cultivadas durante 15 anos em SPD e o COP na camada de 0 a 0,20 m.

Garcia et al. (2013) comparando diferentes rotações de culturas em condições de clima tropical relataram que a curto prazo as frações lábeis da MOS são as primeiras a serem alteradas pela rotação de culturas, e as gramíneas são mais eficientes em aumentar essas frações do que as leguminosas.

Já Briedis et al. (2012c), em estudo com a aplicação superficial de calcário, relataram haver aumento do COP e também do COAM até 0,20 m do perfil do solo, sendo o maior impacto dessa prática observado na fração particulada da MOS. Esses autores relataram também que o maior efeito da calagem no COP ocorreu devido à maior produção de fitomassa de raízes e parte aérea por consequência da calagem. É importante destacar também que Briedis et al. (2012c) relataram que o fluxo contínuo de compostos orgânicos liberados através da decomposição dos resíduos vegetais somado a atividade microbiana podem resultar na formação de complexos organo-minerais estáveis (BAYER

et al., 2000; SÁ et al., 2001; SÁ; LAL, 2009), o que é de suma importância para que o C orgânico não seja “perdido” para a atmosfera.

Conforme já relatado, as alterações do COT ocorrem gradualmente, porém as frações ativas são mais dinâmicas (FRANZLUEBBERS, 2016). Contudo, além das frações supracitadas, o carbono da biomassa microbiana (CBMS) bem como o C e N mineralizáveis são frações dinâmicas, biologicamente ativas da MOS, responsivas aos manejos utilizados nos sistemas de produção (FRANZLUEBBERS et al., 2000), e, alguns fatores como mudanças sazonais de umidade e temperatura do solo, adição de C orgânico por restos culturais de raízes e parte aérea, exsudatos radiculares, dentre outros, exercem influência nessas frações, principalmente na biomassa microbiana e sua atividade (ROSS, 1987; FRANZLUEBBERS et al., 1994).

Franzluebbbers et al. (1994), em estudo realizado no Texas-EUA com a cultura do trigo, relataram que as alterações no C mineralizável seguiram o mesmo padrão das observadas no CBMS. Assim, o C mineralizável analisado por ocasião do florescimento, comparado ao analisado por ocasião do plantio do trigo, cultivado em SPD, foi em média 64, 28 e 15% superior, respectivamente, nas profundidades de 0 a 0,05 m, 0,05 a 0,12 m e 0,12 a 0,20 m. Os autores destacaram que esse elevado aumento relativo do C mineralizável na superfície do solo durante os meses em que não há limitação hídrica, entre o plantio e o florescimento, pode estar relacionado ao maior crescimento radicular em solo com alta concentração de nutrientes e ótima aeracão, e também à maior disponibilidade de substratos de fácil decomposição, pois durante o florescimento há maior exsudação radicular de compostos ricos em C (XU; JUMA, 1993; SWINEN et al., 1994). Durante a fase de maturidade fisiológica, a concentração desses compostos ricos em C orgânico, provavelmente, diminui, embora as raízes e os resíduos culturais adicionados por ocasião da colheita sejam novos substratos (BOTNER et al., 1988).

Franzluebbbers et al. (2000), em estudo realizado em condições de clima temperado nos EUA, relataram haver maiores concentrações, em área de pastagem por 20 anos, de COT (31%), nitrogênio total (34%), COP (66%), nitrogênio particulado (2,4 vezes) e CBMS (28%) na camada de 0 a 0,20 m, comparativamente, à área adjacente de lavoura há 24 anos em que realizava-se manejo conservacionista do solo.

Com relação às condições tropicais, os resultados das pesquisas realizadas nos solos tropicais brasileiros têm demonstrado a importância das gramíneas em

aumentar os estoques e sequestro de C. Segnini (2007) relatou haver maior estoque de C em área de pastagem de *Urochloa decumbens* comparativamente com área nativa de Cerrado, após 27 anos de experimento. O maior estoque de carbono verificado em área de pastagem foi favorecido pela constante entrada de material vegetal na superfície do solo, também influenciado pela adubação nitrogenada, além do sistema radicular vigoroso da gramínea. Rezende et al. (1999) relataram que após 10 anos de retirada da vegetação nativa de cerrado e instalação da *Urochloa humidicola*, o estoque de MOS foi repostado pela forrageira e tendeu a aumentar, por meio da decomposição de seus resíduos de parte aérea e raízes.

Barber e Navarro (1994) verificaram que o *Panicum maximum* e a *Urochloa brizantha* foram eficientes em aumentar o teor de matéria orgânica em um solo degradado. Ainda segundo os autores, a *Urochloa brizantha* foi a melhor opção a ser introduzida na rotação cultura-pastagem para melhorar a qualidade do solo devido a maior quantidade e distribuição de biomassa radicular dessa espécie. Dentro desse contexto, Salton et al. (2011) relataram que as espécies do gênero *Urochloa* utilizadas no sistema de Integração Lavoura pecuária, são altamente eficientes em adicionar C ao sistema, tanto na superfície quanto no perfil do solo.

Em razão da preocupação cada vez maior em reduzir a emissão dos gases com potencial de efeito estufa, existe interesse em identificar sistemas de manejo de plantas que favoreçam não só o aporte de C, mas que promovam a estabilidade da MOS. Contudo, as rotações de culturas graníferas com espécies forrageiras em SPD possuem elevado potencial de acumular C em frações mais estáveis, devido à grande quantidade de material vegetal proveniente das raízes e parte aérea dessas forrageiras que são adicionados em superfície e em subsuperfície no solo. A ação dos microrganismos com o tempo pode transformar esse material orgânico adicionado em materiais recalcitrantes, pois como relatado por diversos autores, o fluxo contínuo de compostos orgânicos liberados através da decomposição dos resíduos vegetais e pela atividade microbiana podem resultar na formação de complexos organominerais estáveis (BAYER et al., 2000; SÁ et al., 2001; SÁ; LAL, 2009).

Briedis et al. (2012c) e Castro et al. (2015) verificaram acúmulo de C na fração COAM, em seus estudos de longa duração em SPD, por consequência da aplicação superficial de corretivos da acidez do solo, portanto, além da identificação de sistemas de produção, o manejo adequado do sistema de produção, como exemplo a

correção da acidez do solo em SPD, também interfere no acúmulo do C em frações estáveis da matéria orgânica.

A correção da acidez acelera a decomposição da matéria orgânica do solo por aumentar a atividade microbiana (YAO et al., 2009), mas a longo prazo a concentração de C do solo aumenta devido às melhores condições edáficas proporcionadas por essa prática, resultando em maior produção vegetal e aporte de resíduos vegetais ao solo (BRIEDIS et al., 2012b). Além disso, a aplicação superficial dos corretivos sem o revolvimento do solo permite que os agregados do solo sejam mantidos, prevenindo a decomposição acelerada da MOS (CAIRES et al., 2006).

## **5. MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1. Localização e caracterização climática da área experimental**

O presente experimento desenvolvido durante os anos agrícolas 2011/12 e 2012/13 é continuação de um experimento que vem sendo conduzido desde 2006 na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agrônômicas – UNESP, localizada no município de Botucatu (SP), apresentando como coordenadas geográficas 48° 23' de longitude Oeste de Greenwich e 22° 51' de latitude Sul, com altitude de 765 metros.

O solo do local é do tipo Latossolo Vermelho distroférico típico argiloso (EMBRAPA, 2006). A área experimental vem sendo cultivada no SPD desde o ano agrícola 2002/2003 e em 2006 foram aplicados pela primeira vez os tratamentos utilizados no presente experimento. Antes da instalação do experimento realizaram-se as análises de química do solo, até 0,60m de profundidade; textura do solo, até 0,40m de profundidade; densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (Mic) e macroporosidade (Mac) do solo até 0,60m de profundidade (Tabela 3); diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA) até 0,10m de profundidade, cujos resultados estão contidos nas Tabelas 1, 2, 3, 4. As análises químicas foram realizadas de acordo com a metodologia proposta por Raij et al. (2001) e as físicas de acordo com Embrapa (1997) e Kiehl (1979).

De acordo com a classificação de Köeppen, o clima predominante na região é do tipo Cwa, que caracteriza 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.

Tabela 1. Características químicas iniciais do solo avaliadas de 0 a 0,60m de profundidade em 2006.

Prof. (m)	Caracterização da área									
	P <sub>resina</sub> mg dm <sup>-3</sup>	M.O. g dm <sup>-3</sup>	pH CaCl <sub>2</sub>	K	Ca	Mg	H+Al	Al	Si mg dm <sup>-3</sup>	V %
0-0,05	9	23	4,7	2,1	21	9	50	4	7,5	26
0,05-0,10	8	19	4,4	1,1	11	6	69	6	6,3	25
0,10-0,20	2	18	4,0	0,6	10	4	61	5	6,2	24
0,20-0,40	3	17	4,0	0,7	12	4	64	6	6,0	24
0,40-0,60	2	15	4,0	0,6	9	4	80	12	6,7	22
0-0,20	4	18	4,2	0,8	12	6	54	4	6,2	24

Tabela 2. Caracterização granulométricas do solo da área experimental realizada em 2006.

Prof. (m)	Areia	Argila	Silte	Textura do solo
	-----g kg <sup>-1</sup> -----			
0-0,10	489	415	96	Argilosa
0,10-0,20	435	462	103	Argilosa
0,20-0,40	385	509	106	Argilosa

Tabela 3. Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA) do solo por ocasião da caracterização da área experimental realizada em 2006.

Prof. (m)	DMP	DMG	IEA%
	-----mm-----		
0-0,05	2,92	2,81	99,18
0,05-0,10	2,88	2,73	99,11

Tabela 4. Densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), microporosidade (Mic) e macroporosidade (Mac) do solo, por ocasião da caracterização da área experimental realizada em 2006.

Prof. (m)	Ds	Pt	Mic	Mac
	-----Mg m <sup>-3</sup> -----	-----cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> -----		
0-0,05	1,38	0,40	0,33	0,07
0,05-0,10	1,41	0,38	0,31	0,07
0,10-0,20	1,40	0,42	0,33	0,09
0,20-0,40	1,25	0,43	0,33	0,10
0,40-0,60	1,17	0,47	0,34	0,13

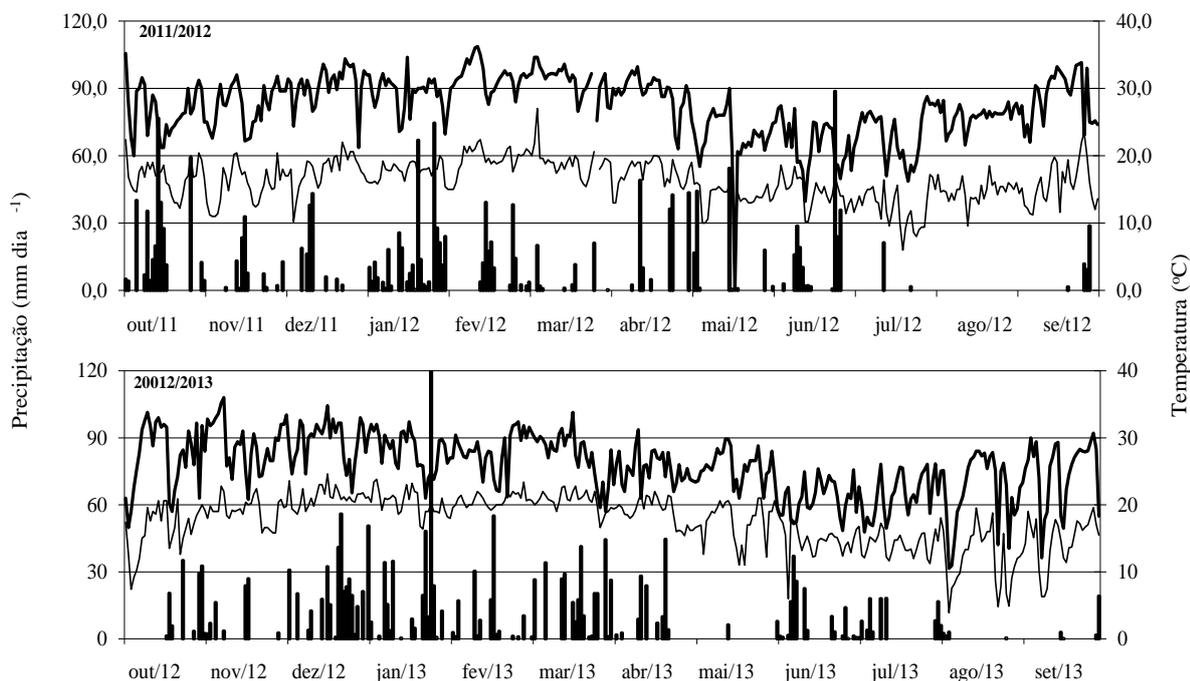


Figura 1. Precipitação pluvial (■), temperaturas máxima (—) e mínima (---), registradas durante a condução do experimento, nos anos agrícolas de 2011/12 e 2012/13.

## 5.2. Histórico da área experimental

A área experimental vem sendo cultivada no sistema plantio direto desde o ano agrícola 2002/2003 e desde 2006 ela mantém os tratamentos utilizados no presente experimento. A presente tese deu continuidade ao projeto de pesquisa de longa duração, que fez parte da dissertação de mestrado e tese de doutorado de Castro (2009; 2012).

Os sistemas de produção de grãos escolhidos representam a grande maioria das áreas cultivadas com culturas graníferas atualmente no Estado de São Paulo e no Cerrado brasileiro, os quais foram: safra consorciada com forrageira, safra-safrinha, safra-pousio, safra-adubo verde. Na Tabela 5 verificam-se todas as culturas utilizadas em cada sistema de produção desde o início da instalação do experimento em 2006.

Tabela 5. Esquema das rotações de culturas de 2006 a 2013 que compuseram os sistemas I (safra-forrageira), II (safra-safrinha), III (safra-adubo verde) e IV (safra-pousio).

	Sistema I (forrageira)	Sistema II (safrinha)	Sistema III (pousio)	Sistema IV (adubo verde)
2006				
Entressafra	-	-	-	-
Safra	soja	soja	soja	soja
2007				
Entressafra	<i>U.ruziziensis</i>	aveia branca	pousio	milheto
Safra	milho	milho	milho	milho
2008				
Entressafra	<i>U.ruziziensis</i>	feijão	pousio	guandu
Safra	arroz	arroz	arroz	arroz
2009				
Entressafra	<i>U.ruziziensis</i>	mamona	pousio	crotalária
Safra	soja	soja	soja	soja
2010				
Entressafra	<i>U.ruziziensis</i>	sorgo	pousio	milheto
Safra	milho	milho	milho	milho
2011				
Entressafra	<i>U.ruziziensis</i>	crambe	pousio	tremoço
Safra	feijão	feijão	feijão	feijão
2012				
Entressafra	<i>U.brizantha</i>	trigo	pousio	milheto
Safra	arroz	arroz	arroz	arroz
2013				
Entressafra	<i>U.brizantha</i>	trigo	pousio	crotalária
Safra	-	-	-	-

### 5.3. Delineamento experimental e tratamentos.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados dispostos em esquema de parcelas subdivididas. As parcelas foram constituídas por quatro sistemas de produção (Sistema I – “Safra – Forrageira”; Sistema II – “Safra – Safrinha”; Sistema III – “Safra – Pousio”; IV – “Safra - Adubo Verde”) e as subparcelas por duas fontes de

corretivos e um controle (calcário, silicato e sem corretivo), totalizando 12 tratamentos com quatro repetições.

As parcelas tiveram 5,4 m de largura e 30 m de comprimento, totalizando 162 m<sup>2</sup>, enquanto as subparcelas tiveram 5,4 m de largura e 10 m de comprimento, totalizando 54 m<sup>2</sup>. A área útil foi constituída pelas linhas centrais, desprezando-se uma linha de cada lado das subparcelas e 1m em ambas as extremidades.

As sucessões de culturas seguiram o seguinte esquema:

### **Sistema “Safra consorciada com Forrageira”**

#### Ano agrícola 2011/12

Feijão semeado em novembro de 2011/*Urochloa brizantha* semeada em março de 2012.

#### Ano agrícola 2012/13

Arroz semeado em novembro de 2012 /*Urochloa brizantha* semeada em abril de 2013.

### **Sistema “Safra – safrinha”**

#### Ano agrícola 2011/12

Feijão semeado em novembro de 2011 /Trigo semeado em março de 2012.

#### Ano agrícola 2012/13

Arroz semeado em novembro de 2012 /Trigo semeada em abril de 2013.

### **Sistema “Safra – Pousio”**

#### Ano agrícola 2011/12

Feijão semeado em novembro de 2011 /Pousio (da colheita do feijão até novembro de 2012).

#### Ano agrícola 2012/13

Arroz semeado em novembro de 2012 /Pousio (da colheita do arroz até novembro de 2013).

### **Sistema “Safra – Adubo Verde/Planta de Cobertura”**

#### Ano agrícola 2011/12

Feijão semeado em novembro de 2011 / Milheto semeado em março de 2012.

#### Ano agrícola 2012/13

Arroz semeado em novembro de 2012 /Crotalária semeada em abril de 2013.

#### 5.4. Critérios para aplicação e características dos corretivos de acidez do solo

Antes do início da continuidade do presente estudo de longa duração, em dezembro de 2010, foram feitas amostragens do solo até 0,20 m para verificar os valores da saturação por bases, e constatou-se que os valores estavam baixos e seria necessária a aplicação dos corretivos da acidez do solo novamente.

Como critério para a nova aplicação dos corretivos, foram comparados os valores das saturações por bases dos sistemas de produção estudados em que a acidez do solo foi corrigida em 2006 com calcário (corretivo de acidez padrão) e verificou-se que o menor valor era de  $V=36\%$  no sistema safra consorciada com forrageira (Tabela 6).

Em razão da menor saturação por bases do solo ter sido observada no sistema safra-forrageira foram utilizados os valores da saturação por bases e CTC desse sistema para o cálculo das quantidades dos corretivos, silicato e calcário, que foram aplicados em outubro de 2011.

Tabela 6. Valores da saturação por bases (V%) e capacidade de troca catiônica (CTC) na camada de 0 a 0,20 m do solo verificados em dezembro de 2010 nos 4 sistemas de produção estudados onde a correção da acidez do solo foi realizada em 2006 por meio da aplicação do calcário

Sistemas	Corretivo	V%	CTC (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )
Forrageira	Calcário	36	102,83
Safrinha	Calcário	46	109,09
Adubo Verde	Calcário	51	115,54
Pousio	Calcário	39	101,86

Foram utilizados o calcário (PN = 93%, RE = 83%, PRNT = 74%, CaO = 35% e MgO = 12%) e o silicato de cálcio e magnésio (PN = 93%, RE = 86%, PRNT = 66%, CaO = 32%, MgO = 9% e SiO<sub>2</sub> = 22%), uma escória de siderurgia previamente tratada para comercialização.

Para ambos os corretivos da acidez do solo as doses foram calculadas pelo método da saturação por bases proposto por RAIJ et al. (1997), onde a

necessidade de calcário foi calculada pela fórmula:  $NC \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)} = CTC (V_2 - V_1) / 10 \text{ PRNT}$ , sendo a CTC a capacidade de troca de cátions do solo, expressa em  $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , o  $V_2$  a saturação por bases esperada e o  $V_1$  a saturação por bases do solo, ambos expressos em porcentagem, e o PRNT o poder relativo de neutralização total, também expresso em porcentagem.

O calcário utilizado foi proveniente de Taguaí-SP, pois se assemelhava mais ao silicato no que diz respeito aos teores de cálcio e magnésio. Assim, em outubro de 2011, foram aplicados, manualmente,  $4,7 \text{ Mg ha}^{-1}$  do calcário dolomítico e  $5,3 \text{ Mg ha}^{-1}$  do silicato de cálcio e magnésio, após correção do teor de água dos produtos, nas unidades experimentais pré-estabelecidas dos quatro sistemas de produção estudados no início do presente estudo de longa duração. Além das fontes de corretivos da acidez do solo, houve também o tratamento controle que não recebeu aplicação de corretivos.

## **5.5. Condução do experimento**

Todas as operações de semeadura abaixo descritas 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 colheita das culturas foi realizada mecanicamente com o auxílio de uma colhedora automotriz de parcela, modelo Nurserymaster da Wintersteiger.

### **5.5.1. Culturas de verão – Safra**

As culturas de verão foram semeadas e conduzidas da seguinte forma:

#### **5.5.1.1. Feijão (Safra 2011/12)**

No dia 22 de novembro de 2011 foi realizada a dessecação das plantas presentes na área com a utilização do herbicida glyphosate, na dose de 1800 gramas do ingrediente ativo (i. a.)  $\text{ha}^{-1}$ , utilizando volume de aplicação de  $250 \text{ L ha}^{-1}$ . No dia 29 de novembro de 2011 foi realizada a semeadura do feijão. Utilizou-se 17 sementes

viáveis por metro no espaçamento de 0,45 m entrelinhas da cultivar IAC formoso, a qual possui hábito de crescimento indeterminado, ciclo semi-precoce com 85 dias da emergência à maturação fisiológica, porte de planta semi-ereto, tolerância ao vírus do mosaico dourado do feijoeiro e à *Fusarium solani*, resistência a antracnose e a mancha angular (CARBONELL et al., 2010). As sementes foram previamente tratadas com fungicida (Vitavax + Thiram – 50 + 50 g do i.a. por 100 kg de sementes). Para a adubação de base nos sulcos foram utilizados 375 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 08-28-16 (NPK), levando-se em conta as características químicas do solo e as recomendações para a cultura (AMBROSANO et al., 1997). A emergência das plântulas ocorreu no dia 10 de dezembro de 2011. A adubação de cobertura foi feita de maneira parcelada, aplicando-se 60 e 40 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente, aos 24 e 36 dias após a emergência (DAE), na forma de nitrato de amônio. O florescimento pleno da cultura ocorreu com aproximadamente 50 DAE. O controle das plantas daninhas foi feito com a pulverização do herbicida fluazifope-P-butílico + fomesafen aos 25 e 32 DAE, sendo a dose utilizada em ambas as aplicações de 100 + 125 g i.a ha<sup>-1</sup>. Para o controle das pragas foram realizadas aplicações de Lufenurom (7,5 g ha<sup>-1</sup> do i.a.), Lambda-cialotrina+Tiametoxam (20 + 28 g ha<sup>-1</sup> do i.a., respectivamente), Acefato (750 g ha<sup>-1</sup> do i.a.), Lufenurom (7,5 g ha<sup>-1</sup> do i.a.), Flubendiamida (38,4 g ha<sup>-1</sup> do i.a.), Espinosade (96 g ha<sup>-1</sup> do i.a.) e Lambda-cialotrina+Tiametoxam (20 + 28 g ha<sup>-1</sup> do i.a), respectivamente, aos 25, 40, 55, 65, 75, 85 e 95 DAE. Para o controle das doenças foram realizadas aplicações de Trifloxistrobina+Propiconazol (25 + 25 g ha<sup>-1</sup> do i.a), Hidróxido de Fentina (400 g ha<sup>-1</sup> do i.a.), Thiophanate methyl + Chlorothalonil (700 + 700 g ha<sup>-1</sup> do i.a), respectivamente, aos 25, 65 e 85 DAE. A colheita foi realizada no dia 12 de março de 2012.

#### **5.5.1.2. Arroz (Safrá 2012/13)**

No dia 28 de outubro de 2012 foi realizada a dessecação das plantas presentes na área com a utilização do herbicida glyphosate, na dose de 1800 g do i.a. ha<sup>-1</sup>, utilizando volume de aplicação de 250 L ha<sup>-1</sup>. No dia 14 de novembro de 2012 foi realizada a semeadura do arroz. Foram utilizadas 80 sementes viáveis por metro da cultivar cambará, a qual possui ciclo de 105 dias, porte médio e resistência ao acamamento, no espaçamento de 0,35 m entrelinhas. As sementes foram previamente tratadas com fungicida (Vitavax + Thiram – 50 + 50 g do i.a. por 100 kg de sementes). A adubação de

semeadura constou da aplicação de 300 kg ha<sup>-1</sup> da formulação 08-28-16 (NPK), levando-se em conta as características químicas do solo e as recomendações para a cultura do arroz (CANTARELLA; FURLANI, 1997). A emergência de plântulas ocorreu no dia 20 de novembro de 2012. A adubação de cobertura foi realizada aos 30 DAE, aplicando-se 80 kg ha<sup>-1</sup> de N na forma de uréia na entrelinha da cultura. Para o controle de plantas daninhas foram aplicados os herbicidas propanil (4230 g i.a ha<sup>-1</sup>), clomazona (640 g i.a ha<sup>-1</sup>) e 2,4-D (ácido 2,4 diclorofenoxiacético), respectivamente, aos 24, 35 e 50 DAE. Para o controle de pragas foram realizadas duas aplicações do inseticida Lambda-cialotrina+Tiametoxam (21 + 28 g ha<sup>-1</sup> do i.a.) aos 56 e 79 DAE e para o controle de doenças foram aplicados os fungicidas tebuconazole (150 g ha<sup>-1</sup> do i.a) e difeconazole (75 g ha<sup>-1</sup> do i.a) respectivamente, aos 53, 85 DAE. O florescimento das plantas ocorreu com aproximadamente 90 DAE. A colheita foi realizada no dia 4 de abril de 2013.

### **5.5.2. Cultura de safrinha**

O trigo foi semeado e conduzido nas duas entressafras dos dois anos agrícolas estudados da seguinte forma:

#### **5.5.2.1. Trigo (Safrinha de 2012)**

No dia 22 de março de 2012 foi realizada a semeadura do trigo. Foram utilizadas 176 kg ha<sup>-1</sup> de sementes da cultivar CD 150, no espaçamento de 0,17m entrelinhas. Não foi feita a adubação de semeadura, pois a cultura se beneficiou do efeito residual da adubação realizada na cultura do feijão. As plântulas emergiram no dia 28 de março de 2012. Aos 27 DAE, foi necessária a aplicação de 0,5 L ha<sup>-1</sup> do herbicida 2,4-D para o controle das plantas daninhas. Aos 30 DAE foi feita a adubação de cobertura com 40 kg ha<sup>-1</sup> de N, aplicados na forma de nitrato de amônio. Para o controle das pragas foi feita uma aplicação aos 60 DAE com o inseticida Lambda-cialotrina+Tiamethoxam (20 + 28 g ha<sup>-1</sup> do i.a.), e para o controle preventivo de doenças foram feitas aplicações com Azoxistrobina+Ciproconazole (100 + 40 g ha<sup>-1</sup> do i.a., respectivamente) e piraclostrobin + epoxiconazole (133 + 50 g ha<sup>-1</sup> do i.a., respectivamente), aos 50 e 65 DAE, respectivamente. O florescimento da cultura do trigo ocorreu aos 40 DAE e a colheita foi realizada no dia 19 de julho de 2012.

### **5.5.2.2. Trigo (Safrinha de 2013)**

No dia 17 de abril de 2013 foi realizada a semeadura do trigo. Foram utilizadas 160 kg ha<sup>-1</sup> de sementes da cultivar CD 116, no espaçamento de 0,17m entrelinhas. Não foi feita a adubação de semeadura, pois a cultura se beneficiou do efeito residual da adubação realizada na cultura do arroz. As plântulas emergiram no dia 25 de abril de 2013. Não foram necessárias aplicações de herbicidas bem como a adubação de cobertura. Para o controle das pragas foi feita uma aplicação aos 60 DAE com o inseticida lambda-cialotrina+tiamethoxam (20 + 28 g ha<sup>-1</sup> do i.a.), e para o controle preventivo de doenças foram feitas aplicações com azoxistrobina+ciproconazole (100 + 40 g ha<sup>-1</sup> do i.a., respectivamente) e piraclostrobina + epoxiconazole (133 + 50 g ha<sup>-1</sup> do i.a., respectivamente), aos 50 e 65 DAE, respectivamente. O florescimento da cultura do trigo ocorreu aos 60 DAE e a colheita foi realizada no dia 22 de agosto de 2013.

### **5.5.3. Adubos verdes/Plantas de cobertura**

Para as culturas do sistema Safra-Adubo verdes/Plantas de cobertura, salienta-se que não foi realizada adubação de semeadura e de cobertura. Durante o ciclo das culturas, não foi necessário o uso de defensivos agrícolas para o controle de pragas, doenças ou plantas daninhas, pois nenhuma delas chegou ao nível de dano econômico. O milheto e a crotalária foram semeadas e conduzidas da seguinte forma:

#### **5.5.3.1. Milheto (Adubo verde de 2012)**

No dia 22 de março de 2012 foi realizada a semeadura do milheto. Foram utilizadas 25 kg ha<sup>-1</sup> de sementes da cultivar ADR 300, no espaçamento de 0,17m entrelinhas. A emergência das plântulas ocorreu no dia 28 de março de 2012. Por ocasião do florescimento (52 DAE) as plantas de milheto foram manejadas com triturador de palha horizontal, e posteriormente, esperou-se a cultura rebrotar e florescer novamente (130 DAE), quando foi novamente triturada e aos 191 DAE foi feita a dessecação da mesma.

### **5.5.3.2. Crotalária (Adubo verde de 2013)**

A *Crotalaria spectabilis* foi semeada no dia 17 de abril de 2013 no espaçamento de 0,17 m, utilizando-se 12 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. No dia 25 de abril e 2013 as plântulas emergiram e o florescimento ocorreu aos 110 DAE e, em seguida, as plantas foram manejadas com triturador de palha horizontal.

### **5.5.4. Forrageira perene - *Urochloa brizantha***

Para as culturas do sistema Safra-Forrageira perene, salienta-se que não foi realizada adubação de semeadura. Durante o ciclo das culturas, não foi necessário o uso de defensivos agrícolas para o controle de pragas, doenças ou plantas daninhas, pois nenhuma delas chegou ao nível de dano econômico. A implantação e a condução da forrageira perene em sucessão às culturas graníferas no sistema Safra – Forrageira estão descritas abaixo:

#### **5.5.4.1. Feijão – *Urochloa brizantha***

A *Urochloa brizantha* cv Marandu foi semeada no dia 22 de março de 2012 no espaçamento de 0,17 m, semeando-se 15 kg ha<sup>-1</sup>. A emergência das plântulas ocorreu no dia 28 de março de 2012. Aos 130 DAE a forrageira foi manejada com triturador de palha horizontal e aos 191 DAE foi feita a dessecação da mesma.

#### **5.5.4.2. Arroz – *Urochloa brizantha***

A *Urochloa brizantha* cv Marandu foi semeada no dia 17 de abril de 2013 no espaçamento de 0,17 m, semeando-se 15 kg ha<sup>-1</sup>. A emergência das plântulas ocorreu no dia 25 de abril de 2013.

### **5.5.5. Pousio**

Neste sistema, a área permaneceu em pousio entre a colheita da safra de verão e a semeadura da mesma safra no ano seguinte, permanecendo somente as plantas daninhas em livre crescimento durante a entressafra.

## **5.6. Amostragens e avaliações realizadas**

### **5.6.1. Atributos químicos do solo**

As características químicas do solo (pH, Matéria Orgânica, H+Al, P, K, Ca, Mg, Al<sup>+3</sup> e Si) foram determinadas aos 12 meses (outubro de 2012) e 24 meses (outubro de 2013) após a última aplicação dos corretivos da acidez do solo, nas camadas de 0-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,40 m e 0,40-0,60 m. Foram retiradas aleatoriamente, sempre na entrelinha da cultura antecessora, seis amostras simples na área útil de cada subparcela, para constituir uma amostra composta, com auxílio de trados do tipo tubular fechado. As amostras compostas foram secas e peneiradas (malha 2 mm) e analisadas seguindo metodologia proposta por Raij et al. (2001) com exceção ao silício, onde seguiu-se a metodologia proposta por Korndörfer et al. (1999) utilizando-se como extrator o cloreto de cálcio.

### **5.6.2. Atributos físicos do solo**

Em outubro de 2013, foram coletadas em trincheiras abertas em cada subparcela amostras de solo com estrutura não deformada para determinação da densidade do solo (Ds), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total (Pt), por meio de anéis volumétricos com 0,05 m de diâmetro e 0,05m de altura. As amostras foram retiradas em duplicata no centro das camadas de 0-0,05 m, 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m. No laboratório as amostras em anéis volumétricos foram colocadas para saturar em bandejas plásticas com água até 2/3 da altura dos anéis por 48 horas. 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 0,05m de altura, 0,10m de largura e 0,15m de comprimento. Foram coletadas quatro amostras de solo por subparcela no centro das camadas de 0-0,05m, 0,05-0,10m e 0,10-0,20m. 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 minutos. 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 umidade das amostras de solo 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), que sugerem para o cálculo de DMP, DMG e IEA as seguintes equações:

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

$$DMG = (\exp \sum_{i=1}^n (w_p \cdot \log x_i)) / (\sum_{i=1}^n w_i)$$

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

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.

A resistência do solo à penetração foi obtida das amostras indeformadas coletadas com anel de aço inox de 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro. Estas amostras foram as mesmas utilizadas para determinação da macroporosidade, ou seja, após serem submetidas a 0,006 MPa na mesa de tensão.

A determinação foi realizada por meio do implemento Texture Analyzer da marca Brookfield em modo remoto, e os dados foram descarregados em tempo real através do software TexturePro CT V1.4. A velocidade utilizada no teste foi de 0,20 mm s<sup>-1</sup>, utilizando-se uma haste provida de uma ponta cônica de 0,0934 cm<sup>2</sup>, a taxa de amostragem foi de 10 pontos s<sup>-1</sup>. Após o teste foram utilizadas apenas as leituras obtidas entre 0,01 e 0,04 m da altura do anel de aço inox, ou seja, foram desconsiderados 0,01 m do extremo superior e 0,01 m do extremo inferior da porção de solo contida no anel de aço inox.

### 5.6.3. Quantidade acumulada de massa de matéria seca

Para interpretação dos dados do carbono e nitrogênio mineralizáveis, carbono da biomassa microbiana bem como do fracionamento físico da matéria orgânica do solo, determinou-se a quantidade de matéria seca acumulada referente aos resíduos das culturas que foram depositados na superfície do solo em função dos tratamentos, desde o início de condução do experimento, ou seja, de 2006 a 2013. Os resultados foram transformados em Mg ha<sup>-1</sup>.

#### **5.6.4. Carbono e nitrogênio total e mineralizável, carbono da biomassa microbiana e fracionamento físico da matéria orgânica do solo – Universidade Estadual Da Carolina Do Norte – EUA.**

Em outubro de 2013 foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade para a realização das análises referentes à matéria orgânica do solo. As amostras de solo foram secas em temperatura ambiente, e posteriormente, o solo foi cuidadosamente moído para passar por peneira de 4,75 mm, e, posteriormente, armazenado em local com temperatura ambiente até o momento em que as amostras foram enviadas para a Universidade Estadual da Carolina do Norte. Posteriormente, foram feitas as análises do carbono e nitrogênio total e mineralizável, carbono da biomassa microbiana e o fracionamento físico da matéria orgânica do solo nas dependências do Soil Ecology and Management Laboratory (Departamento de Ciência do Solo - NCSU) e Ligon Laboratory (USDA-ARS), sob responsabilidade do Prof. Dr. Alan Franzluebbers.

#### **5.6.5. Análises do C e N total, mineralizável, C da biomassa microbiana, fracionamento físico da matéria orgânica e estoque de C.**

##### **5.6.5.1. C e N total**

Inicialmente, foram separadas amostras de 30 g de solo as quais foram moídas em moinho de bola por 5 minutos e, posteriormente, os teores totais de N e C foram analisados por meio do analisador elementar Leco TruSpec.

##### **5.6.5.2. C mineralizável e C da biomassa microbiana**

O C mineralizável foi determinado a partir de subamostras de 50 g de solo colocadas em frascos de vidro, em duplicata. Posteriormente, adicionou-se água deionizada até 50% do espaço poroso ser preenchido e em seguida as amostras foram colocadas em frasco de vidro maior com capacidade de 1 L, onde também foram adicionados um frasco de plástico com 10 ml de NaOH 1M para capturar CO<sub>2</sub> emitido e outro frasco de plástico contendo 10 ml de água deionizada para manter a umidade.

Posteriormente, os frascos com capacidade de 1L foram devidamente tampados e levados ao incubador a 25°C.

O cálculo da quantidade de água necessária para ocupar 50% da porosidade do solo foi realizado por meio da seguinte equação:

$$\text{mL H}_2\text{O} = 0,50 \times \text{porosidade} \times \text{volume ocupado pelo solo}$$

$$\text{onde, porosidade} = 1 - (\text{densidade do solo}/2,65)$$

Como os 50 g de solo foram acondicionados dentro do frasco de vidro graduado até a marca de 40 cm<sup>3</sup>, a densidade do solo foi igual a 1,25 g cm<sup>-3</sup> (50g/40 cm<sup>3</sup>), o valor da porosidade foi de 0,53 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, portanto a quantidade de água calculada para ocupar 50% da porosidade foi de 10,6 mL.

As soluções alcalinas (10 ml de NaOH 1M) foram trocadas aos 3 e 10 dias e removidas aos 24 dias de incubação, e assim que retiradas foram devidamente vedadas para posterior realização da titulação.

O procedimento analítico adotado para titulação foi o seguinte: na solução alcalina foram adicionados 3 ml de BaCl<sub>2</sub>, formando BaCO<sub>3</sub> como precipitado. Posteriormente, as soluções foram agitadas e adicionou-se 3 gotas de fenolftaleína (indicador) resultando na coloração rósea, e por fim foi feita a titulação com HCL 1 M até a coloração passar de rósea para incolor (ANDERSON, 1982).

Aos 10 dias de incubação, uma das subamostras de 50 g de solo foi removida, passou pelo processo de fumigação com clorofórmio, para posterior determinação do C da biomassa microbiana. Para o processo de fumigação as subamostras foram colocadas em dessecadores a vácuo, mantidas dentro de capela de exaustão de gases, onde foram adicionados em cada dessecador um frasco com 30 ml de clorofórmio. Posteriormente, os dessecadores foram vedados e estabeleceu-se o vácuo nos dessecadores com o auxílio de bomba a vácuo, por aproximadamente 30 segundos até que o clorofórmio contido no frasco começasse a borbulhar. Após estabelecido o vácuo nos dessecadores, esses foram armazenados em local escuro. No dia seguinte, os frascos com clorofórmio foram removidos e as amostras de solo foram novamente incubadas por 10 dias a 25°C, em frasco de vidro com capacidade de 1 L contendo o frasco de vidro com 50 g de solo, frasco com 10 mL de água deionizada e frasco com 10 ml de NaOH 1M.

Transcorridos esses 10 dias de incubação das amostras fumigadas, os frascos com as soluções alcalinas foram removidos, devidamente tampados, e posteriormente titulados com HCL 1 M. Os frascos com as amostras de solo fumigados

foram levados a estufa para secar a 55<sup>0</sup>C, após 72 horas na estufa, foram transferidos para frascos de 125 ml para que posteriormente fosse realizado o fracionamento físico da matéria orgânica.

O cálculo da concentração do C da biomassa microbiana do solo a partir da titulação representando o período de 11 a 21 dias foi feito através da seguinte equação:

$$\text{CBMS (mg kg}^{-1}\text{)} = (\text{volume gasto para titular a amostra "branco"} - \text{volume gasto para titular amostra}) \times \text{Normalidade do HCL} \times 6 \times 1000 / (\text{g de solo}) / Kc$$

Onde: 6 é a massa equivalente do C e o Kc = 0,41 (fator de eficiência, conforme Voroney e Paul, 1984).

A determinação do C da biomassa microbiana seguindo a reumidificação do solo seco, com 10 dias de pré-incubação, resulta em estimativas equivalentes em comparação com determinações que utilizam amostras de solo com umidade de campo (FRANZLUEBBERS et al., 1996; FRANZLUEBBERS, 1999).

Com relação às amostras que não passaram pelo processo de fumigação com clorofórmio, que ainda estavam nos incubadores, aos 24 dias de incubação essas foram retiradas dos incubadores, levadas a estufa para secarem a 55<sup>0</sup>C por 72 horas, decorridos essas 72 horas passou-se o solo por peneira de malha de 2 mm e armazenou-se o mesmo para posterior análise do N. Quanto ao frasco com a solução alcalina foi devidamente tampado e em seguida titulados com HCL 1 M.

Equação utilizada para a análise do C mineralizável:

$$\text{C mineralizável (mg kg}^{-1}\text{)} = (\text{volume gasto para titular a amostra tida como "branco"} - \text{volume gasto para titular amostra}) \times \text{Normalidade do HCL} \times 6 \times 1000 / (\text{g de solo})$$

Observações: A amostra denominada "branco" foi obtida colocando-se dentro dos frascos de vidro com capacidade de 1L somente o frasco com 10 ml de água deionizada e 10 ml da solução alcalina, e incubando-se o mesmo a 25<sup>0</sup>C. Contudo, para cada período de titulação havia uma amostra "branco".

Somando-se os resultados obtidos nos períodos de incubação de 0 a 3, 3 a 10 e 10 a 24 foram obtidos os resultados em mg kg<sup>-1</sup> de solo 24 dias<sup>-1</sup>. As quantidades de solo em gramas utilizadas nos períodos de 0 a 3 e 3 a 10 dias de incubação foram de 100 g, porém no período de 11 a 24 dias utilizou-se 50 g para a análise do C da biomassa microbiana e também para o C mineralizável.

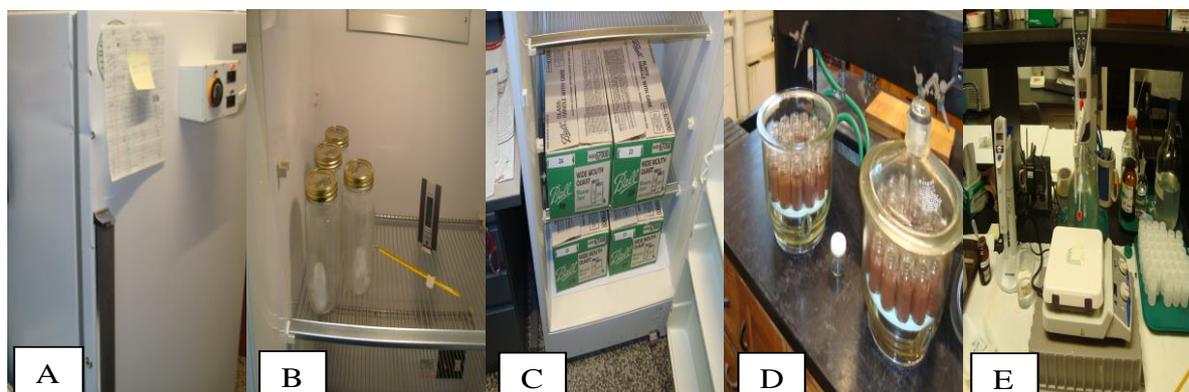


Figura 2. Incubador (A), Amostras “branco” referente a cada caixa e termômetros dentro do incubador (B), Caixas com capacidade para armazenar 25 frascos de 1L cada dentro do incubador (C), Amostras de solo acondicionadas nos dessecadores (D) e amostras prontas para serem tituladas (E).

#### 5.6.5.3. N mineralizável

O N mineralizável foi obtido por diferença do N total analisado antes da incubação e do N analisado após 24 dias de incubação.

Maiores detalhes sobre as metodologias utilizadas podem ser encontrados em Franzluebbers et al. (1996), Jenkinson e Powlson (1976) e Voroney e Paul (1984).

#### 5.6.5.4. Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

O fracionamento físico foi feito a partir da amostra previamente utilizada para análise do C da biomassa microbiana. Assim, após essa análise as amostras com 50 g de solo foram levadas a estufa a 55°C por 72 horas. Em seguida, foram adicionados a amostra 100 ml da solução dispersante ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$  a 10%) e posteriormente agitou-se por 16 horas as amostras em agitador horizontal. Posteriormente, a suspensão foi passada em peneira de 0,053 mm com auxílio de jato de água, sendo o material retido na peneira secado em estufa a 55°C por 72 horas. Então, o material foi pesado e moído em moinho de bola por 5 minutos e foram analisados os teores de C e N por combustão (analisador elementar Leco TruSpec), obtendo-se assim o C e N particulado. O carbono

orgânico associado aos minerais (COAM) foi calculado pela diferença entre o C orgânico total (COT) e o C orgânico particulado (COP). Também foi calculada a relação COP/COAM.

#### 5.6.5.4. Estoque de C

O estoque de carbono nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m foi calculado de acordo com a equação:

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

#### 5.6.6. Produção de massa de matéria seca de parte aérea e diagnose de macronutrientes e Si das culturas

No florescimento da maioria das culturas foram realizadas amostragens para a determinação da produção de massa de matéria seca da parte aérea e diagnose dos teores de macronutrientes e Si, exceto para a *Urochloa brizantha*, cujas coletas, da *Urochloa brizantha* semeada em 2012, foram realizadas antes do manejo com triturador de palha horizontal (130 DAE) e antes da dessecação aos 190 DAE, quando foi feita a coleta para se estimar a produção da massa de matéria seca de parte aérea. Aos 110 DAE foi feita a coleta da *Urochloa brizantha* semeada em 2013. Para tanto, procedeu-se a coleta de duas amostras em cada subparcela mediante um quadro de 0,25 m<sup>2</sup> e a ceifa das plantas rente ao solo. Para todas as demais culturas, foram coletadas 20 plantas por parcela para a determinação da produção da massa de matéria seca de parte aérea.

Para diagnose foliar da cultura do feijão foram coletadas 30 folhas (3<sup>a</sup> totalmente expandida a partir do ápice), conforme descrito por Ambrosano et al. (1997) e para as culturas do arroz e trigo foram coletadas 50 folhas bandeiras por unidade experimental (CANTARELLA; FURLANI, 1997). Para as culturas dos sistemas safradubo verde e safradubo forrageira, utilizou-se o mesmo material coletado para a determinação da massa de matéria seca de parte aérea.

Entretanto, como a cultura do milho floresceu aos 52 DAE e, em seguida, a cultura foi triturada com triturador de palha horizontal, esperou-se a cultura

rebrotar e devido à cultura ter florescido novamente, aos 130 DAE, foi realizada nova coleta da massa de matéria seca de parte aérea, e por último foi realizada amostragem antes da dessecação aos 190 DAE, quando determinou-se a produção de massa de matéria seca de parte aérea.

Todo material coletado foi acondicionado em sacos de papel devidamente identificados e levados para secagem em estufa de ventilação forçada à temperatura de 65 °C, até atingirem massa constante. Em seguida, as plantas foram pesadas para determinação da produção de massa de matéria seca de parte aérea. Os materiais utilizados para diagnose nutricional foram moídos e submetidos à análise para determinação dos teores dos nutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), segundo os métodos descritos por Malavolta et al. (1997), e de silício, segundo técnica descrita por Elliot e Snyder (1991) e adaptada por Korndörfer et al. (1999).

#### **5.6.7. Componentes da produção e produtividade de grãos**

Estas variáveis foram mensuradas somente para as culturas de safra e safrinha. Às vésperas da colheita, foi avaliada a população de plantas de feijão mediante a contagem das plantas contidas em duas linhas de 5 m na área útil das subparcelas e, posteriormente, os resultados foram convertidos para plantas por hectare, e o número de panículas e espigas por metro quadrado, respectivamente, de arroz e trigo, foi estimado mediante a contagem em 4 m, respectivamente, de quatro linhas de plantas na área útil da subparcela.

Na cultura do feijão, em 10 plantas por subparcela, foram determinados o número de vagens por planta, o número de grãos por vagem e a massa de 100 grãos. Para o arroz, em quinze panículas, foram determinados o número de espiguetas por panícula, a fertilidade das espiguetas (pela divisão do número de espiguetas granadas pelo número total de espiguetas) e a massa de 1000 grãos. Na cultura do trigo, em 15 espigas foi determinado o número de grãos por espiga e a massa de 1000 grãos.

As plantas da área útil de cada subparcela foram colhidas com o auxílio de uma colhedora automotriz de parcela, modelo Nurserymaster da Wintersteiger. Os grãos foram pesados e os dados transformados em kg ha<sup>-1</sup> para o teor de água de 130 g kg<sup>-1</sup> (base úmida).

### **5.7. Análise estatística**

Todos os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F. Para ambos os fatores as médias foram comparadas pelo teste t (LSD) a 5% de probabilidade, exceto para as médias referentes ao CBMS e ao C mineralizável que foram comparadas a 10% de probabilidade. Em caso de interação, os dados foram desdobrados. Utilizou-se o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2000).

## **6. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **6.1. Quantidade de massa de matéria seca acumulada**

Quanto aos sistemas de produção, as quantidades de massa de matéria seca acumulada desde o início da instalação do presente estudo de longa duração até dezembro de 2013 seguiram a seguinte ordem decrescente: sistema safra-forrageira> safra-adubo verde> safra-safrinha> safra-pousio. Com relação aos corretivos, verificou-se maior acúmulo de massa de matéria seca por consequência da aplicação do silicato e em seguida por consequência da aplicação do calcário, sendo a menor quantidade de massa de matéria seca acumulada observada no tratamento em que não foi realizada a correção da acidez do solo (Tabela 7).

Tabela 7. Quantidade de massa de matéria seca acumulada, em Mg ha<sup>-1</sup>, de 2006 a 2013, em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos da acidez do solo.

FV	Matéria seca acumulada
	Mg ha <sup>-1</sup>
<i>Sistemas</i>	
Forrageira	112,0 a
Safrinha	75,2 c
Adubo Verde	101,0 b
Pousio	45,3 d
<i>Corretivos</i>	
Controle	74,2 C
Silicato	89,8 A
Calcário	86,1 B
<u>Probabilidade de F</u>	
Sistema (S)	<0,001
Corretivo (C)	<0,001
S x C	0,320

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t (p<0,10).

## 6.2. Matéria orgânica do solo

Conforme a figura 3, aos 12 meses após a última aplicação dos corretivos, somente no sistema safra-safrinha os corretivos não exerceram influência nos teores de matéria orgânica do solo, porém, nos demais sistemas houve incremento dos teores de matéria orgânica do solo até a profundidade de 0,20 m.

Não houve efeito deletério das práticas corretivas quanto aos teores de matéria orgânica em função da elevação do pH acarretar em aumento da atividade microbiana, os quais promovem a mineralização da matéria orgânica dos solos (MOS) (ROSOLEM et al., 2003; FUENTES et al., 2006). Contudo, a aplicação de corretivos da acidez favorece a produção de fitomassa das culturas, tanto de raízes como de parte aérea, levando a maior adição de matéria orgânica (CONDRON et al., 1993).

Na amostragem realizada aos 24 meses após a última aplicação dos corretivos verificou-se que o efeito dos corretivos ficou restrito às camadas superficiais do solo (0-0,05 e 0,05 - 0,10 m) para o sistema safra-forrageira e na profundidade de 0,05-0,10 m no sistema safra-pousio (Figura 4).

De modo geral, em ambas as amostragens constatou-se que os maiores teores da MOS foram observados no sistema safra-forrageira conciliado com a

aplicação dos corretivos da acidez do solo (Figuras 3 e 4). É provável que as melhores condições químicas do solo promovidas por consequência da calagem e silicatagem tenham favorecido a produção de massa de matéria seca radicular e da parte aérea *Urochloa brizantha*, aumentando assim o teor de matéria orgânica até 0,20 m e 0,10 m, respectivamente, aos 12 e 24 meses após a última aplicação dos corretivos.

Ainda com relação ao sistema safra-forrageira conciliado com a aplicação dos corretivos, aos 12 meses após a última aplicação dos mesmos, o efeito da silicatagem foi mais pronunciado, possivelmente devido ao silicato ser 6,78 vezes mais solúvel que ao calcário (ALCARDE; RODELA, 2003), havendo maior teor da MOS por consequência da silicatagem, porém, aos 24 meses os teores de matéria orgânica no solo por consequência da aplicação dos corretivos foram semelhantes (Figuras 3 e 4).

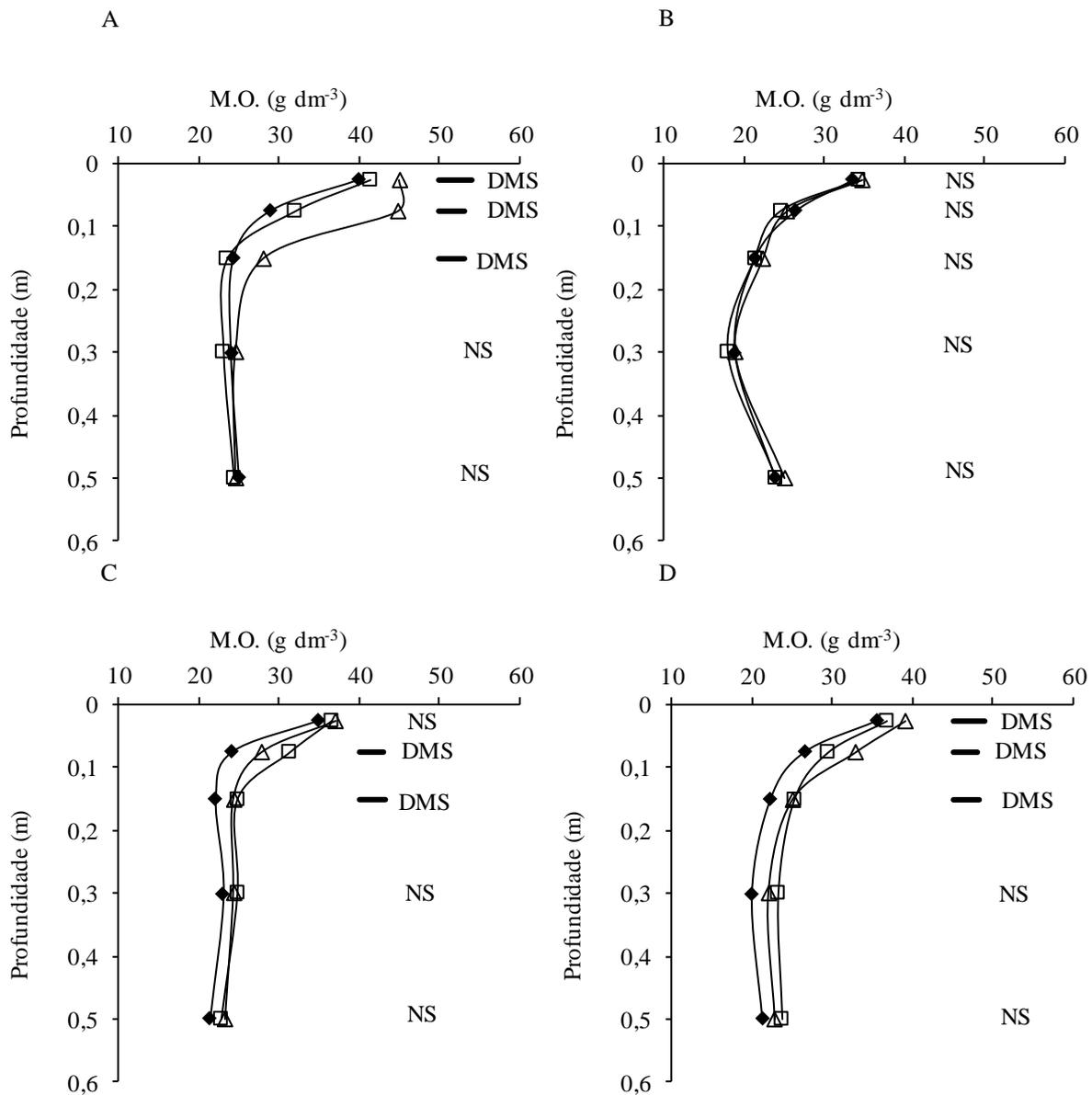


Figura 3. Valores de matéria orgânica (M.O.) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos corretivos da acidez do solo. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

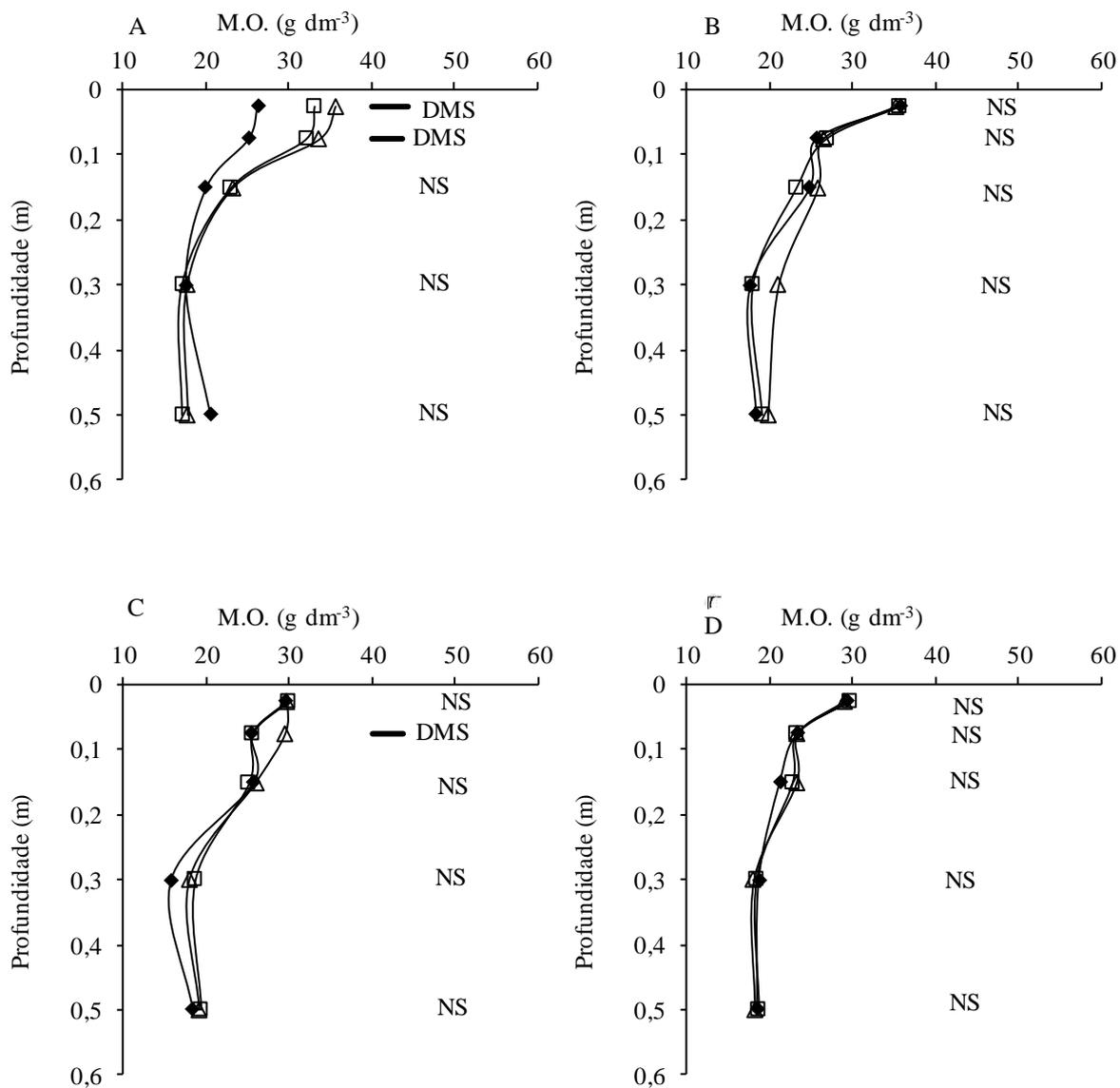


Figura 4. Valores de matéria orgânica (M.O.) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 24 meses após a última aplicação dos corretivos da acidez do solo. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

## **6.2. C e N total, mineralizável, carbono da biomassa microbiana (CBMS) e fracionamento físico da matéria orgânica do solo.**

Em geral, no sistema safra-forrageira foram observadas as maiores concentrações do C da biomassa microbiana do solo (CBMS) até a profundidade de 0,10 m, e, também do C mineralizável na camada superficial do solo de 0 a 0,05 m. Particularmente, na camada de 0 a 0,05 m, as concentrações do CBMS e do C mineralizável foram maiores com a aplicação do calcário comparativamente ao tratamento controle e com a aplicação do silicato (Tabela 9).

Quanto aos sistemas de produção, as maiores concentrações do CBMS e do C mineralizável observadas no sistema safra-forrageira, provavelmente ocorreram devido ao maior acúmulo de massa de matéria seca observado nesse sistema de produção, comparativamente, aos demais (Tabelas 7 e 9). Além disso nesse sistema de produção pode ter havido maior acréscimo de matéria orgânica pelas raízes das forrageiras, pois conforme relatado por Fujisaka et al. (1998) e Lal (2002), as pastagens possuem a maior parte do C armazenado abaixo da superfície do solo.

Contudo, o CBMS bem como o C mineralizável são frações dinâmicas, biologicamente ativas da MOS e responsivas aos manejos utilizados nos sistemas de produção (FRANZLUEBBERS et al., 2000; FRANZLUEBBERS, 2016), e, alguns fatores como mudanças sazonais de umidade e temperatura do solo, adição de C orgânico por restos culturais de raízes e parte aérea, exsudatos radiculares, dentre outros exercem influência nessas frações (ROSS, 1987; FRANZLUEBBERS et al., 1994).

Dentro desse contexto, um fator que pode ter influenciado os resultados observados no sistema safra forrageira, referentes ao CBMS e o C mineralizável na camada de 0 a 0,05 m, como já relatado anteriormente, foi a adição de matéria orgânica, tanto de raízes quanto de parte aérea, pelas forrageiras, pois as *Urochloas spp.* caracterizam-se por possuírem sistema radicular fasciculado, que possuem a habilidade de ocupar grande volume de solo, e, portanto, ao longo dos anos de condução do experimento, as raízes vivas ou em estado de decomposição e também os resíduos da parte

aérea das forrageiras liberaram compostos ricos em carbono que serviram como fonte de energia para a microbiota do solo.

Franzluebbers et al. (1994), em estudo realizado no Texas-EUA com a cultura do trigo, relataram que as alterações no C mineralizável seguiram o mesmo padrão das observadas no CBMS. Assim, o C mineralizável analisado por ocasião do florescimento, comparado ao analisado por ocasião do plantio do trigo cultivado em SPD, foi em média 64, 28 e 15% superior, respectivamente, nas profundidades de 0 a 0,05 m, 0,05 a 0,12 m e 0,12 a 0,20 m. Os autores destacaram que esse elevado aumento relativo do C mineralizável na superfície do solo durante os meses em que não houve limitação hídrica, entre o plantio e o florescimento, pode estar relacionado ao maior crescimento radicular da cultura em solo com alta concentração de nutrientes e ótima aeração, e também à maior disponibilidade de substratos de fácil decomposição, pois durante o florescimento há maior exsudação radicular de compostos ricos em C (XU;JUMA, 1993; SWINEN et al., 1994). Ainda foi relatado pelos autores que durante a fase de maturidade fisiológica, a concentração desses compostos ricos em C orgânico, provavelmente, diminui, embora as raízes e os resíduos culturais adicionados por ocasião da colheita sejam novos substratos (BOTTNER et al., 1988).

Contudo, no presente estudo as melhores condições edáficas promovidas pela inserção de forrageiras na rotação de culturas (safra-forrageira) como a maior microporosidade, a qual está diretamente relacionada com a capacidade de retenção de água do solo, e, também a maior quantidade de cobertura morta sobre o solo que evita que ocorram elevadas amplitudes térmicas no solo, provavelmente, favoreceram a atividade da microbiota do solo, influenciando diretamente os valores observados do CBMS e C mineralizável (Tabelas 7, 9 e 17), haja vista que diversos autores relataram a importância da umidade e temperatura do solo para a atividade microbiana (BERG, 2000; CATTELAN; VIDOR, 1990).

Com relação ao teor de água no solo, todos os microrganismos do solo necessitam de água para a absorção de nutrientes e, sendo os filmes de água os principais sítios de atividade microbiana do solo. Esses filmes de água com microrganismos podem ser denominados também de biofilmes, os quais estão localizados nas interfaces dos estados sólido – líquido, e líquido- gasoso (MOREIRA; SIQUEIRA,

2006; BURNS; 1986;1989). Quanto a temperatura do solo, as taxas das reações microbianas do solo são maiores a temperaturas ao redor de 28°C e, decrescem acentuadamente a temperaturas menores que 25 °C e maiores que 35 °C (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

As variáveis macroclimáticas e os atributos químicos do solo devem ser considerados em conjunto para que sejam explicadas as diferenças da atividade e dos teores do CBMS (WARDLE; 1992).

Apesar dos resultados dos valores de pH e dos teores de Mg da camada superficial do solo, 0 a 0,05 m, terem sido semelhantes por consequência das aplicações do calcário e do silicato aos 24 meses após a última aplicação dos corretivos, houve tendência dos valores dessas variáveis terem sido maiores por consequência da calagem em relação à silicatagem (Figuras 14 e 20). Logo, é possível que isso tenha resultado em maior atividade dos microrganismos que culminou em maior concentração do CBMS e do C mineralizável na camada mais superficial do solo (0 a 0,05 m). O aumento do pH pode ter favorecido a proliferação de microrganismos do solo e o maior teor de Mg pode ter sido utilizado para a nutrição desses microrganismos do solo.

Neale et al. (1997), em estudo em condições laboratoriais com a aplicação de calcário em solos ácidos, relataram que o aumento dos valores do pH ao redor de 6,0 a 6,5 fez com que os valores do CBMS aumentassem a valores próximos do dobro em comparação com solo que não foi corrigido com calcário aos 4 dias após a aplicação do corretivo na camada de 0 a 0,05 m, e isso ocorreu devido a proliferação de bactérias indígenas tolerantes a acidez do solo. Porém, com o passar do tempo esse efeito diminuiu, mas aos 100 dias após a aplicação do corretivo os valores do CBMS ainda eram superiores ao tratamento controle.

Com relação ao N mineralizável, os autores relataram que inicialmente houve mineralização do N, mas aos 34 dias após a aplicação do corretivo da acidez do solo, os valores eram semelhantes ou menores que o tratamento controle. Esses mesmos autores, em experimento de longa duração realizado em campo, relataram que após 11 anos da aplicação do calcário não foi verificado efeito do corretivo quanto a mineralização do N na camada de 0 a 0,05 m de um solo podzólico, no entanto, os valores

do CBMS do solo que recebeu a aplicação do calcário foram superiores em comparação aos valores observados no tratamento controle.

Quanto ao N mineralizável, no presente estudo também não houve efeito dos tratamentos nessa variável em nenhuma das profundidades estudadas (Tabelas 8 e 9). Entretanto, no estudo de Franzluebbbers et al. (1994), foi verificado aumento do N mineralizável na profundidade de 0 a 0,05 m quando foi feita a adubação nitrogenada, nessas condições, observou-se o mesmo padrão sazonal observado para o C mineralizável.

A ausência de alteração do N mineralizável em solo sem adubação nitrogenada e em profundidade é um indicativo que pode ter ocorrido a imobilização do N. Dentro desse contexto, as raízes e seus exsudatos podem ter baixa concentração de N e alta concentração de C mineralizável (FRANZLUEBBERS et al., 1994; MARY et al., 1993).

Os resultados obtidos no presente estudo com relação às variáveis CBMS e C mineralizável são indicativos de que a melhor qualidade biológica do solo foi encontrada na camada de 0 a 0,05 m do solo no sistema safra-forrageira e, dentre os corretivos, o calcário também promoveu a referida melhor qualidade biológica do solo.

Tabela 8. Probabilidade dos valores de F referentes ao N e C mineralizáveis e carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS) nas camadas de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade do solo em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos

FV	N mineralizável	C mineralizável	(CBMS)
0 a 0,05 m			
Sistema (S)	0,162	0,098	0,083
Corretivo (C)	0,513	<0,001	0,005
S x C	0,892	0,799	0,346
0,05 a 0,10 m			
Sistema	0,393	0,210	0,072
Corretivo	0,978	0,429	0,329
S x C	0,924	0,464	0,705
0,10 a 0,20 m			
Sistema	0,148	0,513	0,304
Corretivo	0,529	0,561	0,796
S x C	0,199	0,518	0,816

Tabela 9. N e C Mineralizáveis e C da biomassa microbiana (CBMS) nas camadas de 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m de profundidade do solo.

FV	N mineralizável mg kg <sup>-1</sup>	C mineralizável 24 dias <sup>-1</sup>	(CBMS) mg kg <sup>-1</sup>
0 a 0,05 m			
<b>Sistema</b>			
Forageira	85,2	586,3 a	1080,6 a
Safrinha	63,2	491,1 b	852,2 b
Adubo Verde	72,7	501,7 b	886,1 b
Pousio	77,8	490,0 b	881,8 b
<b>Corretivo</b>			
Controle	70,2	417,0 C	832,6 B
Silicato	75,0	507,8 B	893,3 B
Calcário	79,0	627,5 A	1050,0 A
0,05 a 0,10 m			
<b>Sistema</b>			
Forageira	43,5	234,0	459,2 a
Safrinha	35,6	224,4	390,0 b
Adubo Verde	46,6	238,2	419,2 ab
Pousio	44,6	205,0	444,7 a
<b>Corretivo</b>			
Controle	41,9	210,0	414,2
Silicato	43,0	237,0	415,0
Calcário	42,7	229,4	455,6
0,10 a 0,20 m			
<b>Sistema</b>			
Forageira	28,8	128,1	275,3
Safrinha	30,5	122,2	276,3
Adubo Verde	35,4	142,3	288,5
Pousio	33,3	128,4	255,6
<b>Corretivo</b>			
Controle	31,5	136,0	280,1
Silicato	33,1	129,8	269,1
Calcário	31,4	125,0	272,5

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t (p<0,10).

Considerando as Tabelas 10 e 11, os sistemas de produção influenciaram os valores do nitrogênio total (NT), do carbono orgânico total (COT), do nitrogênio particulado (NP), do carbono orgânico particulado (COP), do carbono orgânico associado aos minerais (COAM) e também da relação COP/COAM. Assim, na camada de 0 a 0,05 m, os valores dessas variáveis foram maiores no Sistema safra-forrageira comparativamente aos demais. Apesar de terem sido observadas diferenças estatísticas quanto ao NP e NT, é importante destacar que essas diferenças foram muito pequenas entre

os sistemas de produção estudados. Os valores do COP também foram influenciados pelos corretivos da acidez do solo e observou-se interação dos tratamentos, sistemas de produção e corretivos da acidez do solo, para a relação COP/COAM na camada de 0 a 0,05 m.

As concentrações de NT, COT, COP, COAM e NP foram influenciados pelo maior acúmulo de matéria seca do sistema safra-forrageira ao longo dos anos, pois comparativamente aos demais sistemas, o sistema safra forrageira foi o que acumulou mais massa de matéria seca (Tabelas 7 e 11), e, provavelmente o sistema radicular das forrageiras também deve ter contribuído para os maiores valores dessas variáveis, principalmente do COP, COAM e conseqüentemente o COT, pois conforme relatado por Salton et al. (2011) as gramíneas, notadamente as espécies do gênero *Urochloa* utilizadas no sistema de Integração Lavoura pecuária, são altamente eficientes em adicionar C ao sistema, tanto na superfície quanto no perfil do solo.

Conforme relatado por Cambardella e Elliot (1992) o COP e o NP são frações físicas da matéria orgânica do solo que representam um estágio intermediário de decomposição. A fração particulada da matéria orgânica do solo é composta por resíduos de plantas e hifas de fungos com reconhecível estrutura celular (GARCIA et al., 2013). Estudos tem mostrado que mudanças nos estoques do COP relacionam-se com o aporte de resíduos dos cultivos ao sistema (SÁ; LAL, 2009; BRIEDIS et al., 2012b).

Briedis et al. (2012b), em estudo no Sul do Brasil em região de clima Subtropical, obtiveram relação linear positiva entre o carbono acumulado a partir dos resíduos das plantas cultivadas durante 15 anos em SPD e o COP na camada de 0 a 0,20 m. No presente estudo, é possível que em futuras análises sejam observadas diferenças das concentrações do COP em função dos tratamentos também nas camadas abaixo de 0,05 m, pois com o passar dos anos mais resíduos vegetais serão adicionados aos sistemas de produção.

Garcia et al. (2013), comparando diferentes rotações de culturas em condições de clima e solo semelhantes às do presente trabalho, relataram que a curto prazo as frações lábeis da MOS são as primeiras a serem alteradas pela rotação de culturas, e as gramíneas são mais eficientes em aumentar essas frações do que as leguminosas, corroborando os resultados do presente estudo em que houve maior concentração do COP no solo do sistema safra-forrageira.

Além da inserção de forrageiras na rotação, a aplicação superficial do calcário também resultou nos maiores valores do COP na camada de 0 a 0,05 m do solo (Tabela 11). Briedis et al. (2012c), em estudo com a aplicação superficial de calcário, relataram haver aumento do COP e também do COAM até 0,20 m do perfil do solo a longo prazo, aproximadamente 15 anos, sendo o maior impacto dessa prática observado na fração particulada da MOS. Esses autores relataram também que o maior efeito da calagem no COP ocorreu devido à maior produção de fitomassa de raízes e parte aérea das culturas por consequência da calagem.

Castro et al. (2015) também verificaram aumento do COP e COAM e conseqüentemente do COT na camada de 0 a 0,05 m do solo em função da aplicação dos corretivos da acidez, silicato e calcário, com aproximadamente 60 meses após a aplicação dos corretivos. Quanto aos sistemas de produção, observaram maior COP na camada de 0 a 0,05 m no sistema safra forrageira comparativamente aos demais sistemas de produção.

Dentre as frações da MOS, o COP é um bom indicador da qualidade do solo em razão do manejo adotado (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992), e está diretamente relacionado com a qualidade, quantidade, e frequência de adição de resíduos culturais ao solo (VIEIRA et al., 2007; SÁ; LAL, 2009). A adição de resíduos culturais, juntamente com a manutenção da estrutura do solo, resulta no aumento da fração do COAM, um parâmetro que reflete a relação entre o C e a fração silte e argila do solo (SÁ et al., 2001). Dentro desse contexto, como o presente fracionamento físico da MOS trata-se da repetição do estudo de Castro et al. (2015), é possível inferir que após mais 24 meses de adição de resíduos nos sistemas de produção estudados, além da concentração do COP, também as concentrações do COAM e conseqüentemente do COT foram maiores na camada de 0 a 0,05 m do solo do sistema safra forrageira em relação às concentrações observadas dessas mesmas frações da MOS dos demais sistemas de produção estudados, as quais não diferiram entre si.

O COAM é a fração da MOS associada às frações silte e argila do solo, sendo definida como a fração da MOS que interage com a superfície de partículas minerais, formando os complexos organominerais, estando protegida pelo mecanismo de proteção coloidal (CHRISTENSEN, 2000). Essa fração da matéria orgânica do solo possui alta estabilidade e pode ser aumentada quando o SPD recebe adição constante de resíduos vegetais, e, por isso houve maior concentração do COAM no solo do sistema safra

fornageira, devido ao constante aporte de resíduos vegetais pelas forrageiras ao sistema. Quanto ao COT, este desempenha funções importantes nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (SÁ et al., 2009; TISDALL; OADES, 1982; CASTRO FILHO et al., 1998; SPARLING et al., 1998), além de ser uma importante variável ambiental por atuar como dreno do C atmosférico para a superfície da terra (LAL, 2004, 2008).

Contudo, a utilização das *Urochloas spp.* na rotação de culturas (Sistema safra-fornageira) aumentou os valores das frações lábeis da MOS, CBMS, C mineralizável e COP, e também a concentração do COAM, fração estável, resultando em maior COT do solo na profundidade de 0 a 0,05 m de profundidade. Quanto aos corretivos, apesar desses terem influenciado também as frações lábeis como o CBMS, C mineralizável e COP, não influenciaram a fração estável (COAM) e o COT do solo (Tabelas 8, 9, 10 e 11), porém é provável que em futuras análises os corretivos também possam influenciar o COAM bem como o COT, pois por consequência da reação dos corretivos da acidez do solo, melhorando as propriedades químicas do solo, as produções de massa de matéria seca irão aumentar, aumentando também as quantidades de resíduos vegetais adicionados aos sistemas de produção, conforme observado por Briedis et al. (2012c) e Castro et al. (2015).

Franzluebbers et al. (2000), em estudo realizado em condições de clima temperado nos EUA, relataram haver maiores concentrações, em área de pastagem por 20 anos, de COT (31%), NT (34%), COP (66%), NP (2,4 vezes) e CBMS (28%) na camada de 0 a 0,20 m, comparativamente, à área adjacente de lavoura há 24 anos em que realizava-se manejo conservacionista do solo.

Manter a superfície do solo coberta com resíduos vegetais resulta em acúmulo de C nos macroagregados estáveis do solo, aumentando assim o COT do solo (TIAN et al., 2014). Assim, é provável que no presente estudo, tenha havido também maior acúmulo de C nos macroagregados estáveis do solo na camada de 0 a 0,05 m do solo do sistema safra forrageira, contribuindo para o maior COT do solo observado (Tabela 11).

A relação do C lábil (COP/COAM) na camada de 0 a 0,05 m aumentou por consequência dos resultados observados no COP, conforme já relatado anteriormente. A correção da acidez acelera a decomposição da matéria orgânica do solo por aumentar a atividade microbiana (YAO et al., 2009), mas a longo prazo a concentração de C do solo irá aumentar devido às melhores condições edáficas proporcionadas por essa

prática (BRIEDIS et al., 2012b). Além disso, a aplicação superficial dos corretivos sem o revolvimento do solo permite que os agregados do solo sejam mantidos, prevenindo a decomposição acelerada da MOS (CAIRES et al., 2006).

Foi observada interação do Sistema de produção safra-forrageira com a aplicação superficial do calcário na camada de 0 a 0,05 m, assim o elevado acúmulo de massa de matéria seca devido ao uso de forrageiras na rotação com as culturas graníferas aliado com os benefícios proporcionados pela aplicação superficial do calcário resultaram na maior relação COP/COAM (TABELA 13).

As principais alterações da MOS ocorreram na camada de 0 a 0,05 m do solo. Pode ser que com o passar dos anos sejam vistas alterações das frações da MOS em camadas mais profundas do perfil do solo. De qualquer forma, a superfície do solo é tida como a interface vital que recebe os insumos aplicados nas áreas agrícolas, o impacto das águas das chuvas, além de ser também a interface do fluxo dos gases. Logo, os mecanismos que afetam as produtividades das culturas e a qualidade ambiental começam a partir da superfície do solo (FRANZLUEBBERS, 2002).

Nesse sentido, é de suma importância que as análises sejam repetidas ao longo dos anos para verificar se haverá mudanças nas frações MOS abaixo da camada superficial do solo de 0 a 0,05 m, em função dos tratamentos em região de clima tropical em que utiliza-se o SPD como manejo conservacionista do solo.

Tabela 10. Probabilidade dos valores de F para nitrogênio total (NT), C orgânico total (COT), N particulado (NP), C orgânico particulado (COP), C associado aos minerais (COAM), relação C/N e labilidade da matéria orgânica (COP/COAM), nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos.

FV	NT	COT	NP	COP	COAM	C/N	COP/COAM
0 a 0,05 m							
Sistema (S)	0,044	0,069	0,019	0,006	0,086	0,262	<0,001
Corretivo (C)	0,429	0,363	0,181	0,046	0,535	0,060	0,001
S x C	0,847	0,921	0,743	0,328	0,984	0,889	0,018
0,05 a 0,10 m							
Sistema (S)	0,735	0,515	0,637	0,388	0,643	0,032	0,397
Corretivo (C)	0,390	0,487	0,494	0,742	0,109	0,691	0,480
S x C	0,906	0,837	0,576	0,774	0,536	0,250	0,688
0,10 a 0,20 m							
Sistema (S)	0,174	0,251	0,571	0,123	0,188	0,882	0,261
Corretivo (C)	0,124	0,154	0,926	0,200	0,150	0,545	0,211
S x C	0,745	0,705	0,669	0,435	0,770	0,147	0,385

Tabela 11. Nitrogênio total (NT), C orgânico total (COT), C orgânico particulado (COP), N particulado e C orgânico associado aos minerais (COAM), nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos.

FV	NT	COT	COP	NP	COAM
$\text{g kg}^{-1}$					
0 a 0,05 m					
<i>Sistema</i>					
Forageira	1,7 a	21,2 a	6,3 a	0,4 a	16,0 a
Safrinha	1,4 b	18,0 b	4,4 b	0,3 b	13,6 b
Adubo Verde	1,5 ab	18,2 b	4,3 b	0,3 b	14,0 b
Pousio	1,4 b	17,3 b	4,4 b	0,3 b	13,0 c
<i>Corretivo</i>					
Controle	1,5	18,8	4,5 B	0,3	14,3
Silicato	1,5	17,8	4,6 B	0,3	13,3
Calcário	1,5	19,5	5,4 A	0,3	14,0
0,05 a 0,10 m					
<i>Sistema</i>					
Forageira	1,2	14,1	1,9	0,1	12,3
Safrinha	1,2	13,6	1,6	0,1	11,9
Adubo Verde	1,2	13,9	1,8	0,1	12,1
Pousio	1,2	13,4	1,5	0,1	12,0
<i>Corretivo</i>					
Controle	1,2	14,0	1,7	0,1	12,4
Silicato	1,2	13,5	1,8	0,1	11,7
Calcário	1,2	13,7	1,6	0,1	12,1
0,10 a 0,20 m					
<i>Sistema</i>					
Forageira	1,0	11,5	1,1	0,1	10,3
Safrinha	1,1	12,0	1,2	0,1	10,6
Adubo Verde	1,1	12,1	1,4	0,1	10,8
Pousio	1,0	11,2	1,1	0,1	10,1
<i>Corretivo</i>					
Controle	1,1	12,0	1,3	0,1	10,7
Silicato	1,0	11,4	1,2	0,1	10,2
Calcário	1,0	11,6	1,1	0,1	10,5

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t ( $p < 0,10$ ).

Tabela 12. Relação C/N e labilidade da matéria orgânica do solo (COP/COAM) nas profundidades 0,00-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos.

FV	C/N	COP/COAM
0 a 0,05 m		
<i>Sistema</i>		
Forageira	12,7	0,4 a
Safrinha	12,5	0,3 b
Adubo Verde	12,2	0,3 b
Pousio	12,3	0,3 b
<i>Corretivo</i>		
Controle	12,2 B	0,3 B
Silicato	12,2 B	0,3 B
Calcário	13,0 A	0,4 A
0,05 a 0,10 m		
<i>Sistema</i>		
Forageira	11,6 a	0,2
Safrinha	11,5 a	0,1
Adubo Verde	11,5 a	0,2
Pousio	11,2 b	0,1
<i>Corretivo</i>		
Controle	11,4	0,1
Silicato	11,4	0,2
Calcário	11,5	0,1
0,10 a 0,20 m		
<i>Sistema</i>		
Forageira	11,2	0,1
Safrinha	11,3	0,1
Adubo Verde	11,2	0,1
Pousio	11,2	0,1
<i>Corretivo</i>		
Controle	11,2	0,1
Silicato	11,3	0,1
Calcário	11,3	0,1

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste t ( $p < 0,10$ ).

Tabela 13. Desdobramento da interação dos sistemas de produção e corretivos da acidez do solo quanto à labilidade da matéria orgânica do solo COP/COAM na profundidade de 0 a 0,05 m.

Sistema	Corretivos da acidez do solo		
	Controle	Calcário	Silicato
		<u>COP/COAM</u>	
FORAGEIRA	0,4 aB	0,5 aA	0,4 aB
Safrinha	0,3 bA	0,3 bA	0,3 abA
Adubo Verde	0,3 bA	0,3 bA	0,3 bA
Pousio	0,3 abB	0,4 bA	0,3 bB

Médias seguidas de letras distintas (minúsculas na coluna e maiúsculas na linha) diferem estatisticamente pelo teste t ( $p < 0,10$ ).

O aumento do estoque de carbono orgânico esteve diretamente relacionado aos resultados obtidos nas frações da MOS e COT, assim o maior estoque do COT do solo foi observado no sistema safra-forrageira na profundidade de 0 a 0,05 m do solo (Tabela 14).

A utilização de diferentes culturas, com diferentes aportes de C, resulta em diferentes estoques de C no solo, conforme relato de Diekow et al. (2005). As espécies do gênero *Urochloa* utilizadas no sistema de Integração Lavoura pecuária, são altamente eficientes em adicionar C ao sistema, tanto na superfície quanto no perfil do solo (SALTON et al., 2011).

Segnini (2007) relatou haver maior estoque de C em área de pastagem de *Urochloa decumbens* comparativamente a área nativa de Cerrado, após 27 anos de experimento. O maior estoque de carbono verificado em área de pastagem foi favorecido pela constante entrada de material vegetal na superfície do solo, também influenciado pela adubação nitrogenada, além do sistema radicular vigoroso da gramínea. Rezende et al., (1999) relataram que após 10 anos de retirada da vegetação nativa de cerrado e instalação da *Urochloa humidicola*, o estoque de MOS foi repostado pela forrageira e tendeu a aumentar, por meio da decomposição de seus resíduos de parte aérea e raízes.

O estoque de carbono não foi influenciado pelos corretivos da acidez do solo no presente estudo, porém Briedis et al. (2012b), verificou aumento dos estoques de C na camada de 0 a 0,20 m do solo em função da aplicação de doses de calcário, assim os valores observados pelos autores foram da ordem de 49,9 Mg ha<sup>-1</sup> e 57,5 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente, para o tratamento controle e para a aplicação de 6 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em 1993 somada a aplicação de 3 Mg ha<sup>-1</sup> de calcário em 2000, sendo o estoque de carbono mensurado em 2008.

Tabela 14. Estoques de carbono orgânico total (COT) nas camadas 0,00-0,05; 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m do solo em função em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos.

Tratamentos	Estoque de carbono orgânico total (COT)		
	0-0,05 m	0,05-0,10 m	0,10-0,20 m
	<u>Mg ha<sup>-1</sup></u>		
<i>Sistemas</i>			
Forageira	13,7 a	9,8	15,6
Safrinha	12,0 b	9,2	15,7
Adubo Verde	12,0 b	9,5	16,9
Pousio	11,7 b	9,6	15,9
<i>Corretivos</i>			
Controle	11,8	9,6	16,5
Silicato	12,1	9,5	16,0
Calcário	13,0	9,5	16,0
		<u>Probabilidade de F</u>	
Corretivos (C)	0,187	0,989	0,128
Sistemas (S)	0,087	0,166	0,114
S*C	0,584	0,235	0,124

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

### 6.3. Características químicas do solo

As características químicas do perfil do solo, em duas épocas de amostragem, aos 12 e 24 meses após a última aplicação dos corretivos, estão apresentadas em função da aplicação dos corretivos do solo (calcário e silicato) nas sucessões de culturas estudadas (Safrinha – Forrageira, Safrinha – Safrinha, Safrinha – Pousio e Safrinha – Adubo Verde).

### 6.3.1. Doze meses após a última aplicação dos corretivos

Aos 12 meses após a última aplicação, os valores de pH aumentaram até 0,10 m de profundidade em função da aplicação de ambos os corretivos da acidez do solo, silicato e calcário, nos sistemas safra-forrageira e safra-pousio, e até 0,05 m nos sistemas safra-safrinha e safra-adubo verde (Figura 5).

Mello et al. (2003) corroborando os resultados do presente estudo, relataram que após 12 meses da aplicação superficial do calcário, houve aumento dos valores de pH na camada de 0 a 0,10 m do solo. Entretanto, Costa e Crusciol (2016) aos 48 meses após a reaplicação superficial do calcário verificaram aumento dos valores de pH até 0, 20m de profundidade em um Latossolo Vermelho Distroférico.

Castro e Crusciol (2013a), em condições semelhantes às do presente estudo, verificaram que aos 6 meses após a aplicação superficial dos corretivos da acidez do solo, silicato e calcário, os valores de pH aumentaram até 0, 10 m de profundidade do solo, não havendo diferenças entre as fontes de corretivos da acidez do solo utilizadas, porém aos 12 meses após a aplicação dos corretivos, houve efeito dos corretivos aumentando os valores de pH até 0,20m, sendo o efeito da aplicação do silicato mais pronunciado na camada de 0, 10 a 0,20 m.

O aumento do pH com o uso dos corretivos é decorrente do aumento da concentração das hidroxilas e redução da concentração de  $H^+$  em solução (OLIVEIRA; PAVAN, 1996), e, apesar do pH do solo ter aumentado somente até 0,10 m de profundidade (Figura 5), na literatura há diversos relatos que é possível que a acidez do solo seja devidamente corrigida em subsuperfície após a aplicação superficial do calcário e do silicato (CAIRES et al., 2003, 2005; 2011; CORREA et al., 2007; CASTRO ; CRUSCIOL, 2013ab; COSTA; CRUSCIOL 2016), contudo, alguns fatores interferem nessa correção como a dose e granulometria do produto, forma de aplicação, tipo de solo, condições climáticas (principalmente regime hídrico), sistema de cultivo, e tempo decorrido da aplicação (OLIVEIRA; PAVAN, 1996; RHEINHEIMER et al., 2000; SORATTO; CRUSCIOL, 2008).

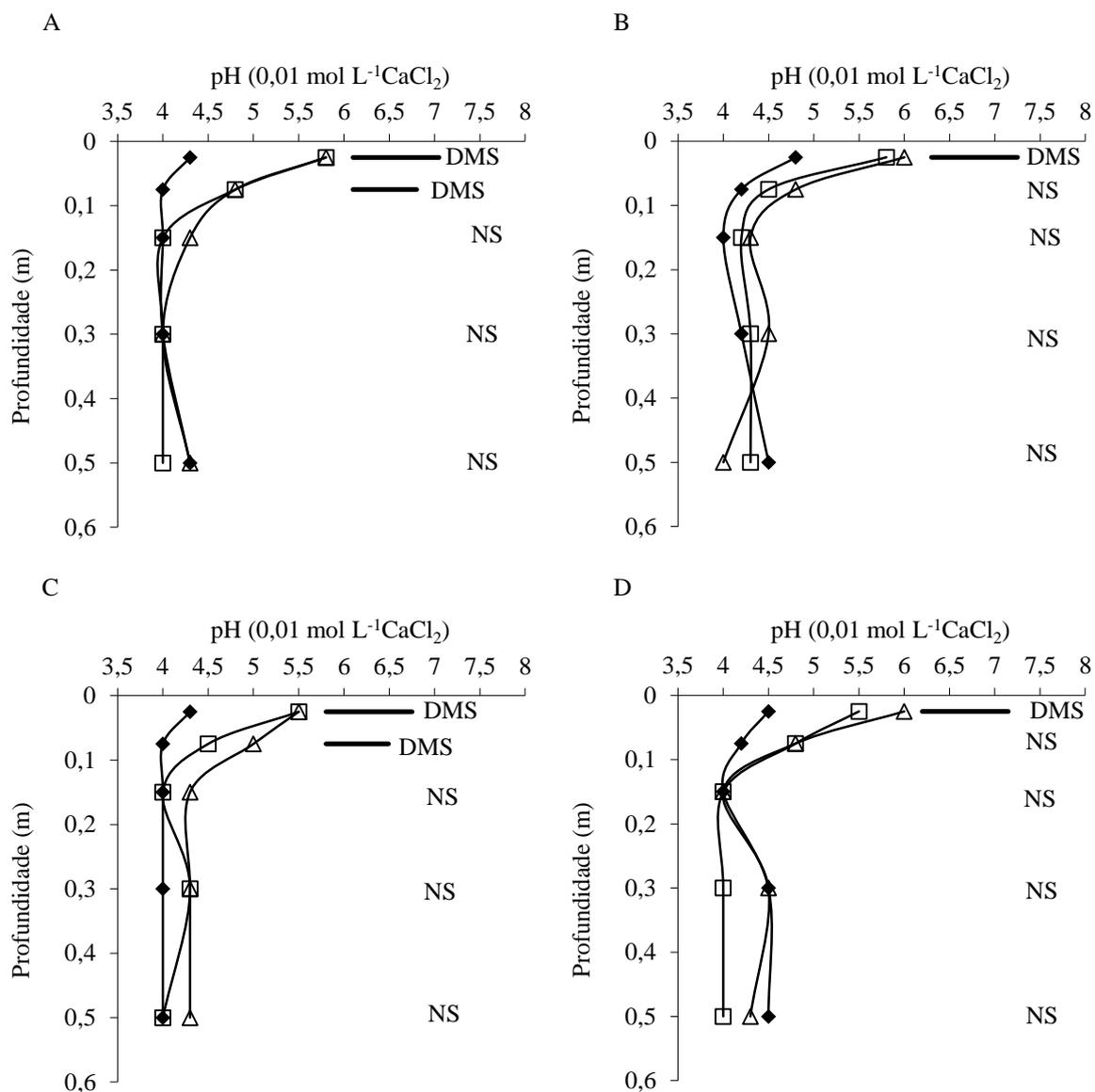


Figura 5. Valores do potencial hidrogeniônico (pH) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (♦)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

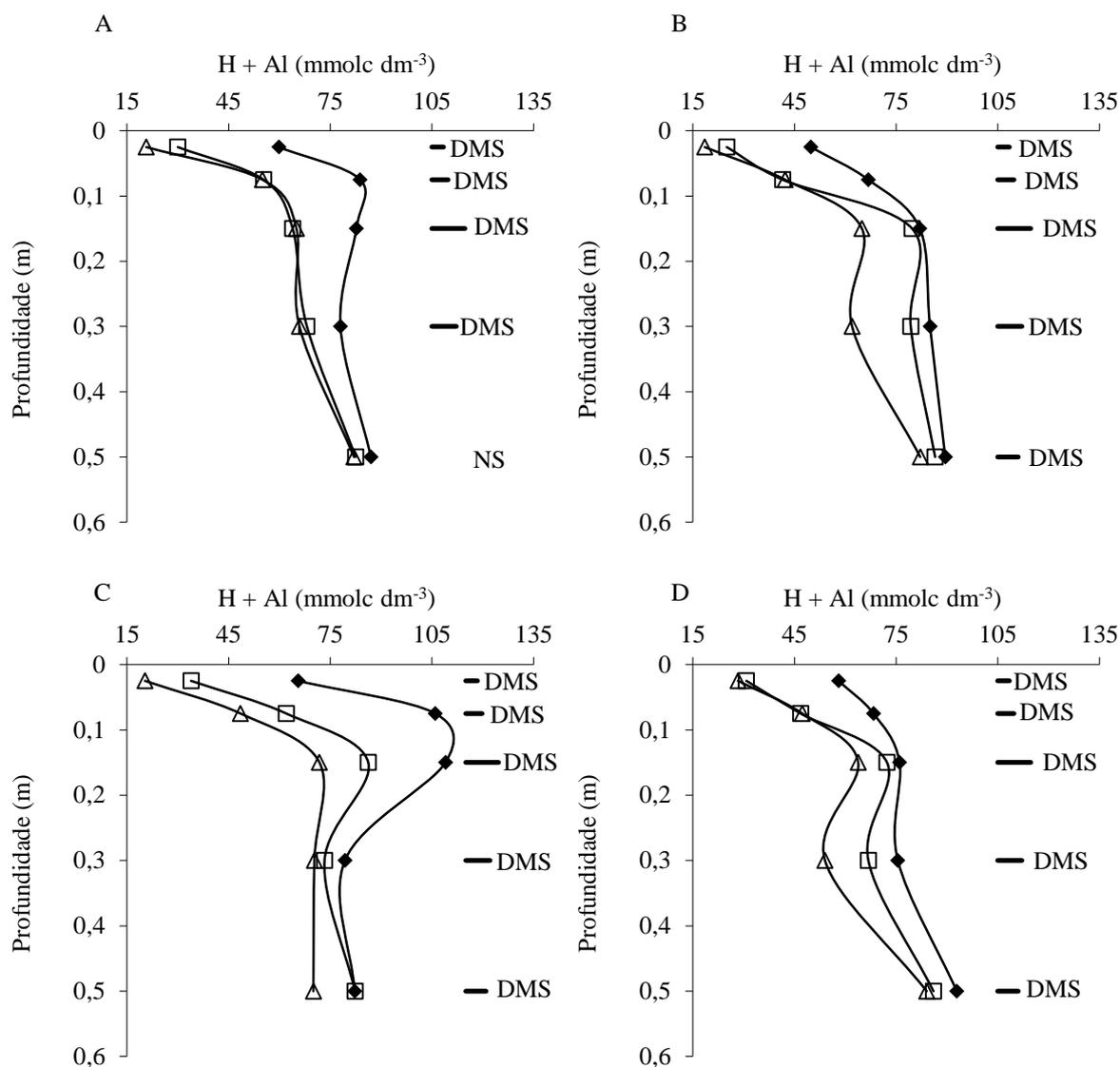


Figura 6. Valores de hidrogênio e alumínio (H + AL) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

Apesar dos corretivos terem influenciado os valores de pH somente até 0,10 m de profundidade do solo, a acidez potencial foi influenciada positivamente até 0,60 m de profundidade. Assim, a aplicação dos corretivos promoveu redução da acidez potencial do solo (H+Al) em todas as camadas do solo e, em quase todos os sistemas de produção estudados, a exceção foi o sistema safra-forrageira, onde a redução da acidez potencial ocorreu até 0,40 m de profundidade do solo (Figura 6).

De modo geral, aos 12 meses após a última aplicação dos corretivos, por consequência da silicatagem, a acidez potencial foi reduzida a valores menores comparativamente aos observados por consequência da aplicação do calcário (Figura 6). Isso ocorreu devido ao silicato ser mais solúvel que o calcário (ALCARDE; RODELA, 2003), sendo assim a taxa de dissociação dos produtos da reação do silicato no solo ocorreu de maneira mais rápida que a taxa de dissociação dos produtos da reação do calcário.

Soratto e Crusciol (2008) observaram diminuição da acidez potencial ( $H+Al$ ) nas camadas de 0,05 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m, respectivamente, aos 6 e 12 meses após a aplicação superficial do calcário. Conforme relatado por Castro e Crusciol (2013a), como a reação do silicato nas camadas superficiais é mais rápida, comparativamente, à reação do calcário, a “frente de alcalinização” é formada em um período de tempo menor, podendo corrigir a acidez das camadas mais profundas do solo em um período de tempo também menor, os referidos autores, verificaram diminuição da acidez potencial aos 6 e 12 meses após a aplicação superficial dos corretivos até a profundidade de 0,20m, não havendo diferenças entre as fontes de corretivos utilizadas, porém aos 18 meses após a aplicação dos corretivos foi verificada redução da acidez potencial até 0,60m e, sendo o silicato mais eficiente em reduzir a acidez potencial que o calcário. No entanto, Costa e Crusciol (2016) verificaram que a aplicação superficial de calcário reduziu a acidez potencial até 0,60 m aos 48 meses após a reaplicação dos corretivos, porém aos 60 meses após a reaplicação dos corretivos esse efeito ficou restrito aos primeiros 0,20m do perfil do solo.

O aumento do pH na superfície do solo verificado no presente estudo aos 12 meses após a última aplicação dos corretivos (Figura 5), pode ter acelerado a velocidade com que os íons cloreto, sulfato, nitrato, formiato e bicarbonato, acompanhados por Ca e Mg, movimentaram-se em subsuperfície para reagir com  $H^+$  e  $Al^{+3}$  (CRUSCIOL et al., 2011), pois de acordo com Rheinheimer et al. (2000), os efeitos da aplicação do calcário em profundidade somente ocorrem quando o pH em água, na zona de dissolução do calcário, atinge valores entre 5,2 e 5,6. Nessa situação, provavelmente ocorre a formação e a migração de  $Ca(HCO_3)_2$  e  $Mg(HCO_3)_2$  para as camadas subsuperficiais. Considerando que os valores de pH em água se correlacionam com os de pH em  $CaCl_2$ , e que são em média 0,5-1,0 unidade maiores (LUCHESE et al., 2001), essa hipótese pode justificar o fato de que, no presente experimento, os produtos da reação dos corretivos

chegaram até as camadas mais subsuperficiais do solo, diminuindo a acidez potencial do solo (Figuras 6, 10 e 11). Esse efeito em profundidade é conhecido como “frente de alcalinização”, conforme observado por vários autores (PÖTTKER; BEN, 1998; SORATTO; CRUSCIOL, 2008; CAIRES et al., 2008a). Portanto, o aumento do pH na superfície do solo, em virtude da aplicação superficial dos corretivos, pode ter acelerado a velocidade com que os íons  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{SiO}_3^{2-}$  acompanhados por Ca e Mg, movimentaram-se para as camadas subsuperficiais do solo para reagir com a acidez, conforme relatado por Caires et al. (2003) em estudo com a aplicação superficial do calcário.

A redução das concentrações de  $\text{H}^+$  se dá pelo aumento da concentração das hidroxilas no solo, decorrentes da aplicação dos corretivos, onde parte destas hidroxilas reage com o excesso de  $\text{H}^+$  em solução e o restante promove a precipitação do alumínio na forma de  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , atóxica às plantas (OLIVERIA; PAVAN, 1996).

A correção da acidez do solo em profundidade pode ocorrer devido a diversos fatores, tais como: o deslocamento físico das partículas finas do calcário e do silicato 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 que encontra-se sob SPD por muitos anos e, no caso do presente estudo a área experimental encontra-se em SPD desde o ano agrícola 2002/2003, e através de planos de fraqueza (AMARAL et al., 2004b), mantidos intactos, em razão do mínimo revolvimento do solo em SPD. No entanto, a maior parte do efeito da calagem em profundidade é devido à movimentação de íons (TEDESCO; GIANELLO, 2000). Assim, a água que infiltra no solo, normalmente está enriquecida com os produtos da dissolução do calcário, responsáveis pela neutralização da acidez e aumento dos cátions de reação básica, permitindo as melhorias das condições da acidez em subsuperfície (RHEINHEIMER et al., 2000).

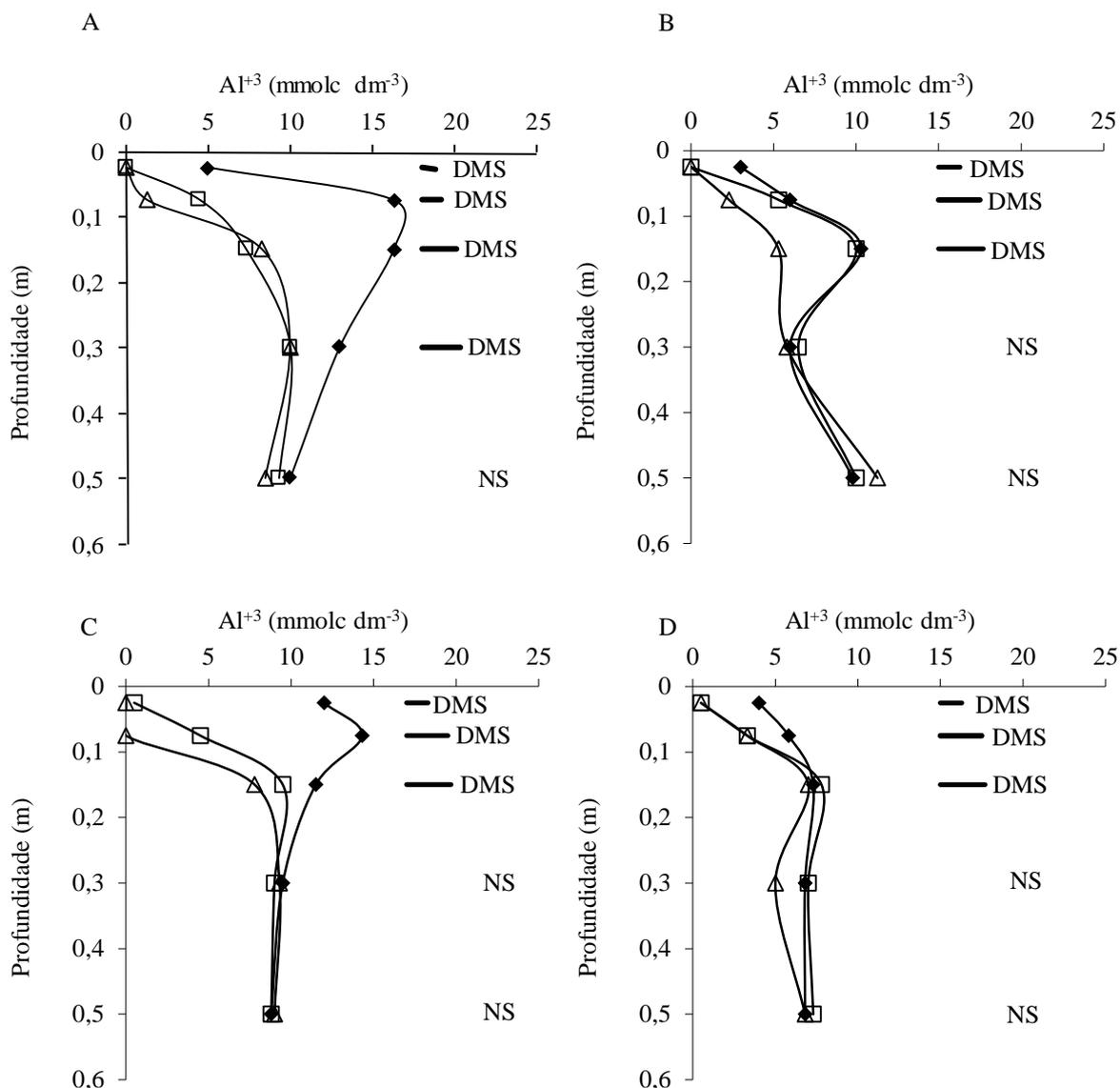


Figura 7. Valores de alumínio trocável ( $Al^{3+}$ ) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

Aos 12 meses após a última aplicação dos corretivos da acidez do solo, com exceção do sistema safra-forrageira em que observou-se redução das concentrações do  $Al^{3+}$  até 0,40 m de profundidade do solo por consequência da aplicação dos corretivos, nos demais sistemas esse efeito foi observado somente até 0,20 m de profundidade (Figura 7).

As concentrações do  $Al^{3+}$  observadas aos 12 meses após a última aplicação dos corretivos na camada de 0 a 0,05 m foram praticamente nulas em todos os

sistemas estudados, havendo, portanto, a inibição da atividade do alumínio tóxico nessa camada (Figura 7).

As espécies de íons alumínio presentes no solo variam de acordo com o pH, sendo que a concentração de  $\text{Al}^{3+}$  no solo tem relação inversa com o pH. A acidez do solo aumenta a solubilização de Al, que é a fonte primária de toxicidade para as plantas em pH abaixo de 5,0.

As formas de alumínio trocável sob condições muito ácidas são na sua maioria  $\text{Al}^{3+}$  e íons de hidróxidos de alumínio  $\text{Al}(\text{OH})_2^-$  e  $\text{Al}(\text{OH})^-$  (KARIUKI et al., 2007). Contudo, em condições mais próximas a alcalinidade, o  $\text{Al}^{3+}$  trocável precipita como espécies insolúveis Al-hidroxila ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), atóxicas para as plantas (KORNDÖRFER; NOLLA, 2003), sendo que o aumento unitário do pH leva a redução de 1000 vezes a atividade do Al tóxico.

Na Figura 7, comparando-se o efeito de ambas as fontes de correção da acidez do solo, silicato e calcário, foram obtidas menores concentrações do  $\text{Al}^{3+}$  no sistema safra forrageira na profundidade de 0,05 a 0,10m, no sistema safra safrinha nas profundidades de 0,05 a 0,10m e 0,10 a 0, 20m e no sistema safra pousio na profundidade de 0,05 a 0,10 m por ocasião da aplicação superficial do silicato, e isso ocorreu pelos mecanismos de redução dos efeitos deletérios do  $\text{Al}^{3+}$  promovidos pela adição do silicato.

Conforme descrito por Pulz et al. (2008) e Carvalho Pupatto et al. (2004), os mecanismos de redução dos efeitos deletérios do Al tóxico pela adição de silicato, não se dá apenas pelo aumento do pH do solo, mas também pelo fato da presença do Si precipitar parte do Al na forma de Hidroxoaluminosilicato (HAS) (EXLEY, 1998), com consequente redução de sua mobilidade, formação de substâncias pouco solúveis com íons de Al, adsorção do Al móvel em superfícies silicatadas. Todos esses mecanismos podem atuar simultaneamente.

Castro e Crusciol (2013a), em estudo sobre a aplicação superficial de calcário e silicato em área onde foi feita a rotação de culturas entre soja e aveia branca, verificaram menores concentrações do  $\text{Al}^{3+}$  em função da aplicação dos corretivos até as profundidades de 0, 20m, 0,40m e 0, 60m, respectivamente, aos 6, 12 e 18 meses após a aplicação dos mesmos e, de modo geral foram poucas as diferenças entre os corretivos aplicados, havendo menores concentrações pontuais do  $\text{Al}^{3+}$  por ocasião da aplicação superficial do silicato. Assim, no estudo de Castro e Crusciol (2013a), a aplicação

superficial do silicato foi mais eficiente em diminuir as concentrações do  $Al^{3+}$  aos 12 meses após a aplicação dos corretivos na camada de 0,20 a 0,40m, e aos 18 meses após a aplicação dos corretivos nas camadas de 0 a 0,05m e 0,40 a 0,60m.

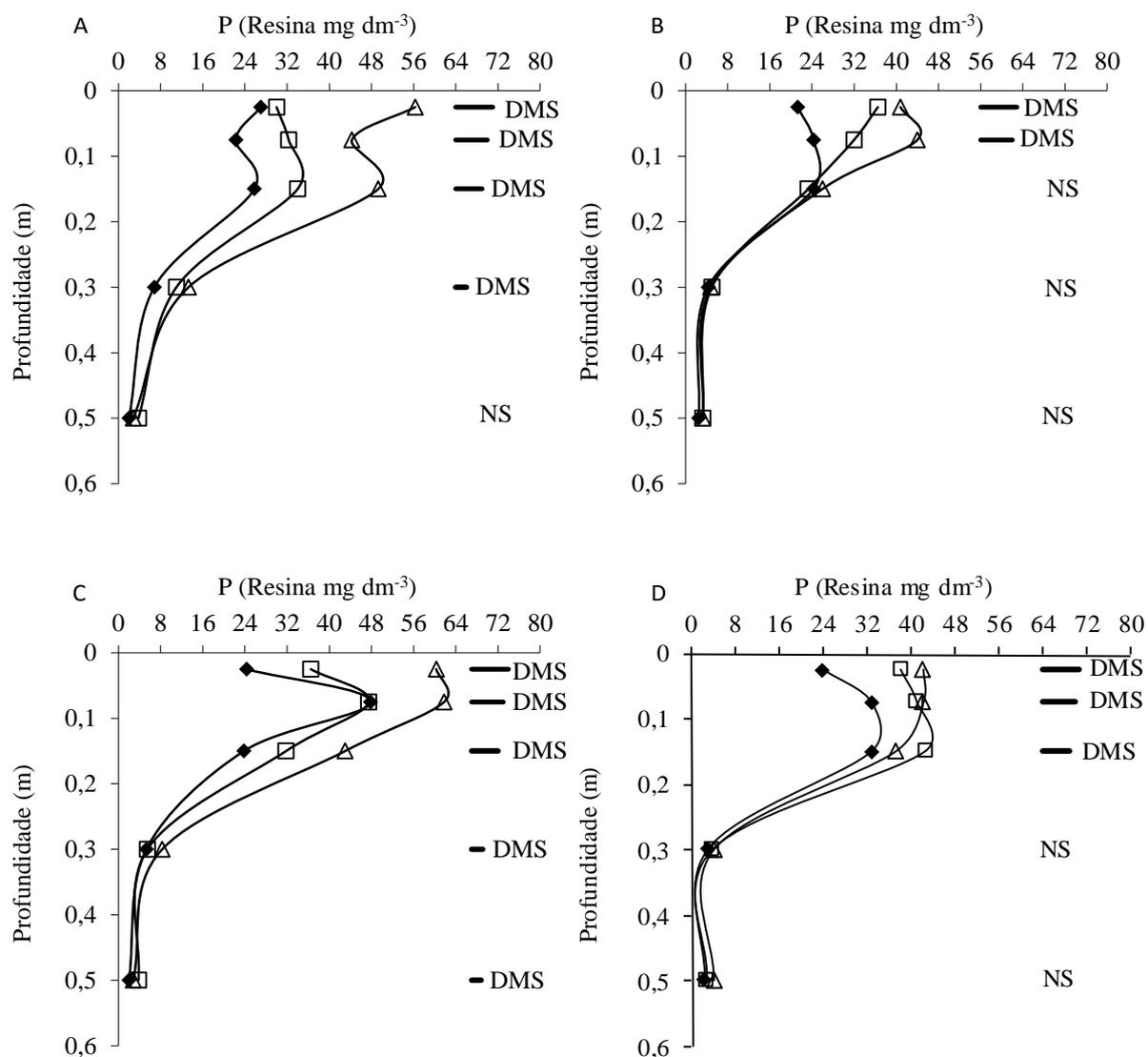


Figura 8. Valores de fósforo (P) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

A correção da acidez do solo por meio do uso do calcário e do silicato auxilia na redução do problema de adsorção de P, pois, com a elevação do pH, ocorre aumento da disponibilidade dos fosfatos de ferro e alumínio, da concentração de  $OH^-$  na solução do solo, reduzindo a adsorção na fase sólida deste (CASAGRANDE;

CAMARGO, 1997). Além disso, a adição anual de fósforo através da adubação de semeadura das culturas potencializa essa maior disponibilização em detrimento da imobilização do P no solo (ALVARADO; CAJUSTE, 1993).

Nesse sentido, houve maior disponibilidade de P em função da aplicação dos corretivos da acidez do solo, sendo que nos sistemas safra-forrageira e safra-pousio o aumento do P atingiu, respectivamente, as profundidades de 0,40 e 0,60 m. Já nos demais sistemas de produção, safra-safrinha e safra-adubo verde os efeitos benéficos dos corretivos se restringiram até os primeiros 0,10 e 0,20 m de profundidade, respectivamente.

Com a aplicação do silicato, maiores concentrações de P disponíveis no solo foram observadas nos primeiros 0,20, 0,20 e 0,10 m, respectivamente, para os sistemas safra-forrageira, safra-pousio e safra-safrinha, não havendo diferenças entre as concentrações observadas no sistema safra-adubo verde em função da calagem e silicatagem, pois ambas as fontes de correção da acidez do solo alteraram de modo semelhante a disponibilidade de P (Figura 8).

A maior disponibilização de P por consequência da silicatagem, possivelmente, foi decorrente da competição entre os ânions silicatos e fosfatos pelos mesmos sítios de adsorção nos colóides do solo, elevando a disponibilidade deste nutriente para as plantas (PULZ et al., 2008). Hingston et al. (1972) verificaram que após a ação alcalinizante do  $\text{CaSiO}_3$ , há a formação do  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ , que se transforma em  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  em pH próximo de 7, e pode ser adsorvido aos óxidos de Fe e Al da fração argila, competindo com o  $\text{H}_3\text{PO}_4^-$  pelos mesmos sítios de adsorção. Esses sítios de fosfatos são saturados ou bloqueados pelos ânions silicatos, aumentando a eficiência da adubação fosfatada. Essa competição, conforme Carvalho et al. (2000), ocorre de maneira mais intensa quando se aplica o silicato antes do P das fertilizações.

Ainda dentro desse contexto, um estudo realizado por Pozza et al. (2007) a fim de quantificar a dessorção competitiva entre os ânions silicato e fosfato na fração argila gibbsítica de um Gleissolo Melânico, com o silicato e o fosfato previamente adsorvidos ao material coloidal, adicionou-se, em sequência, o fosfato e o silicato intercalados, esse estudo demonstrou que a aplicação prévia do silicato reduziu a fixação do fosfato. Desse modo, a aplicação prévia do silicato favoreceu a disponibilidade do fosfato em solos altamente intemperizados, evidenciando a interação desses ânions.

Pulz et al. (2008), avaliando os efeitos da aplicação do silicato de cálcio e magnésio e calcário na correção da acidez do solo, relataram que o material

silicatado além de aumentar a disponibilidade de Si no solo, proporcionou também maior concentração de P disponível no solo.

No estudo de Castro e Crusciol (2013a), o aumento das concentrações de P disponível ficaram restritos às camadas superficiais do solo, pois aos 6 meses após a aplicação dos corretivos, houve aumento da concentração do P disponível até 0,05 m do perfil do solo, sendo esse aumento maior em função da silicatagem superficial, e, aos 18 meses a concentração do P disponível aumentou até 0,10 m de profundidade, não havendo diferenças entre as fontes dos corretivos da acidez aplicados.

No estudo de longa duração de Costa e Crusciol (2016) com a reaplicação superficial do calcário e do calcário e gesso em SPD, verificou-se que aos 60 meses após a reaplicação dos tratamentos ainda foi possível observar maiores concentrações de P disponível no solo até 0,20 m do perfil do solo.

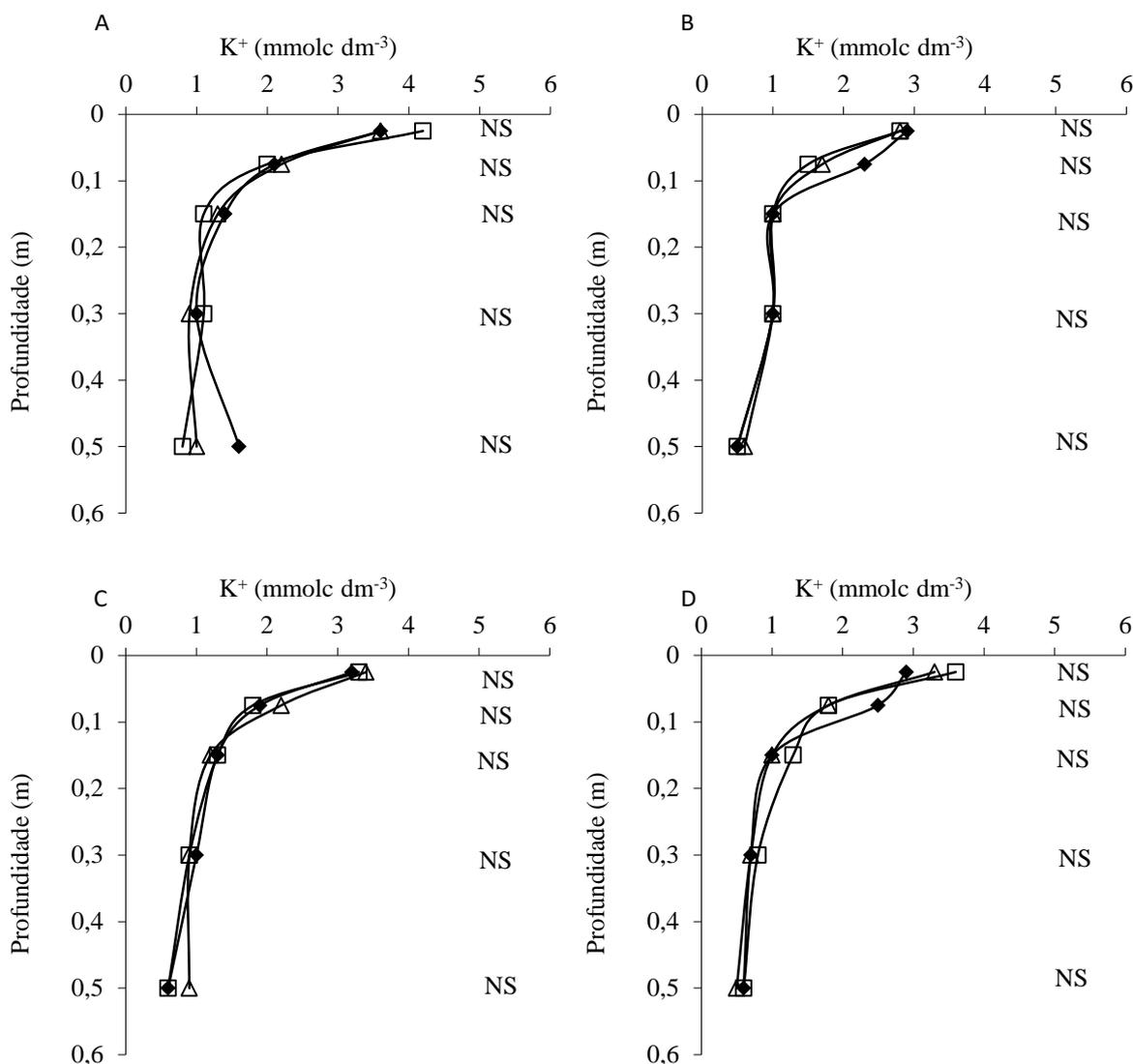


Figura 9. Valores de potássio (K) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos.

Não foi observada a influência dos tratamentos quanto as concentrações de  $K^+$  no solo (Figura 9). Castro e Crusciol (2013a) relataram que o efeito da correção da acidez sobre o K trocável do solo é controverso, porém alguns autores relataram que a calagem pode reduzir as perdas de potássio por lixiviação (QUAGGIO et al., 1982, 1993; CAIRES et al., 1998; FLORA et al., 2007). Tal efeito está relacionado ao aumento das cargas negativas dependentes de pH, ocasionado pela correção da acidez do solo (QUAGGIO et al., 1982; FLORA et al., 2007). Assim, segundo Flora et al. (2007), a

mobilidade do  $K^+$  decresce proporcionalmente à correção da acidez do solo em profundidade.

Quanto ao  $Ca^{2+}$ , verificou-se que aos 12 meses após a última aplicação superficial dos corretivos da acidez do solo, calcário e silicato, as concentrações desse macronutriente aumentaram até 0, 20 m nos sistemas safra-forrageira e safra-safrinha, até 0,40 m no sistema safra-pousio e até 0, 10 m no sistema safra-adubo verde (Figura 10).

Apesar de ter ocorrido diferenças entre os sistemas de produção quanto às concentrações de  $Ca^{2+}$ , com relação ao  $Mg^{2+}$ , as concentrações desse macronutriente aumentaram até a profundidade de 0,20 m em função da aplicação dos corretivos da acidez do solo, em todos os sistemas de produção (Figura 11). O aumento das concentrações de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  em função da aplicação do calcário e do silicato já era esperado, pois ambos os corretivos são fontes desses macronutrientes.

Correa et al. (2007) observaram que as concentrações de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  aumentaram por consequência da aplicação dos corretivos, silicato e calcário, respectivamente, até as profundidades do solo de 0,20 e 0,40 m. O estudo desses autores foi realizado em um Latossolo Vermelho na cidade de Botucatu-SP, e a amostragem referente aos resultados citados foi feita aos 27 meses após a aplicação dos corretivos. Já Mello et al. (2003) também em um Latossolo Distroférico, após 12 meses da aplicação superficial do calcário, verificaram efeito da calagem superficial na movimentação das bases trocáveis até 0,10 m de profundidade. Em outro estudo, Costa e Crusciol (2016) verificaram que após 60 meses da aplicação superficial de calcário em um Latossolo Vermelho Distroférico houve aumento das concentrações de  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  até 0,60 m.

Contudo, os resultados positivos da calagem superficial dependem de inúmeros fatores. Assim, a movimentação das bases,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ , em subsuperfície pode ter ocorrido em razão de diversos fatores, como a formação de pares iônicos inorgânicos com  $NO_3^-$  (CRUSCIOL et al., 2011),  $HCO_3^-$ ,  $OH^-$  (RHEINHEIMER et al., 2000),  $Cl^-$  e  $SO_4^{2-}$  (CAIRES et al., 2006), oriundos da adubação mineral, bem como sua percolação por meio de canais radiculares, microcanais biológicos (bioporos) e planos de fraqueza do próprio solo mantidos intactos pelo SPD (FIDALSKI; TORMENA, 2005), proporcionando o carreamento destes no perfil do solo. Outro fator de grande relevância que pode ter contribuído para a movimentação do  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  em subsuperfície foi à movimentação de íons, pois com o aumento do pH na superfície do solo por consequência

da aplicação superficial dos corretivos, a taxa em que os íons  $\text{HCO}_3^-$  juntamente com Ca e Mg descem em subsuperfície para reagir com a acidez do solo é acelerada (CAIRES et al., 2003; CAIRES, 2013). De acordo com Rheinheimer et al. (2000), os efeitos do calcário em profundidade somente ocorrem quando o pH em água na zona de dissolução do calcário está entre os valores de 5,2 a 5,6. Nessa situação ocorre formação e migração do  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  e  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ , esse efeito em profundidade é conhecido como “frente de alcalinização”, a qual foi descrita por diversos autores (CAIRES et al., 2008a; SORATTO; CRUSCIOL 2008; CASTRO; CRUSCIOL, 2013ab; COSTA; CRUSCIOL; 2016).

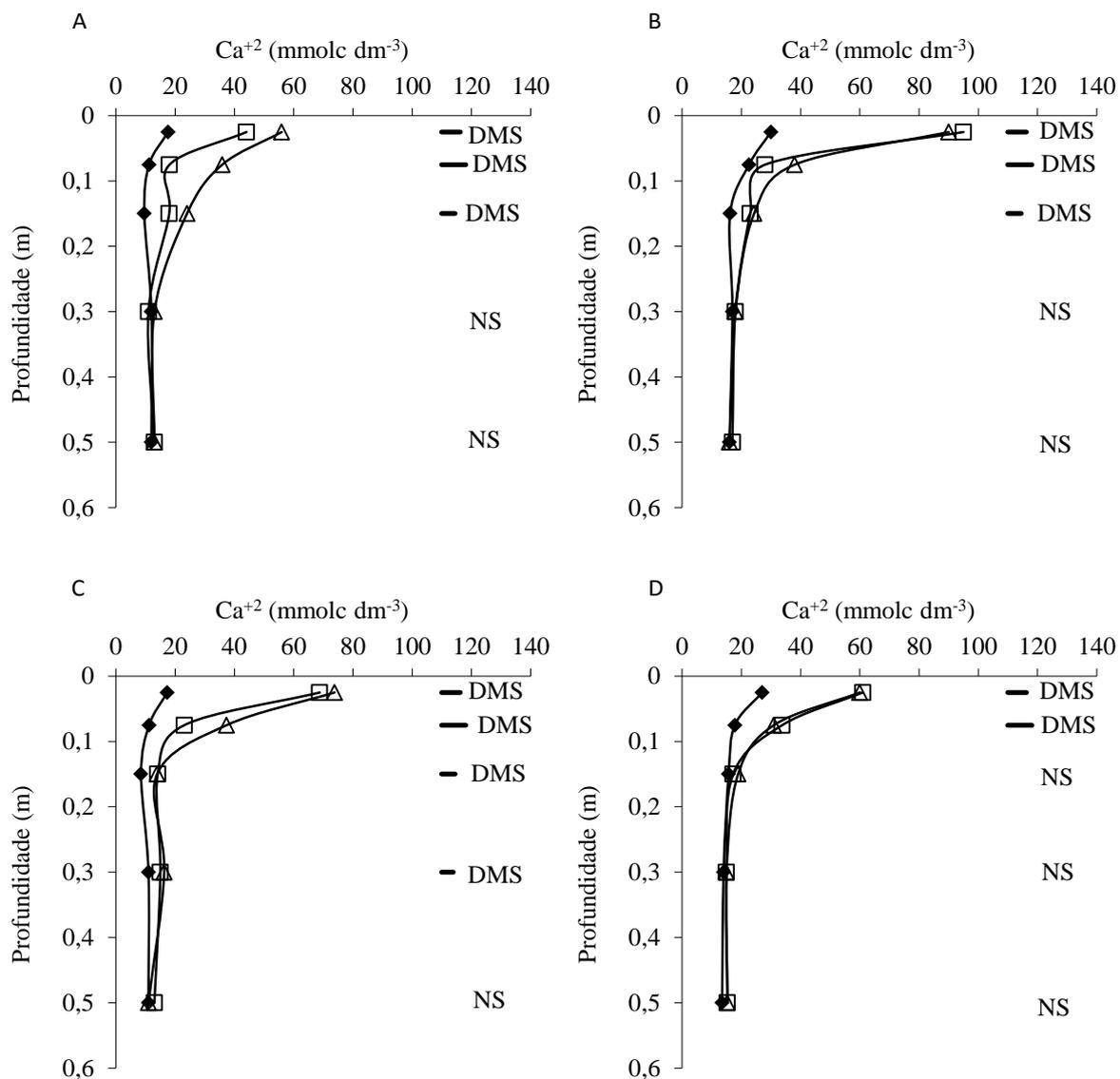


Figura 10. Valores de cálcio (Ca) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

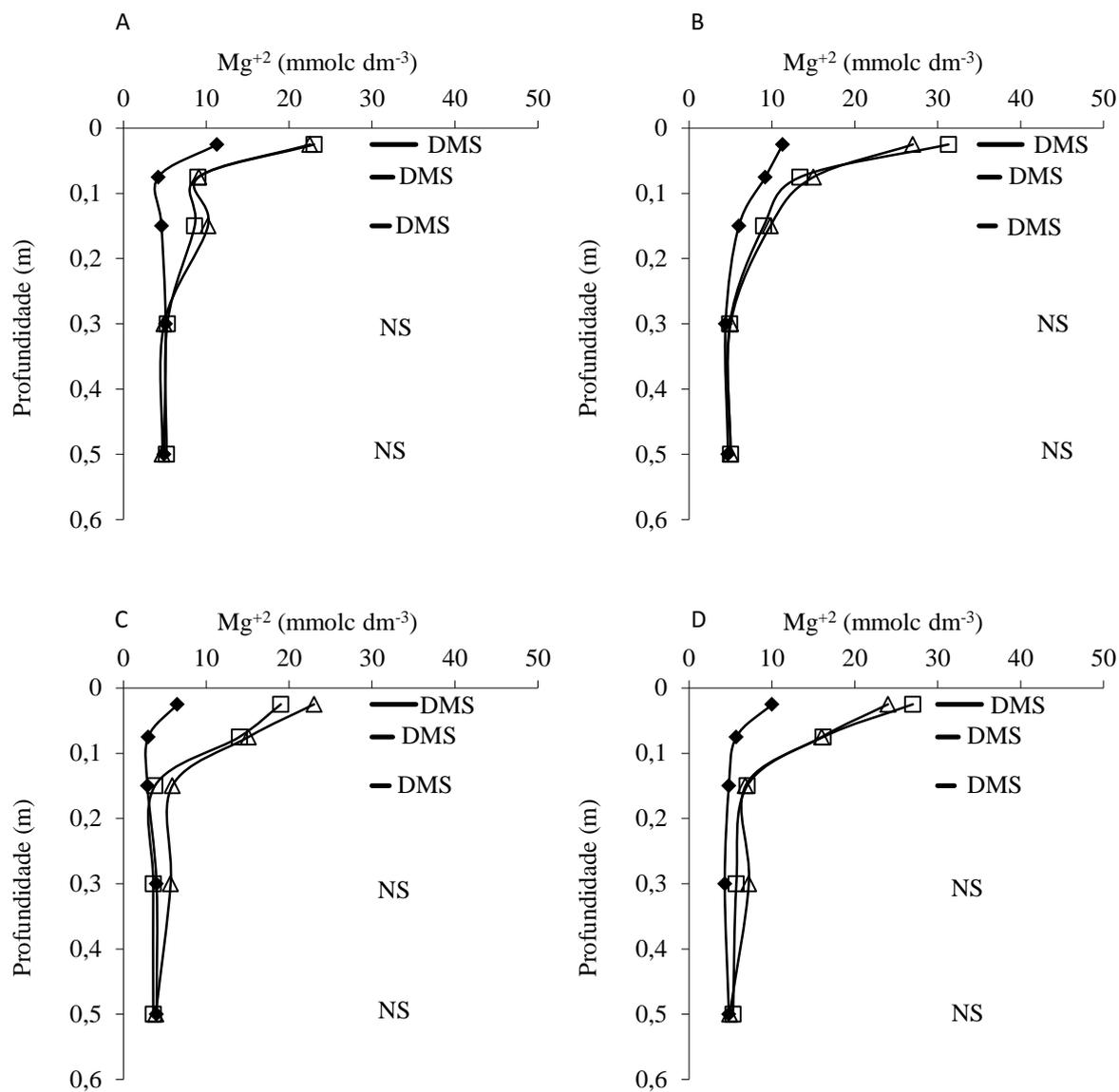


Figura 11. Valores de magnésio (Mg) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

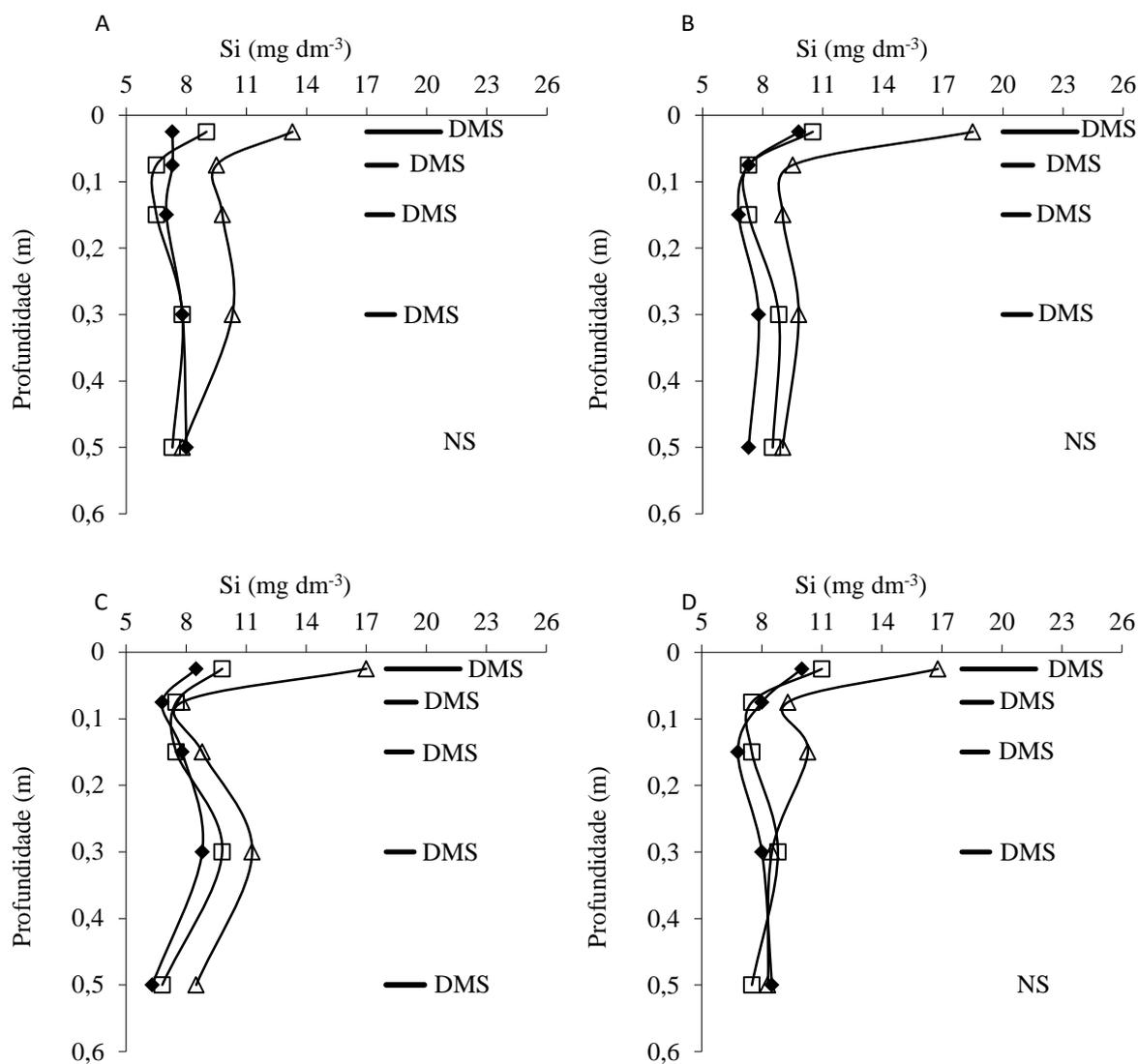


Figura 12. Valores de silício (Si) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (△) e controle (◆)), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

Conforme a figura 12, devido ao silicato ser fonte do elemento benéfico Si, a aplicação desse corretivo fez com que fossem verificados aumentos das concentrações desse elemento no solo. Assim, com exceção do sistema safrinha-pousio em

que houve aumento da concentração do Si no solo até 0,60 m, nos demais sistemas esse aumento foi verificado até 0,40 m.

Não houve influência do calcário quanto a disponibilidade de Si do solo, contrastando com os resultados observados por Castro e Crusciol (2013a), os quais observaram aumento de Si no solo em função da aplicação superficial do calcário, porém esse aumento somente foi maior do que o tratamento controle na camada de 0 a 0,05 m do solo aos 18 meses após a aplicação dos corretivos da acidez do solo. O aumento das concentrações de Si disponível no solo com a aplicação do calcário pode ser atribuída à solubilização de compostos de sílica em função do aumento do pH e, ou, devido ao aumento do pH reduzir a capacidade dos sítios de adsorção de silício no solo, aumentando a sua concentração na solução (PULZ et al., 2008; CASTRO; CRUSCIOL, 2013a).

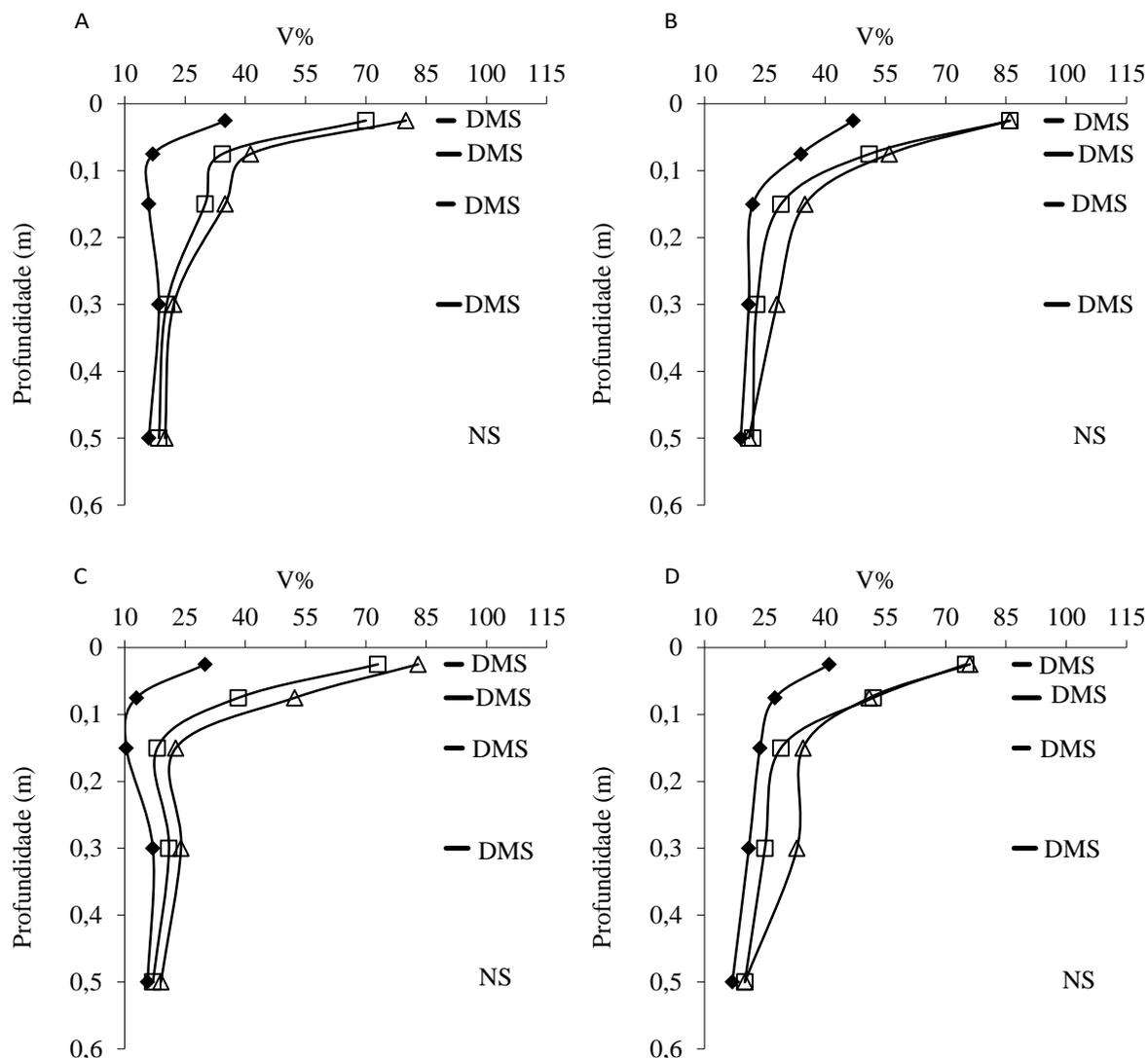


Figura 13. Valores de saturação por bases (V%) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário ( $\square$ ), silicato ( $\Delta$ ) e controle ( $\blacklozenge$ )), 12 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

Os resultados das saturações por bases foram reflexo das alterações provocadas pelos corretivos sobre os resultados de H+Al, Ca e Mg (Figuras 6, 10 e 11), sendo as variações significativas até a camada de 0,40 m (Figura 13), fato este decorrente da movimentação dos produtos da dissociação dos corretivos no perfil do solo. De modo geral, os valores das saturações por bases foram superiores por consequência da silicatagem, comparativamente, à calagem superficial e, um dos fatores que pode ter contribuído diretamente para isso foi a reação mais rápida do silicato no solo, em razão

desse material ser mais solúvel que o calcário. Assim, a menor acidez potencial (H+Al) observada por consequência da silicatagem superficial indica que o silicato reagiu mais rápido que o calcário aos 12 meses após a última aplicação, influenciando diretamente os valores das saturações por bases observadas (Figura 6 e 13).

Em contrapartida, em ensaio realizado em um Latossolo Vermelho distroférico avaliando-se o efeito de doses de silicato de cálcio combinadas com calcário (0+0, 2+0, 4+0, 6+0, 2+4, 4+2, e 0+6 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) na fertilidade do solo e nas plantas de *Urochloa brizantha* submetidas a diferentes intensidades de pastejo, Luz et al. (2011) verificaram maiores valores de pH e das concentrações de Ca, Mg, K e maior saturação por bases (V%), além da menor concentração de H+Al em função da aplicação do silicato nas profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m em um curto período de reação dos materiais no solo (45 dias); entretanto, o calcário proporcionou melhor efeito de correção 12 meses após a aplicação.

Castro e Crusciol (2013ab), em experimentos realizados em condições edafoclimáticas semelhantes às do presente estudo verificaram que aos 6, 12 e 18 meses após a aplicação superficial dos corretivos, considerando todas as profundidades em que houve efeito dos corretivos, as saturações por bases ou foram semelhantes ou foram maiores por consequência da aplicação superficial do silicato, corroborando os resultados do presente estudo. No estudo de Costa e Crusciol (2016), a aplicação superficial do calcário resultou em maior saturação por bases em relação ao tratamento controle até a profundidade de 0,60 m nas duas épocas de amostragens realizadas, aos 48 e 60 meses após a reaplicação do calcário.

Contudo, diversos fatores interferem na reação dos corretivos da acidez do solo em subsuperfície quando esses são aplicados na superfície do solo, tais como a dose e granulometria do produto, a forma de aplicação, o tipo de solo, as condições climáticas (principalmente regime hídrico), sistema de cultivo, e tempo decorrido da aplicação (OLIVERIA; PAVAN, 1996; RHEINHEIMER et al., 2000; SORATTO; CRUSCIOL, 2008; CAIRES, 2013; CASTRO; CRUSCIOL, 2013ab).

Para ocorrer a variação de pH, da mobilidade de cátions básicos no perfil do solo e, por consequência, de saturação por bases, é fundamental a baixa concentração de cátions ácidos (H<sup>+</sup> e Al<sup>+3</sup>) nas camadas mais superficiais, uma vez que a prioridade das ligações será com esses cátions. Vale lembrar que a redução desses cátions

ácidos ocorre quando o pH em água atinge valores de 5,2 e 5,5 (RHEINHEIMER et al., 2000).

O deslocamento de cátions básicos ( $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$ ) é ainda dificultado com a adsorção pelas cargas negativas variáveis geradas com a elevação do pH (CAIRES et al., 2004). Portanto, a mobilidade dos cátions básicos no perfil do solo pode ter sido favorecida pela formação de pares iônicos. A formação de pares iônicos entre os cátions do solo e os compostos inorgânicos pode ocorrer com os próprios produtos da dissolução dos corretivos ou de ânions liberados pela exsudação radicular na rizosfera como  $OH^-$  e  $HCO_3^-$ , além de outros ânions como nitrato ( $NO_3^-$ ), sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) e cloreto ( $Cl^-$ ), provenientes da mineralização de adubos ou da decomposição de resíduos vegetais do solo pelos microrganismos, na camada superficial (ROSOLEM et al., 2003).

Os pares iônicos orgânicos são formados por cátions do solo com compostos hidrossolúveis de baixo peso molecular, os quais também têm origem na decomposição de resíduos vegetais e na exsudação radicular, mediante radicais  $COOH$  (FRANCHINI et al., 2003), que podem agir pontualmente em épocas próximas da colheita ou manejo de restos culturais de culturas antecessoras.

### 6.3.2. Vinte e quatro meses após a última aplicação dos corretivos

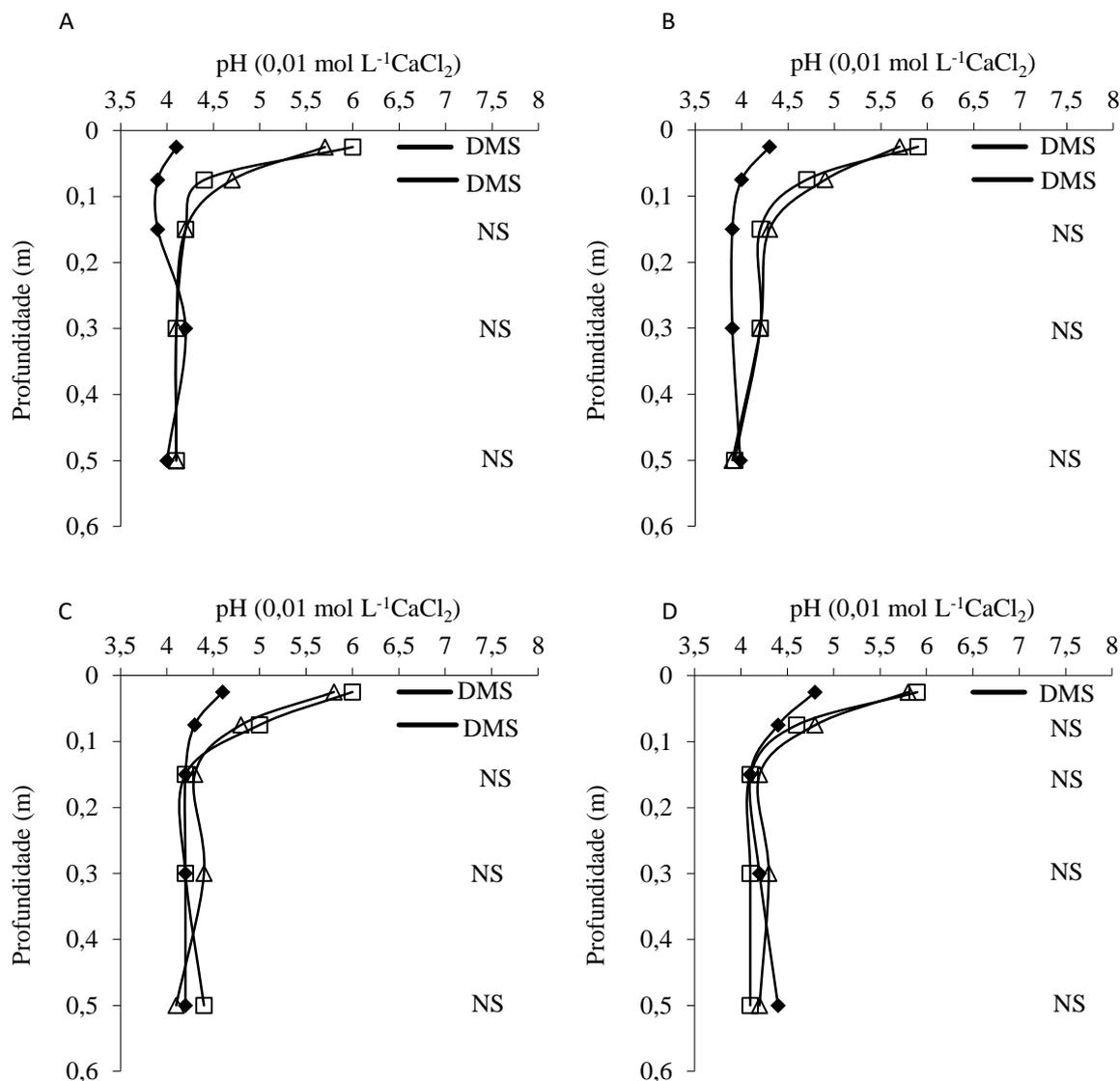


Figura 14. Valores do potencial hidrogeniônico (pH) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (♦)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

Assim como observado na amostragem de solo realizada aos 12 meses após a última aplicação, aos 24 meses após a última aplicação dos corretivos também verificou-se que os valores do pH do solo aumentaram, de modo semelhante, por consequência da aplicação superficial do calcário e do silicato, diferindo do tratamento controle até a profundidade de 0,10 m.

Em razão do grande número de variáveis que podem interferir na reação em subsuperfície dos corretivos aplicados na superfície do solo, como a dose e granulometria do produto, forma de aplicação, tipo de solo, condições climáticas (principalmente regime hídrico), sistema de cultivo, e tempo decorrido da aplicação (OLIVERIA; PAVAN, 1996; RHEINHEIMER et al., 2000; SORATTO; CRUSCIOL, 2008; CAIRES, 2013; CASTRO; CRUSCIOL, 2013ab), têm sido observado resultados contrastantes na literatura mesmo entre estudos de longa duração.

Assim, Caires et al. (2008b; 2011) em condições subtropicais observaram aumento do pH do solo até a profundidade de 0, 60m, aos oito e dez anos após a aplicação superficial do calcário em um Latossolo Vermelho. Entretanto, Costa e Crusciol (2016) em condições tropicais, aos 4 anos após a reaplicação superficial do calcário verificaram aumento dos valores de pH até 0, 20m de profundidade em um Latossolo Vermelho Distroférico.

Castro e Crusciol (2013a), também em condições tropicais, verificaram que aos 6 meses após a aplicação superficial dos corretivos da acidez do solo, silicato e calcário, os valores de pH aumentaram até 0, 10 m de profundidade do solo, não havendo diferenças entre as fontes de corretivos da acidez do solo utilizadas, porém aos 12 e 18 meses após a aplicação dos corretivos, houve efeito dos corretivos aumentando os valores de pH até 0,20 m e 0,40 m, respectivamente, sendo o efeito da aplicação do silicato em comparação à aplicação do calcário mais pronunciado nas camadas de 0, 10 a 0,20 m e 0,20 a 0,40 m. Correa et al. (2007) também estudaram o efeito da aplicação superficial de corretivos da acidez do solo, dentre eles o calcário e silicato, e observaram que após 15 meses o pH do solo aumentou até 0,40 m por consequência da silicatagem, enquanto que o efeito da calagem para esse mesmo período ficou restrito aos primeiros 0,10 m do solo.

É de suma importância que o pH do solo em SPD seja corrigido ao menos nas camadas superficiais do solo, pois o aumento do pH das camadas superficiais do solo por consequência da aplicação superficial dos corretivos da acidez pode acelerar a taxa com que os íons  $\text{HCO}_3^-$ , juntamente com o Ca e Mg movem-se em direção às camadas subsuperficiais do solo para reagir com a acidez.

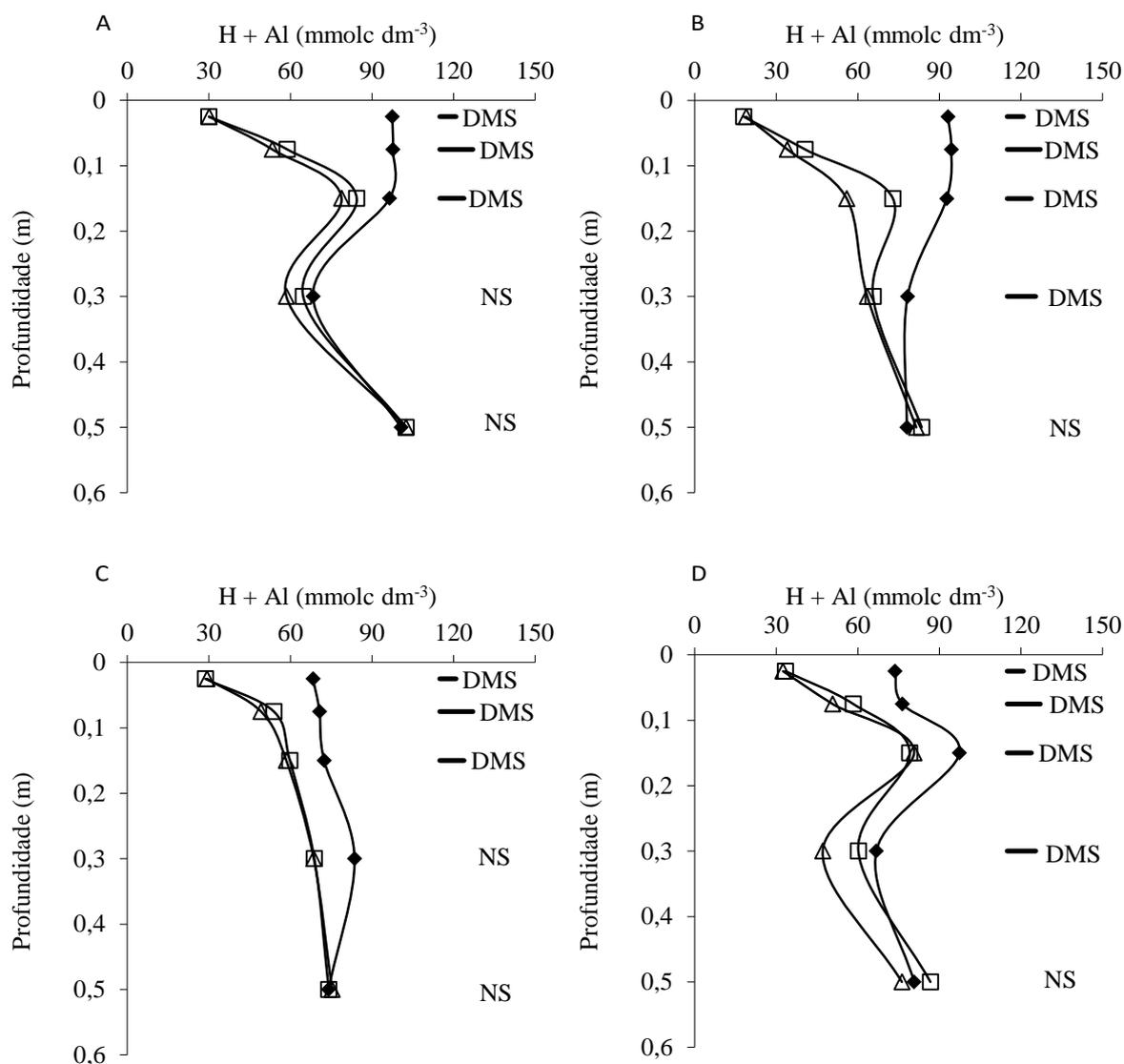


Figura 15. Valores de hidrogênio e alumínio (H + AL) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (♦)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

Comparativamente às concentrações de H+Al observadas no solo aos 12 meses após a última aplicação dos corretivos, verificou-se aos 24 meses após a última aplicação dos corretivos que o efeito da aplicação dos mesmos diminuiu. Assim,

nos sistemas safra-forrageira, safra-safrinha, safra-pousio e safra-adubo verde observou-se que ainda havia menores concentrações de H+Al em função da aplicação dos corretivos em relação ao tratamento controle, respectivamente, até as profundidades de 0,20, 0,40, 0,20 e 0,40 m, e não mais até as profundidades de 0,40, 0,60, 0,60 e 0,60m, respectivamente (Figuras 6 e 15), podendo-se inferir que começou a ocorrer acidificação do solo.

Tal efeito sugere que grandes quantidades dos corretivos, silicato e calcário, já reagiram até 24 meses, e, a partir da reação total de ambos, 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 do uso de adubos nitrogenados de base amoniacal na produção intensiva de grãos (FRANZLUEBBERS et al., 1995; CAIRES et al., 2005; CIOTTA et al., 2002).

Costa e Crusciol (2016), em estudo de longa duração em SPD, também observaram acidificação do solo, pois comparando-se os resultados da reaplicação do calcário com o tratamento controle, aos 48 meses após a reaplicação do calcário, os autores relataram que por consequência da reação do calcário a acidez potencial do solo foi reduzida até 0,60 m, já aos 60 meses após a reaplicação, a redução da acidez potencial ficou restrita até a profundidade de 0,20 m do perfil do solo.

Castro e Crusciol (2013a), em estudo sobre a aplicação superficial de calcário e silicato e rotações de cultura semelhantes às utilizadas no sistema safra-safrinha, verificaram menor acidez potencial até 0,20m de profundidade aos 6 e 12 meses após a aplicação dos corretivos da acidez do solo, e aos 18 meses após a aplicação, a acidez potencial diminuiu até 0,60m, sendo o silicato mais eficiente em corrigir a acidez das camadas mais profundas do solo em relação ao calcário. Nessa mesma linha de pesquisa, porém com rotações entre culturas graníferas e *Urochloa ruziziensis*, Castro e Crusciol (2013b) obtiveram resultados semelhantes, mas aos 18 meses após a aplicação, a acidez potencial diminuiu até 0,40m. Os referidos autores destacaram que a menor acidez potencial das camadas mais profundas do solo, 0,20 a 0,40m e 0,40 a 0,60m, por consequência da aplicação superficial do silicato ocorreu devido à reação mais rápida nas camadas superficiais do solo desse corretivo, formando a frente de alcalinização em um período menor, comparativamente, à reação do calcário.

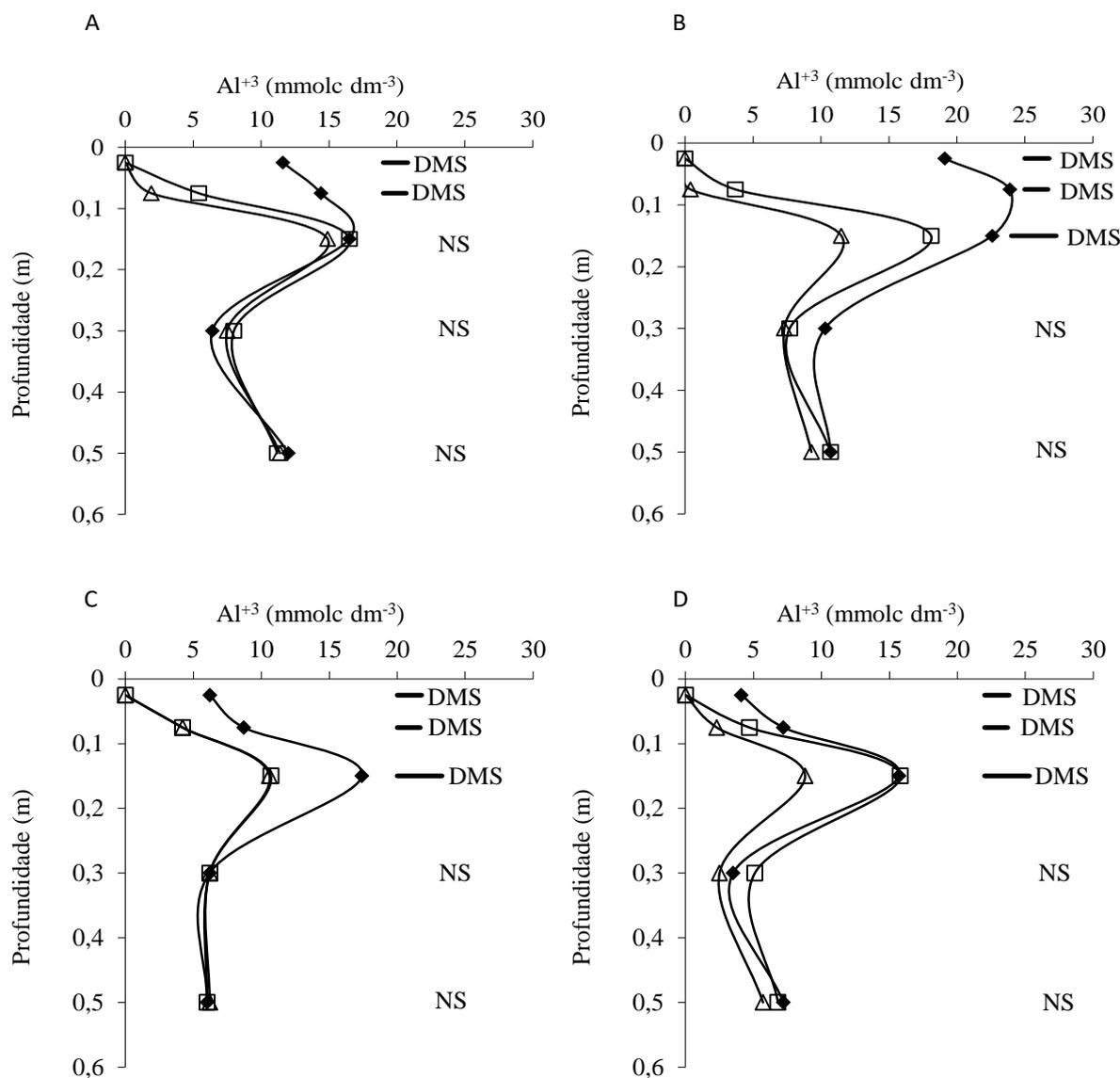


Figura 16. Valores de alumínio trocável ( $Al^{3+}$ ) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

É importante frisar que do mesmo modo ao observado na amostragem de solo realizada aos 12 meses após a última aplicação dos corretivos (Figura 7), as concentrações do  $Al^{3+}$  do solo, observadas aos 24 meses após a última aplicação dos corretivos, na camada de 0 a 0,05 m foram praticamente nulas em todos os sistemas

estudados, havendo, portanto, a inibição da atividade do alumínio tóxico até essa profundidade em função da aplicação do silicato e do calcário (Figura 16).

Conforme observado na amostragem realizada aos 12 meses após a última aplicação dos corretivos da acidez do solo, também aos 24 meses após a última aplicação as concentrações do  $Al^{3+}$  diminuíram em função da aplicação dos corretivos até a profundidade de 0,20 m, porém no sistema safra-forrageira aos 12 meses após a última aplicação esse efeito foi verificado até a profundidade de 0,40 m, já aos 24 meses esse efeito ficou restrito até os primeiros 0,10 m do solo. (Figuras 7 e 16).

Conforme a Figura 16, comparando-se o efeito de ambas as fontes de correção da acidez do solo, silicato e calcário, foram obtidas menores concentrações do  $Al^{3+}$  no sistema safra forrageira na profundidade de 0,05 a 0,10m, no sistema safra safrinha nas profundidades de 0,05 a 0,10m e 0,10 a 0, 20m e no sistema safra adubo verde nas profundidades de 0,05 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m por ocasião da aplicação superficial do silicato, e isso ocorreu pelos mecanismos de redução dos efeitos deletérios do  $Al^{3+}$  promovidos pela adição do silicato, além da elevação do pH.

Conforme descrito por Pulz et al. (2008) e Carvalho Pupatto et al. (2004), os mecanismos de redução dos efeitos deletérios do Al tóxico pela adição de silicato, não se dá apenas pelo aumento do pH do solo, mas também pelo fato da presença do Si precipitar parte do Al na forma de Hidroxialuminosilicato (HAS) (EXLEY, 1998), com consequente redução de sua mobilidade, formação de substâncias pouco solúveis com íons de Al, adsorção do Al móvel em superfícies silicatadas. Todos esses mecanismos podem atuar simultaneamente.

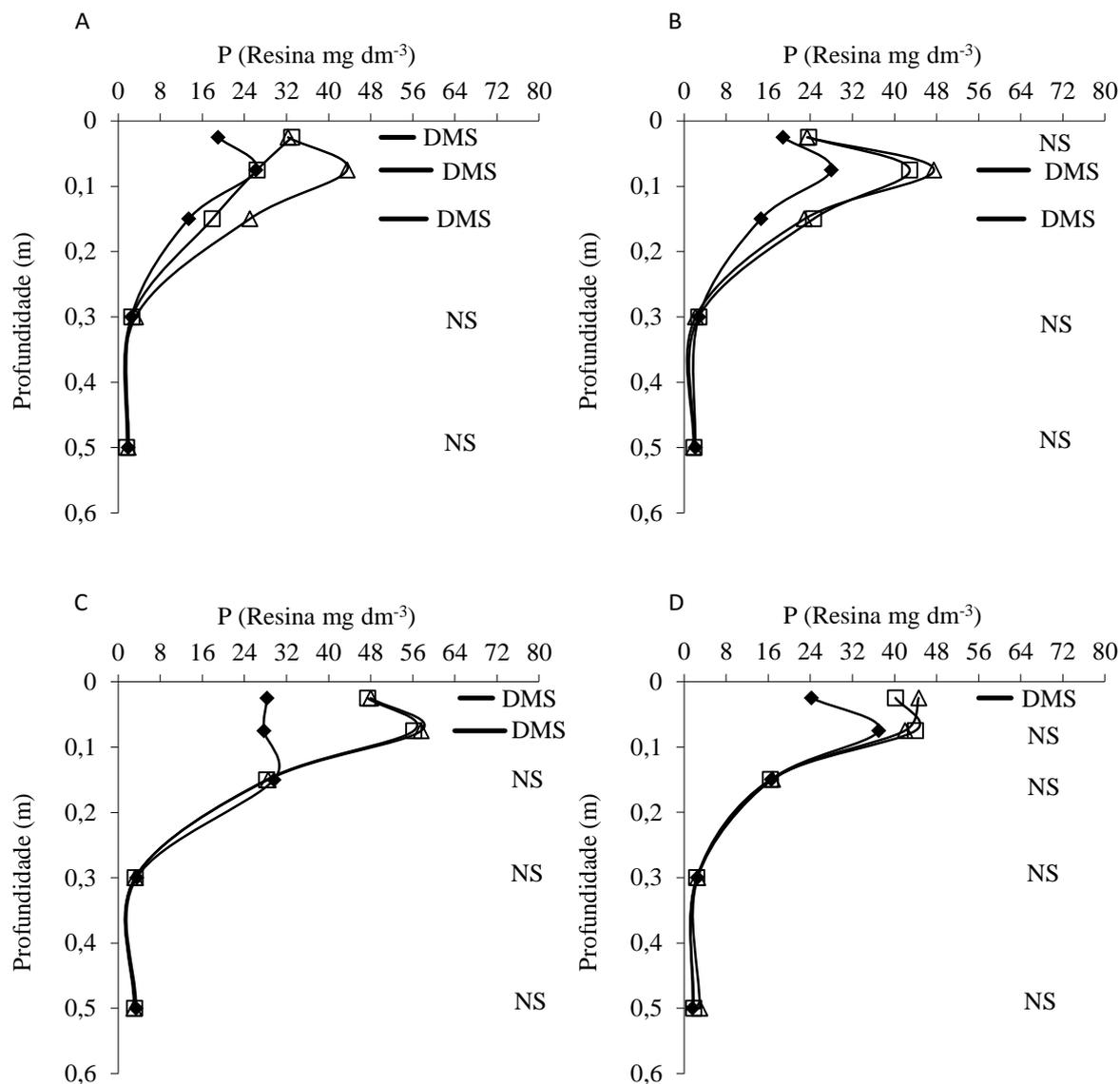


Figura 17. Valores de fósforo (P) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário ( $\square$ ), silicato ( $\Delta$ ) e controle ( $\blacklozenge$ )), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

De modo geral, verifica-se na Figura 17 que a aplicação superficial dos corretivos da acidez do solo aumentou os teores de P disponível até no máximo 0,20 m do perfil do solo, aos 24 meses após a última aplicação dos corretivos da acidez do solo. Assim, os corretivos aumentaram a disponibilidade de P até as profundidades de 0,20, 0,20, 0,10 e 0,05 m, respectivamente, nos sistemas safra-forrageira, safra-safrinha, safra-pousio e safra-adubo verde.

Castro (2012) relatou que após 48 meses da aplicação superficial, os corretivos da acidez, silicato e calcário, continuaram proporcionando maiores teores de fósforo nas três primeiras camadas do solo. Costa e Crusciol (2016) também verificaram que decorridos 60 meses da aplicação superficial de calcário, aumento nos teores de P, porém restrito até a profundidade de 0,20 m.

O uso de corretivos da acidez, como o calcário e o silicato, auxilia na redução do problema de adsorção de P, pois, com a elevação do pH, conforme observado no presente estudo (Figura 14), ocorre aumento na solubilidade dos fosfatos de ferro e alumínio, aumento da concentração de  $\text{OH}^-$  na solução do solo, reduzindo a adsorção na fase sólida deste (CASAGRANDE; CAMARGO, 1997). Além disso, a adição anual de fósforo na adubação de semeadura das culturas potencializa a maior disponibilidade de P em detrimento da redução da imobilização do fósforo no solo (ALVARADO; CAJUSTE, 1993).

Na amostragem de solo realizada aos 12 meses após a aplicação dos corretivos a disponibilidade de P aumentou em função da aplicação dos corretivos da acidez do solo, sendo que nos sistemas safra-forrageira e safra-pousio o referido aumento atingiu, respectivamente, as profundidades de 0,40 e 0,60 m. Já nos demais sistemas de produção, safra-safrinha e safra-adubo verde os efeitos benéficos dos corretivos se restringiram até os primeiros 0,10 e 0,20 m de profundidade, respectivamente (Figura 8).

Contudo, conforme relatado anteriormente, é possível inferir que grandes quantidades dos corretivos, silicato e calcário, já reagiram até 24 meses, não havendo mais efeito nas camadas mais profundas estudadas, 0,20 a 0,40 m e 0,40 a 0,60 m.

Aos 12 meses após a aplicação dos corretivos da acidez, com a aplicação do silicato, maiores concentrações de P disponíveis no solo foram observadas nos primeiros 0,20 , 0,20 e 0,10 m, respectivamente, para os sistemas safra-forrageira, safra-pousio e safra-safrinha, não havendo diferenças entre as concentrações observadas no sistema safra-adubo verde em função da calagem e silicatagem, pois ambas as fontes de correção da acidez do solo alteraram de modo semelhante a disponibilidade de P (Figura 8). Já na amostragem realizada aos 24 meses após a aplicação dos corretivos, somente houve maior concentração do P disponível, por consequência da silicatagem em relação à calagem, nas camadas de 0,05 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m no sistema de produção safra forrageira.

A maior disponibilização de P por consequência da silicatagem, possivelmente, foi decorrente da competição entre os ânions silicatos e fosfatos pelos mesmos sítios de adsorção nos colóides do solo, elevando a disponibilidade deste nutriente para as plantas (PULZ et al., 2008). Hingston et al. (1972) verificaram que após a ação alcalinizante do  $\text{CaSiO}_3$ , há a formação do  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ , que se transforma em  $\text{H}_3\text{SiO}_4^-$  em pH próximo de 7, e pode ser adsorvido aos óxidos de Fe e Al da fração argila, competindo com o  $\text{H}_3\text{PO}_4^-$  pelos mesmos sítios de adsorção. Esses sítios de fosfatos são saturados ou bloqueados pelos ânions silicatos, aumentando a eficiência da adubação fosfatada. Essa competição, conforme Carvalho et al. (2000), ocorre de maneira mais intensa quando se aplica o silicato antes do P das fertilizações.

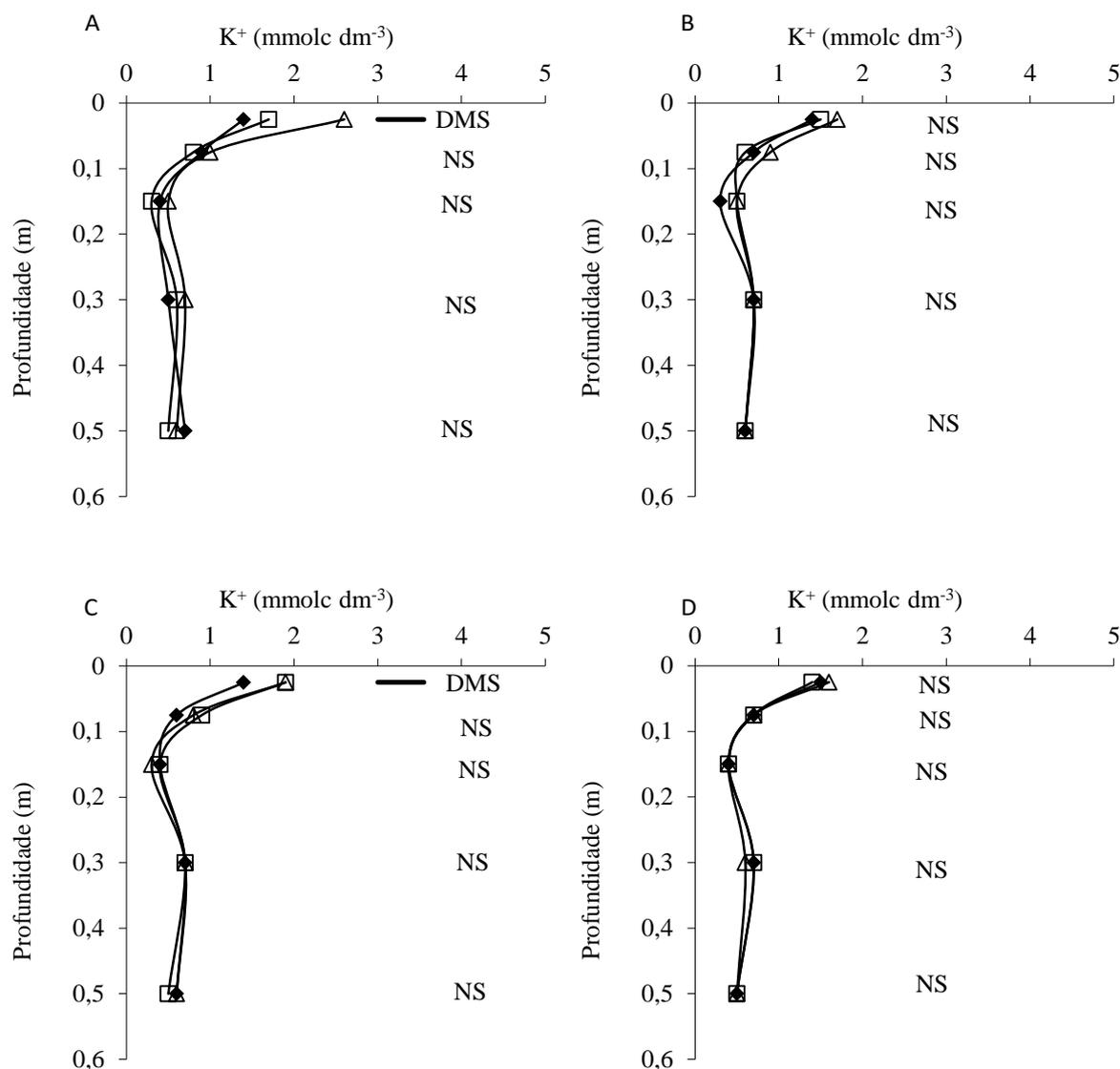


Figura 18. Valores de potássio (K) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

Aos 24 meses após a última aplicação dos corretivos, houve acréscimos das concentrações de K até 0,05 m de profundidade somente nos sistemas safra-forrageira e safra-pousio em função da aplicação superficial dos corretivos, e no sistema safra forrageira observou-se maior concentração do  $K^+$  em razão da silicatagem comparativamente à calagem (Figura 18).

Castro e Crusciol (2013a) relataram que o efeito da correção da acidez sobre o K trocável é controverso, porém alguns autores relataram que a calagem pode reduzir as perdas de potássio por lixiviação (QUAGGIO et al., 1982, 1993; CAIRES et al., 1998; FLORA et al., 2007). Tal efeito está relacionado ao aumento das cargas negativas dependentes de pH, ocasionado pela correção da acidez do solo (QUAGGIO et al., 1982; FLORA et al., 2007).

Com relação às concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , verificou-se que o aumento das mesmas em profundidade por consequência da aplicação dos corretivos, aos 24 meses após a última aplicação, ou foram semelhantes ou diminuíram em relação aos observados aos 12 meses (Figuras 10, 11, 19 e 20). Assim, houve efeito dos corretivos, aumentando a disponibilidade de  $\text{Ca}^{2+}$  no sistema safra-forageira e safra-adubo verde em ambas as amostragens de solo realizadas, até as profundidades de 0,20 e 0, 10 m, respectivamente. Porém, nos sistemas safra-safrinha e safra-pousio as concentrações que na primeira amostragem de solo aumentaram em função da aplicação dos corretivos, respectivamente, até 0, 20 m e 0, 40 m, na segunda amostragem verificou-se aumento das concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  somente até as profundidades do solo de 0, 10 e 0, 20 m, respectivamente.

Quanto ao  $\text{Mg}^{2+}$ , verificou-se que aos 24 meses após a última aplicação dos corretivos, ainda houve efeito dos corretivos, aumentando a disponibilidade desse macronutriente até 0, 20 m de profundidade do solo nos sistemas de produção safra-forageira, safra-pousio e safra-adubo verde, porém no sistema safra-safrinha o efeito dos corretivos ficou restrito até os 0,10 m de profundidade iniciais do perfil do solo, sendo que na primeira amostragem tinha-se verificado efeito dos corretivos da acidez do solo também até 0,20 m (Figuras 11 e 20).

Correa et al. (2007) observaram que as concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  aumentaram por consequência da aplicação superficial dos corretivos, silicato e calcário, respectivamente, até as profundidades do solo de 0,20 e 0,40 m, aos 27 meses após a aplicação dos corretivos.

Costa e Crusciol (2016) verificaram que após 60 meses da reaplicação superficial de calcário em um Latossolo Vermelho Distroférrico houve aumento das concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  até 0,60 m. Caires et al. (2011) relatou que após 11 anos da aplicação superficial do calcário ainda havia maior concentração de  $\text{Mg}^{2+}$

na camada de 0 a 0,05 m do solo, mantendo os níveis desse macronutriente suficiente na superfície do solo.

Contudo, os resultados positivos da calagem superficial dependem de inúmeros fatores. Assim, a movimentação das bases,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , em subsuperfície pode ter ocorrido em razão de diversos fatores, como a formação de pares iônicos inorgânicos com  $\text{NO}_3^-$  (CRUSCIOL et al., 2011),  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{OH}^-$  (RHEINHEIMER et al., 2000),  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  (CAIRES et al., 2006), oriundos da adubação mineral, bem como sua percolação por meio de canais radiculares, microcanais biológicos (bioporos) e planos de fraqueza do próprio solo mantidos intactos pelo SPD (FIDALSKI; TORMENA, 2005), proporcionando o carreamento destes no perfil do solo. Outro fator de grande relevância que pode ter contribuído para a movimentação do  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  em subsuperfície foi a movimentação de íons, pois com o aumento do pH na superfície do solo por consequência da aplicação superficial dos corretivos, a taxa em que os íons  $\text{HCO}_3^-$  juntamente com Ca e Mg descem em subsuperfície para reagir com a acidez do solo é acelerada (CAIRES et al., 2003; CAIRES, 2013). De acordo com Rheinheimer et al. (2000), os efeitos do calcário em profundidade somente ocorrem quando o pH em água na zona de dissolução do corretivo está entre os valores de 5,2 a 5,6. Nessa situação ocorre formação e migração do  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  e  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ , esse efeito em profundidade é conhecido como “frente de alcalinização” e foi descrito por diversos autores (CAIRES et al., 2008a; SORATTO; CRUSCIOL 2008; CASTRO; CRUSCIOL, 2013ab; COSTA; CRUSCIOL; 2016).

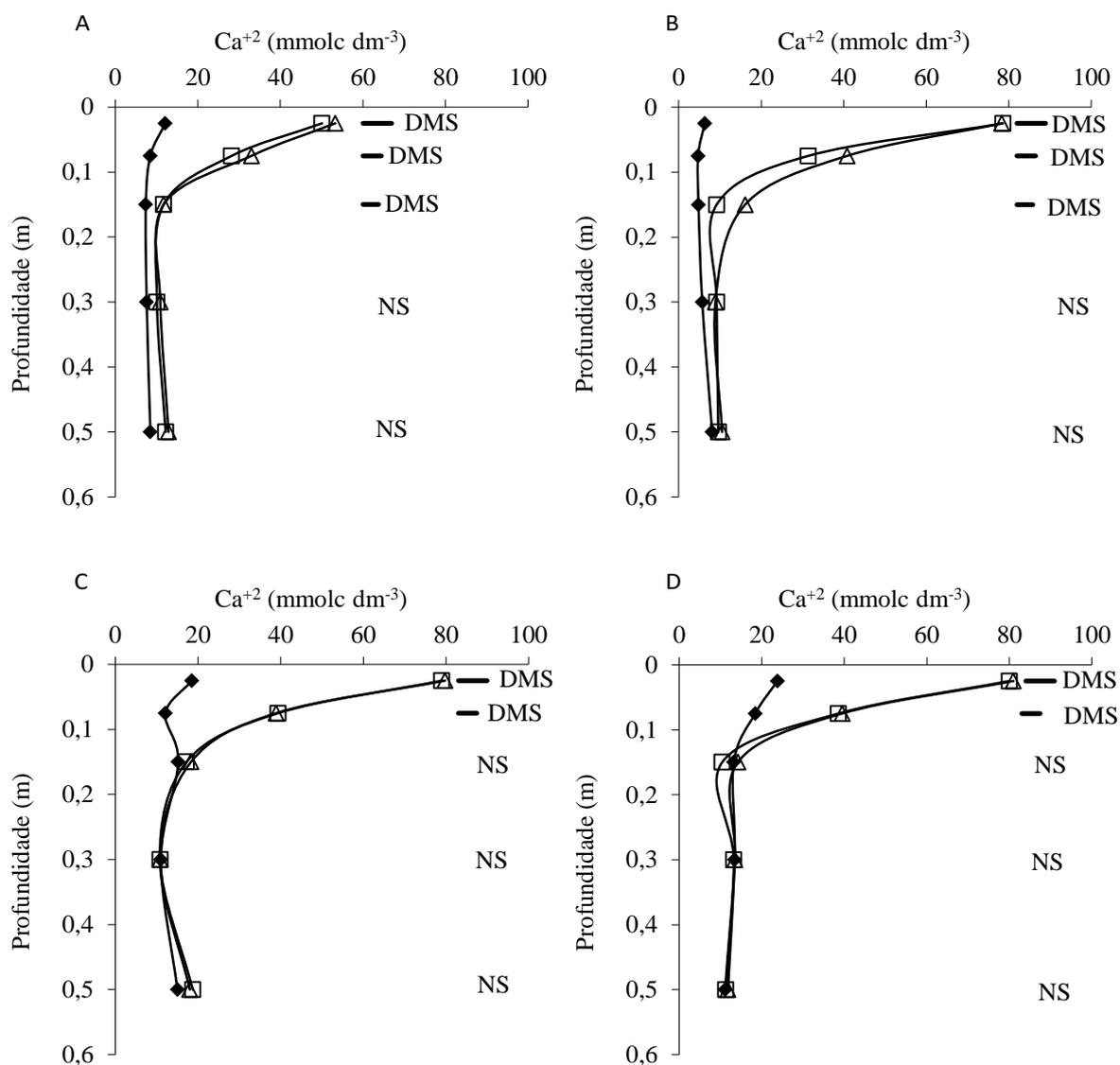


Figura 19. Valores de cálcio (Ca) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (△) e controle (◆)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

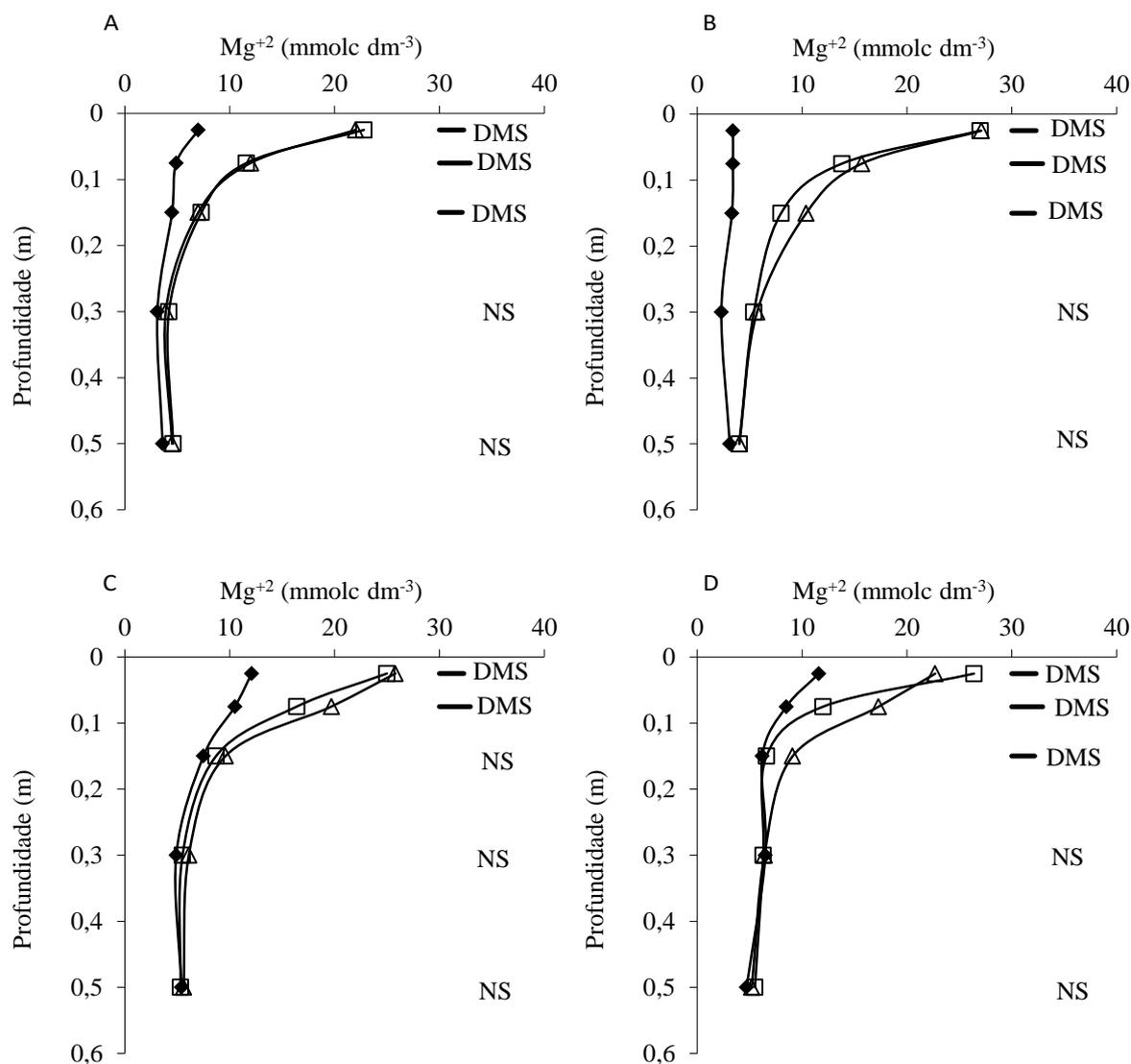


Figura 20. Valores de magnésio (Mg) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (♦)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

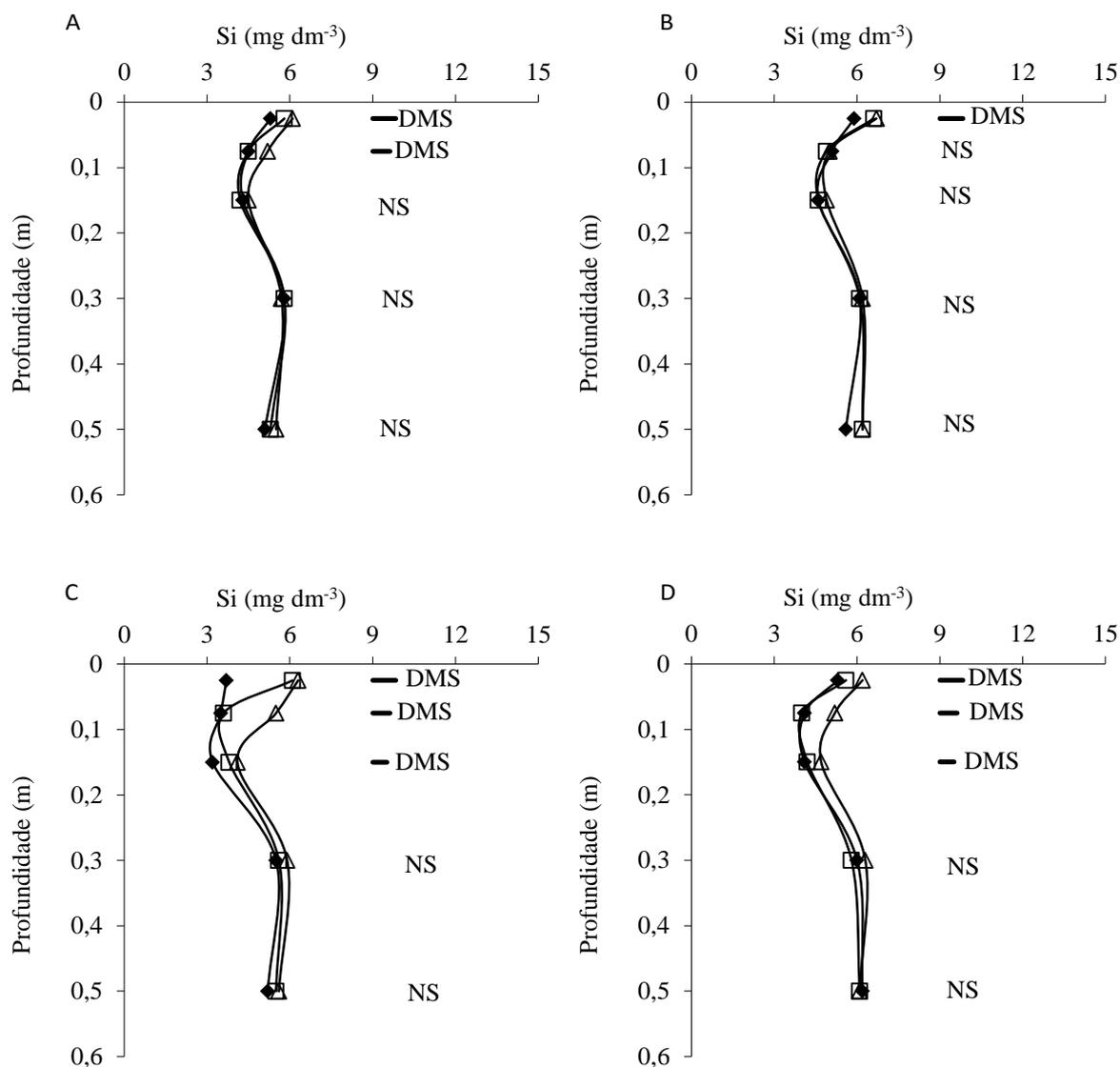


Figura 21. Valores de silício (Si) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (♦)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

Com o tempo a disponibilidade de Si no solo também diminuiu, pois na amostragem de solo realizada aos 12 meses após a última aplicação dos corretivos, observou-se aumento das concentrações do Si no solo em função da silicatagem até as profundidades de 0,40, 0, 40, 0,60 e 0, 60 m, respectivamente, para os sistemas de produção safra-forrageira, safra-safrinha, safra-pousio e safra-adubo verde. No entanto, aos 24 meses após a última aplicação dos corretivos, os aumentos das concentrações de Si

disponíveis por consequência da silicatagem, para os sistemas de produção safrageira, safra-safrinha, safra-pousio e safra-adubo verde ficaram restritos até as profundidades de 0,10, 0,05, 0, 20 e 0,20 m, respectivamente, sendo mais um indicativo que o efeito da aplicação dos corretivos diminuiu em função do tempo (Figuras 12 e 21).

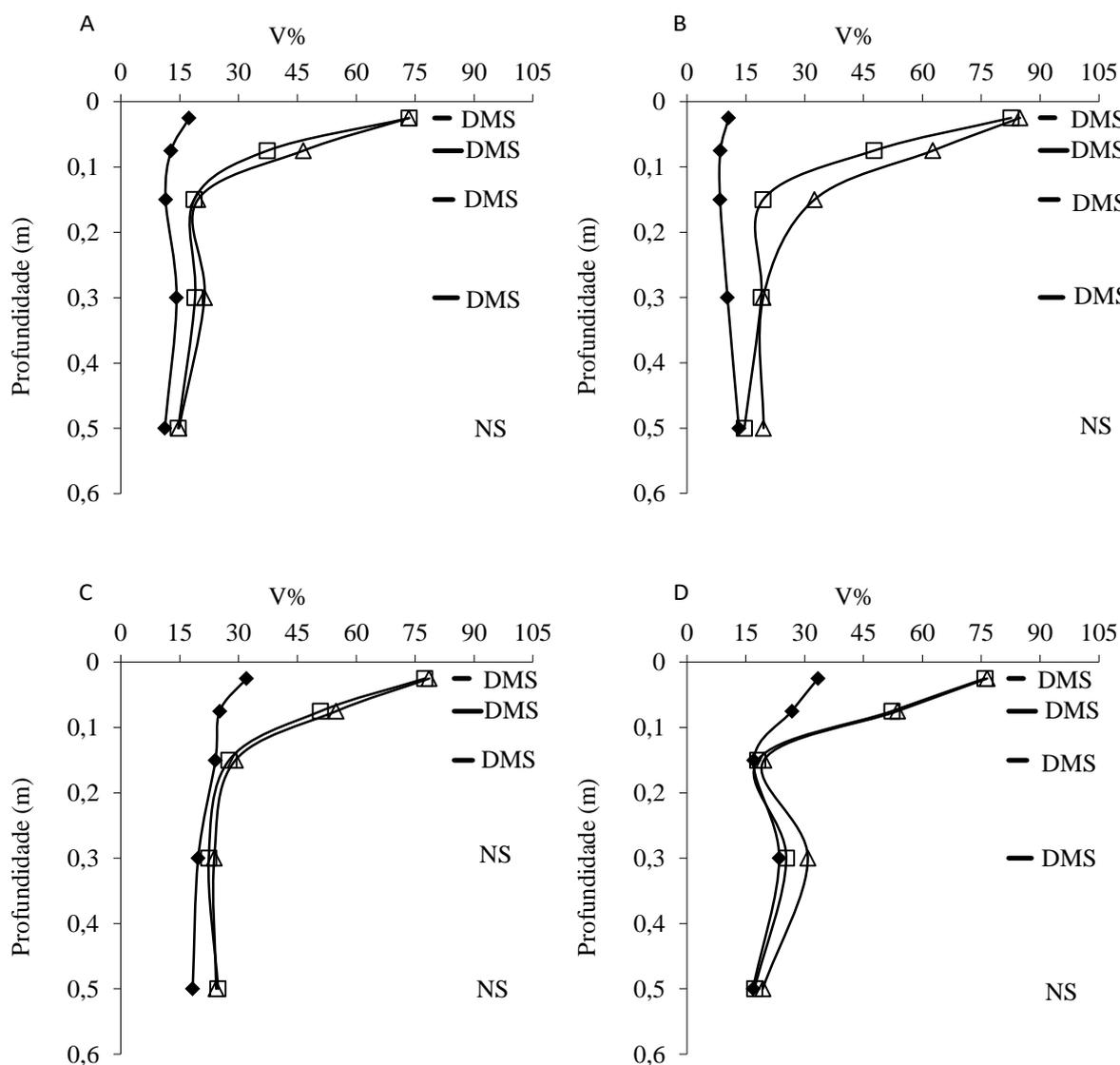


Figura 22. Valores de saturação por bases (V%) do solo em diferentes sistemas de produção (Forrageira (A), Safrinha (B), Pousio (C), e Adubo Verde (D)) em função de aplicação ou não de corretivos (calcário (□), silicato (Δ) e controle (◆)), 24 meses após a última aplicação dos mesmos. Barras horizontais indicam o DMS pelo teste de LSD.

Os resultados das saturações por bases foram o reflexo das alterações provocadas pelos corretivos sobre os resultados de H+Al, K, Ca e Mg observadas aos 24 meses após a última aplicação dos corretivos (Figuras 15, 18, 19 e 20).

Assim, apesar de ter sido notado que está ocorrendo acidez, e também em razão das diferenças entre as concentrações de  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  e  $Mg^{2+}$  aos 12 e 24 meses após a última aplicação dos corretivos da acidez do solo, as diferenças entre as saturações por bases observadas aos 12 e 24 meses após a última aplicação dos corretivos foram pequenas. Comparando-se as saturações por bases, tanto aos 12 quanto aos 24 meses após a aplicação dos corretivos, na camada superficial, 0 a 0,05 m, os valores das saturações por bases na camada superficial do solo estavam acima de 70%, sendo inferiores a 70% nas demais camadas inferiores. Outro ponto importante é que em ambas as amostragens de solo os corretivos elevaram as saturações por bases até 0,40 m, com exceção do sistema safra-pousio em que os corretivos aumentaram as saturações por bases até a camada de 0,10 a 0,20m (Figuras 14 e 23).

Ainda comparando-se as saturações por bases das duas amostragens de solo realizadas, aos 12 meses após a última aplicação dos corretivos, de modo geral, as saturações por bases foram superiores por consequência da silicatagem, comparativamente, à calagem superficial e, um dos fatores que pode ter contribuído diretamente para isso foi a reação mais rápida do silicato no solo, em razão desse material ser mais solúvel que o calcário, porém aos 24 meses após a última aplicação, ambas as fontes de correção da acidez do solo, silicato e calcário, aumentaram de modo semelhante as saturações por bases em todos os sistemas de produção estudados, provavelmente devido ao maior efeito residual do calcário (Figuras 13 e 22).

Assim, a menor acidez potencial (H+Al) observada por consequência da silicatagem superficial indica que o silicato reagiu mais rápido que o calcário, conforme os resultados observados aos 12 meses após a última aplicação, influenciando diretamente os valores das saturações por bases observadas (Figura 6 e 13), bem como, as concentrações semelhantes de (H+Al) observadas aos 24 meses após a última aplicação por consequência da calagem e silicatagem também influenciou diretamente os valores das saturações por bases da segunda amostragem (15 e 22).

Luz et al. (2011), em ensaio realizado em um Latossolo Vermelho distroférico avaliaram o efeito de doses de silicato de cálcio combinadas com calcário (0+0, 2+0, 4+0, 6+0, 2+4, 4+2, e 0+6  $Mg\ ha^{-1}$ , respectivamente) na fertilidade do solo e

nas plantas de *Urochloa brizantha* submetidas a diferentes intensidades de pastejo, e verificaram maiores valores de pH e das concentrações de Ca, Mg, K e maior saturação por bases (V%), além da menor concentração de H+Al em função da aplicação do silicato nas profundidades de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m em um curto período de reação dos materiais no solo (45 dias); entretanto, o calcário proporcionou melhor efeito de correção 12 meses após a aplicação.

Castro e Crusciol (2013b), em estudo realizado em condições edafoclimáticas semelhantes às do presente estudo verificaram que aos 18 meses após a aplicação superficial dos corretivos, considerando todas as profundidades em que houve efeito dos corretivos, as saturações por bases foram maiores nas camadas mais subsuperficiais do solo por consequência da aplicação superficial do silicato. No estudo de Costa e Crusciol (2016), a aplicação superficial do calcário resultou em maior saturação por bases em relação ao tratamento controle até a profundidade de 0,60 m nas duas épocas de amostragens realizadas, aos 48 e 60 meses após a reaplicação do calcário.

Contudo, como já relatado anteriormente, diversos fatores interferem na reação dos corretivos da acidez do solo em subsuperfície quando esses são aplicados na superfície do solo, tais como a dose e granulometria do produto, a forma de aplicação, o tipo de solo, as condições climáticas (principalmente regime hídrico), sistema de cultivo, e tempo decorrido da aplicação (OLIVERIA; PAVAN, 1996; RHEINHEIMER et al., 2000; SORATTO; CRUSCIOL, 2008; CAIRES, 2013; CASTRO; CRUSCIOL, 2013ab).

#### 6.4. Atributos físicos do solo

A densidade, a porosidade total do solo bem como o DMP e o DMG dos agregados do solo não foram influenciadas pelos tratamentos, sistemas de produção e corretivos da acidez do solo, porém os sistemas de produção interferiram na macro e microporosidade na camada mais superficial do solo estudada (0 a 0,05 m), no índice de estabilidade dos agregados na profundidade de 0,10 a 0,20 m e na resistência mecânica à penetração do solo na profundidade de 0,05 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m (Tabelas 15,16 e 17).

Não existe consenso na literatura quanto ao nível crítico da densidade do solo, ou seja, sobre o valor acima do qual o solo é considerado compactado. Camargo e Alleoni (1997) consideram crítico o valor de  $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$  em solos franco-argilosos a argilosos. Já De Maria et al. (1999) constataram que acima de  $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ , em Latossolo Roxo, ocorre restrição ao desenvolvimento de raízes quando o solo estiver na capacidade de campo, o que caracteriza estado de compactação do solo. Com base nos valores citados por esses autores, os valores médios da densidade do solo na Tabela 13 estão abaixo do limite considerado crítico por Camargo e Alleoni (1997) e acima do limite considerado crítico por De Maria et al. (1999), porém para o cálculo da densidade do presente estudo utilizou-se o solo seco e não em sua capacidade de campo, conforme considerado por De Maria et al. (1999), sendo possível inferir que não havia problemas de compactação do solo.

Por consequência da aplicação superficial dos corretivos da acidez do solo, houve maior produção de massa de matéria seca de parte aérea das culturas, o que resultou em maior aporte de palhada à superfície do solo. Quanto aos sistemas de produção, o maior acúmulo de massa de matéria seca de parte aérea foi observado no sistema safra-forageira, seguido pelos sistemas safra-adubo verde, safra-safrinha e safra-pousio.

Contudo, os benefícios ocorridos nos atributos físicos do solo estão diretamente relacionados com a produção e acúmulo de massa de matéria seca das culturas inseridas nos programas de rotação dos sistemas de produção estudados desde o início da instalação do experimento (Tabela 7, 15, 16 e 17).

Tabela 15. Probabilidade dos valores de F para densidade do solo (DS), micro (MIC), macro (MAC) e porosidade total do solo (PT), diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade dos agregados (IEA) e resistência mecânica do solo à penetração (RP) nas profundidades de 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos.

FV	DS	MIC	MAC	PT	DMP	DMG	IEA	RP
0 a 0,05 m								
Sistema (S)	0,386	0,004	0,014	0,229	0,978	0,935	0,436	0,334
Corretivo (C)	0,064	0,862	0,371	0,205	0,562	0,515	0,711	0,794
S x C	0,235	0,102	0,123	0,144	0,722	0,490	0,631	0,198
0,05 a 0,10 m								
Sistema (S)	0,145	0,131	0,129	0,361	0,463	0,318	0,165	0,026
Corretivo (C)	0,188	0,119	0,169	0,452	0,259	0,307	0,141	0,329
S x C	0,501	0,118	0,122	0,195	0,033	0,218	0,081	0,174
0,10 a 0,20 m								
Sistema (S)	0,112	0,117	0,112	0,066	0,542	0,762	0,049	0,045
Corretivo (C)	0,515	0,373	0,451	0,462	0,775	0,678	0,631	0,243
S x C	0,035	0,156	0,053	0,126	0,861	0,691	0,515	0,994

Tabela 16. Densidade (DS), micro (MIC), macro (MAC) e porosidade total do solo (PT) nas profundidades 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos.

FV	DS cm cm <sup>-3</sup>	MIC cm cm <sup>-3</sup>	MAC cm cm <sup>-3</sup>	PT cm cm <sup>-3</sup>
0-0,05 m				
<i>Sistema</i>				
Forageira	1,3	0,35 a	0,16 a	0,51
Safrinha	1,3	0,33 b	0,17 a	0,50
Adubo Verde	1,3	0,32 b	0,16 a	0,48
Pousio	1,4	0,33 b	0,13 b	0,46
<i>Corretivo</i>				
Controle	1,3	0,33	0,15	0,48
Silicato	1,4	0,33	0,15	0,48
Calcário	1,3	0,33	0,16	0,49
0,05-0,10 m				
<i>Sistema</i>				
Forageira	1,4	0,32	0,13	0,45
Safrinha	1,4	0,30	0,14	0,44
Adubo Verde	1,4	0,30	0,14	0,44
Pousio	1,4	0,30	0,13	0,43
<i>Corretivo</i>				
Controle	1,4	0,30	0,14	0,44
Silicato	1,4	0,30	0,13	0,43
Calcário	1,4	0,32	0,11	0,43
0,10-0,20 m				
<i>Sistema</i>				
Forageira	1,4	0,32	0,13	0,45
Safrinha	1,4	0,32	0,13	0,45
Adubo Verde	1,3	0,33	0,12	0,45
Pousio	1,4	0,33	0,11	0,44
<i>Corretivo</i>				
Controle	1,4	0,32	0,13	0,45
Silicato	1,4	0,33	0,12	0,45
Calcário	1,4	0,33	0,13	0,46

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

Tabela 17. Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG), índice de estabilidade dos agregados (IEA) e resistência mecânica do solo à penetração nas profundidades 0-0,05, 0,05-0,10 e 0,10-0,20 m em função do sistema de produção e da aplicação dos corretivos

FV	DMP mm	DMG mm	IEA %	RP MPa
0-0,05 m				
<i>Sistema</i>				
Forageira	2,6	2,6	94,0	0,8
Safrinha	2,6	2,2	92,6	0,8
Adubo Verde	2,6	2,3	93,6	1,0
Pousio	2,6	2,2	91,9	1,0
<i>Corretivo</i>				
Controle	2,7	2,7	93,4	0,9
Silicato	2,6	2,3	92,5	0,9
Calcário	2,6	2,0	93,2	0,9
0,05-0,10 m				
<i>Sistema</i>				
Forageira	2,2	1,4	91,3	1,2 b
Safrinha	2,3	1,4	87,8	1,2 b
Adubo Verde	2,3	1,7	91,6	1,1 b
Pousio	2,3	1,6	89,2	2,0 a
<i>Corretivo</i>				
Controle	2,2	1,5	88,2	1,5
Silicato	2,3	1,5	90,2	1,5
Calcário	2,3	1,6	91,5	1,4
0,10-0,20 m				
<i>Sistema</i>				
Forageira	1,8	1,2	90,0 a	1,2 b
Safrinha	2,0	1,4	87,8 ab	1,0 b
Adubo Verde	2,0	1,3	91,0 a	1,0 b
Pousio	2,0	1,3	84,2 b	1,8 a
<i>Corretivo</i>				
Controle	1,9	1,3	88,0 A	1,6
Silicato	1,9	1,2	87,6 A	1,3
Calcário	2,0	1,4	89,1 A	1,2

Médias seguidas de letras distintas minúsculas para os valores referentes aos sistemas de produção e maiúscula para os valores referentes aos corretivos na coluna diferem estatisticamente pelo teste t ( $p \leq 0,05$ ).

Quanto ao índice de estabilidade dos agregados do solo, verificou-se maior porcentagem desse índice quando utilizou-se forrageiras (safra-forrageira) e espécies de adubo verde ou planta de cobertura na rotação (safra – adubo verde), apesar de somente ter ocorrido efeito significativo na profundidade de 0,10 a 0,20 m, os valores

também foram superiores nas camadas superficiais do solo, 0-0,05 m e 0,05 -0,10 m (Tabela 17).

Além da maior produção de massa de matéria seca de parte aérea (Tabela 7), a produção de raízes pelas espécies utilizadas nesses sistemas de produção, safra-forrageira e safra-adubo verde, também pode ter sido responsável pelo maior IEA observado, principalmente na camada de 0,10 a 0,20 m.

Dentro desse contexto, o elevado acréscimo dos resíduos das culturas em SPD, tanto da parte aérea como das raízes, exercem papel fundamental na agregação do solo (TISDALL; OADES, 1982; ANDERS et al., 2012). As raízes vivas ou em estado de decomposição e também os resíduos da parte aérea das culturas liberam compostos ricos em carbono que servem como fonte de energia para a microbiota do solo. Esses microrganismos, por sua vez, são capazes de liberar consideráveis quantidades de polissacarídeos que auxiliam na agregação por serem agentes cimentantes que promovem a união das partículas do solo (BRIEDIS et al., 2012c).

A agregação do solo é resultante do rearranjo das partículas, floculação e união dos microagregados por meio da ação dos agentes cimentantes, esse processo é dependente do conteúdo de carbono orgânico total (COT), de argila, da biota e das ligações iônicas do solo, dentre outros (BRONICK; LAL, 2005).

Como consequência da melhor agregação do solo, indiretamente, outras propriedades físicas do solo podem ser influenciadas positivamente como a densidade, a porosidade, a aeração e a capacidade de retenção de água (TISDALL; OADES, 1982).

Os microagregados são formados a partir da união de moléculas orgânicas com a argila e cátions polivalentes como o  $\text{Ca}^{2+}$ . O único sistema de produção que exerceu influência nos microagregados do solo foi o sistema safra forrageira na camada de 0 a 0,05 m do solo. Tal resultado pode estar relacionado aos resultados relatados anteriormente referentes aos maiores valores do CBMS, C mineralizável e COP observados nessa camada do solo (Tabelas 6, 8 e 14), por consequência do maior acúmulo de massa de matéria seca promovido pelas forrageiras, havendo, portanto, maior quantidade de “agentes cimentantes” no sistema de produção safra-forrageira que promoveram maior microagregação do solo, além da provável maior atividade microbiana também ter auxiliado na agregação das partículas do solo.

As espécies do gênero *Urochloa* utilizadas no sistema safra forrageira caracterizam-se por possuir sistema radicular vigoroso, fasciculado e com capacidade de explorar o perfil do solo (GARCIA et al., 2013). Na literatura existem diversos relatos de efeitos positivos do uso de espécies que possuem sistema radicular fasciculado na estruturação do solo (SILVA; MIELNICZUK, 1997; CALONEGO; ROSOLEM, 2008; SALTON et al., 2008; CASTRO et al., 2011)

Nesse sentido, as raízes das forrageiras podem ter promovido maior estabilidade de agregados, pois, além de aumentarem as substâncias agregadoras, ou seja, materiais que possuem ação cimentante e aglutinadora, também irão promover a agregação do solo à medida que exercem pressão sobre as partículas minerais durante seu avanço pelo espaço poroso (BAYER; MIELNICZUK, 2008), e, o secamento na região adjacente às raízes em consequência da absorção de água promove o aumento da força de coesão entre as partículas do solo (ZONTA et al., 2006), resultando em maior aproximação dos micro e macroagregados do solo.

Ainda dentro desse contexto, é importante destacar que quando realizou-se dois cultivos por ano agrícola houve maior macroagregação do solo, sendo a menor macroagregação das partículas do solo observada no sistema safra-pousio, o que também pode estar relacionado ao menor aporte de massa de matéria seca nesse sistema de produção (Tabelas 7 e 16).

Castro et al. (2011) constataram que a aplicação dos corretivos, silicato e calcário, e a adoção de um segundo cultivo durante o ano agrícola foram práticas positivas, elevando os valores de macroporos, responsáveis pela aeração do solo. Os autores supracitados relataram que esses efeitos devem estar relacionados ao maior desenvolvimento radicular, visto que a aplicação de corretivos promove alterações químicas no solo que possibilitam maior desenvolvimento deste órgão da planta. Além disso, o cultivo de uma segunda cultura no mesmo ano agrícola possibilita a diversificação da morfologia radicular, resultando em diferentes espaços do solo ocupados pelos diferentes sistemas radiculares das plantas inseridas na rotação de culturas, culminando em benefícios quanto à porosidade do solo, visto que, após a morte das raízes, os canais radiculares formados auxiliam na elevação da macroporosidade do solo (SILVA; ROSOLEM, 2001; CALONEGO; ROSOLEM, 2010).

Apesar de não ter sido observado efeito direto dos corretivos da acidez nas propriedades físicas do solo, os benefícios proporcionados pelos corretivos

sobre a produção de massa de matéria seca durante os sete anos agrícolas anularam o possível efeito deletério da dispersão da argila. São constantes os relatos da ausência de efeito ou até mesmo o aumento da agregação do solo pela aplicação de corretivos da acidez em SPD em estudos de médio e longo prazos (COSTA et al., 2004, CORRÊA et al., 2008; BORTOLUZZI et al., 2010; CASTRO et al., 2011; COSTA; CRUSCIOL, 2016).

A literatura preconiza como sendo o solo ideal aquele que apresente valores de 0,10 a 0,16  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$  para macroporosidade, de até 0,33  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$  para microporosidade e aproximadamente 0,50  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$  para porosidade total do solo (BAVER; GARDNER; GARDNER, 1972; KIEHL, 1979). Assim, de modo geral, os valores médios da macro e microporosidade do solo, observados nos sistemas de produção e também por consequência da aplicação superficial dos corretivos da acidez do solo, estavam próximos do ideal (TABELA 14).

Os maiores valores da resistência mecânica à penetração foram observados no sistema safra-pousio nas profundidades de 0,05 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m. Os valores médios encontrados foram, respectivamente, da ordem de 2 e 1,8 MPa, sendo o valor considerado limitante para o desenvolvimento das culturas de 2 MPa (TAYLOR et al., 1966).

Para que as características físicas do solo sejam melhoradas, a seleção de espécies de plantas de cobertura com sistema radicular vigoroso é fundamental, pois enquanto seu sistema radicular cresce através das camadas de solo com alta resistência à penetração formam-se poros, que facilitarão o crescimento radicular da cultura seguinte (GARCIA et al., 2013).

Algumas gramíneas como as espécies do gênero *Urochloa*, o milheto (*Pennisetum glaucum* L.), dentre outras, possuem sistema radicular fasciculado e habilidade de explorar camadas profundas do perfil do solo. Em contrapartida, apesar de espécies como o feijão guandu e a crotalária explorarem volumes de solo menores, também possuem a habilidade de romper camadas compactadas do solo (ROSOLEM et al., 2002). Assim, as plantas de cobertura são importantes alternativas para promover melhorias dos atributos físicos do solo e também contribuem para a diversificação dos cultivos utilizados nas rotações de culturas (CALONEGO; ROSOLEM, 2010).

## **6.5. Produção de massa de matéria seca de parte aérea, nutrição, componentes da produção e produtividade de grãos.**

### **6.5.1. Ano agrícola 2011/2012**

No ano agrícola 2011/2012, conforme detalhado no item material e métodos, foi cultivada na área a cultura do feijão em área total. Após a colheita da mesma, foram cultivadas as culturas do trigo, milho e *Urochloa brizantha*, que representaram os sistemas safra-safrinha, safra-adubo verde e safra-forrageira, enquanto as outras parcelas permaneceram em pousio, caracterizando o sistema safra-pousio.

#### **6.5.1.1. Feijão**

Os principais resultados nutricionais observados nas folhas das plantas de feijão por consequência da aplicação superficial dos corretivos da acidez do solo relacionaram-se aos teores de P, Ca e Si (Tabela 18). Os corretivos foram aplicados em outubro de 2011 e o feijão semeado em novembro de 2011, logo os resultados observados na nutrição das plantas de feijão indicam que a reação dos corretivos da acidez do solo foi relativamente rápida, pois os benefícios referentes à nutrição em P, Ca e Si puderam ser observados já no florescimento da cultura que ocorreu no início de fevereiro de 2012.

Tabela 18. Teores foliares de macronutrientes e Si do feijão em função da aplicação dos corretivos da acidez do solo e dos sistemas de produção em sistema plantio direto.

Tratamentos	Teores foliares de macronutrientes e Si						
	N	P	K	Ca	Mg	S	Si
<b>CORRETIVOS</b>							
Controle	30,8 a	1,2 b	18,6 a	13,2 b	3,2 a	1,2 a	3,8 c
Silicato	31,0 a	1,5 a	17,5 a	15,2 a	3,8 a	1,2 a	10,7 a
Calcário	33,2 a	1,5 a	19,8 a	15,0 a	3,7 a	1,1 a	4,6 b
<b>SISTEMAS</b>							
Forrageira	32,2 a	1,5 b	18,7 a	14,7 a	3,8 a	1,1 a	6,2 b
Safrinha	34,4 a	1,1 c	17,4 a	14,6 a	3,5 a	1,2 a	5,6 c
Ad. Verde	30,9 a	1,4 b	19,4 a	14,7 a	3,7 a	1,3 a	7,2 a
Pousio	29,4 a	1,8 a	19,2 a	13,7 a	3,3 a	1,1 a	6,6 b
<u>Probabilidade dos valores de F</u>							
Corretivos (C)	0,357	<0,001	0,077	0,007	0,054	0,067	<0,001
Sistemas (S)	0,154	<0,001	0,537	0,321	0,233	0,230	<0,001
S*C	0,875	0,223	0,807	0,740	0,510	0,122	0,114

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste LSD ( $p \leq 0,05$ ).

A análise de solo realizada aos 12 meses após a aplicação dos corretivos ou seja, outubro de 2012, foi possível verificar que a reação dos corretivos da acidez no solo promoveu aumentos dos valores de pH nas camadas superficiais do solo, 0 a 0,05 m e 0,05 a 0,10 m em todos os sistemas de produção estudados (Figura 5), diminuindo a adsorção e aumentando a disponibilidade de P do solo (Figuras 5 e 8), portanto, as plantas de feijão estavam mais bem nutridas em P nos tratamentos que receberam a aplicação dos corretivos da acidez do solo.

O fósforo é um macronutriente essencial para o metabolismo das plantas, desempenhando papel fundamental na transferência de energia da célula, na respiração e na fotossíntese, sendo também componente estrutural dos ácidos nucléicos de cromossomos, assim como de muitas coenzimas, fosfoproteínas e fosfolipídeos (ZUCARELI et al., 2006). Segundo Fageria et al. (2003), a influência do P na cultura do feijoeiro reside no aumento da produção de massa de matéria seca da parte aérea e aumento do número de vagens e massa de grãos, principais determinantes da produtividade da cultura.

Os teores de Ca observados nas folhas das plantas de feijão foram de 13,2, 15,0 e 15,2 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, nos tratamentos controle, com a aplicação de

calcário e silicato (Tabela 18). A melhor nutrição em Ca das plantas de feijão por consequência da aplicação dos corretivos da acidez do solo está diretamente relacionada ao fato de ambos os corretivos serem fonte desse macronutriente, bem como à maior disponibilização deste no solo (Figura 10).

O Ca é indispensável para a germinação do grão de pólen e crescimento do tubo polínico, o que se deve ao fato de estar presente na síntese da parede celular ou no funcionamento da plasmalema, além disso, nas leguminosas, há maior necessidade de Ca durante a nodulação do que para a planta propriamente dita (MALAVOLTA, 1980; EMBRAPA, 1996; MALAVOLTA et al., 1997; VITTI; LIMA; CICARONE, 2006).

Quanto ao Si, os teores foliares observados foram da ordem de 3,8, 4,6 e 10,7 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, nos tratamentos controle, com a aplicação de calcário e silicato (Tabela 18). Destaca-se que com a aplicação do silicato de cálcio e magnésio o teor de Si foi 6,9 e 6,1 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, superior em relação aos tratamentos controle e com a aplicação do calcário.

Outro fato interessante é que houve aumento da disponibilidade de Si com a aplicação do calcário, pois as plantas de feijão estavam mais bem nutridas em Si nesse tratamento comparativamente ao tratamento controle, conforme a Tabela 18. Esse fato pode ser atribuído à solubilização de compostos de sílica com o aumento do pH e, ou, devido ao aumento do pH reduzir a capacidade dos sítios de adsorção de silício no solo, aumentando a sua concentração na solução (PULZ et al., 2008).

Conforme relatado por Miranda e Miranda (2000), a calagem é prática usual na 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, sendo que a elevação do pH tem influência direta na redução da toxidez de Al, podendo alterar a disponibilidade de nutrientes para as plantas, assim em função desses benefícios relacionados à correção da acidez do solo, no presente estudo, foi possível verificar incrementos nos teores foliares de P, Ca e Si com a aplicação dos corretivos.

Os teores foliares de Si observados no presente estudo foram superiores aos observados por Teixeira et al. (2008), em estudo com a aplicação de fontes de Si foliar em plantas de feijão, mesmo quando não foi realizada a correção da acidez do solo. Assim, os teores foliares de Si observados no presente estudo foram, respectivamente, de 3,8, 4,6 e 10,8 g kg<sup>-1</sup> para os tratamentos sem aplicação de corretivos, aplicação de

calcário e silicato, enquanto que os teores de Si observados por Teixeira et al. (2008) foram, respectivamente, 0,79 e 0,51 mg kg<sup>-1</sup>, para o feijão cultivado nas safras das “águas” e “seca”. Crusciol et al. (2013) também em estudo com a aplicação de silício foliar nas culturas da soja, feijão e amendoim verificaram, respectivamente, teores foliares da ordem de 3,6, 4,0 e 3,0 g kg<sup>-1</sup>.

Conforme relatado por Korndorfer et al. (2001) no Brasil não há na literatura valores de referência a respeito das faixas de suficiência, deficiência e toxidez de Si para as plantas, e, além disso é possível que exista diferenças entre cultivares com relação ao potencial dessas em extrair o Si disponível do solo.

Com relação aos sistemas de produção, os principais resultados referem-se aos teores foliares de P e Si, pois as plantas de feijão estavam mais bem nutridas com esses elementos nos sistemas de produção em que não há exportação de nutrientes no período de entressafra (safra-forrageira, safra-adubo verde e safra-pousio) (Tabela 18).

Nesse sentido, os teores de P observados nas folhas das plantas de feijão foram, respectivamente, 1,8, 1,1, 1,4 e 1,5 g kg<sup>-1</sup> para os sistemas safra-pousio, safra-safrinha, safra-adubo verde e safra-forrageira, e os teores foliares de Si observados nesses mesmos sistemas foram, respectivamente, 6,6, 5,6, 7,2 e 6,2 g kg<sup>-1</sup> (Tabela 18).

Os resultados nutricionais supracitados relacionados aos teores foliares de P, Ca e Si influenciaram a produção de massa de matéria seca de parte aérea, número de vagens por planta, grãos por vagem e conseqüentemente a produtividade de grãos da cultura do feijão (Tabelas 18 e 19).

Tabela 19. Produção de massa de matéria seca de parte aérea, componentes da produção e produtividade da cultura do feijão em função da aplicação dos corretivos da acidez do solo e dos sistemas de produção em sistema plantio direto.

Tratamentos	Componentes da produção					
	Matéria seca	População	Vagens por planta	Grãos por vagem	Massa de cem grãos	Produtividade
CORRETIVOS	kg ha <sup>-1</sup>	pl ha <sup>-1</sup>	n <sup>o</sup>		g	kg ha <sup>-1</sup>
Controle	2637 c	198510 a	6,3 c	4,2 b	23,2 b	1192 c
Silicato	3719 a	198524 a	8,9 a	5,0 a	23,6 a	1804 a
Calcário	3131 b	198555 a	8,0 b	4,5 a	22,4 ab	1607 b
SISTEMAS						
Forrageira	3429 a	198569 a	8,8 a	4,3 a	24,7 a	1818 a
Safrinha	2890 b	198584 a	6,8 c	4,4 a	23,5 b	1338 c
Ad. Verde	2942 b	198510 a	8,2 b	4,5 a	24,0 b	1699 b
Pousio	2429 c	198453 a	7,0 c	4,4 a	21,6 c	1282 c
Probabilidade dos valores de F						
Corretivos (C)	<0,001	0,886	<0,001	0,036	0,086	<0,001
Sistemas (S)	<0,001	0,544	<0,001	0,723	<0,001	<0,001
S*C	0,333	0,652	0,255	0,111	0,275	0,144

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste LSD ( $p \leq 0,05$ ).

De acordo com Arf (1994), o P é o nutriente que mais influi na produtividade do feijoeiro na maioria dos solos brasileiros, nesse sentido, ambas as fontes dos corretivos da acidez do solo foram eficientes em aumentar a disponibilidade de P, no entanto, como durante o cultivo do feijão houveram períodos de estresses bióticos e abióticos, a melhor nutrição em Si das plantas por consequência da silicatagem resultou na maior produtividade do feijão comparativamente à obtida por consequência da calagem (Tabelas 18 e 19). Assim, os valores das produtividades de grãos obtidas foram da ordem de 1192, 1607 e 1804 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, nos tratamentos em que não foram aplicados os corretivos da acidez do solo, e com a aplicação superficial de calcário e silicato de cálcio e magnésio.

Em razão dos benefícios promovidos pelo Si, a produção de massa de matéria seca de parte aérea, o número de vagens por planta e a produtividade de grãos da cultura do feijão foram maiores por consequência da silicatagem comparativamente à calagem (Tabela 19), sendo que dentre os componentes da produção, o número de vagens por planta é o que mais contribui para o aumento da produtividade do feijão (ZUCARELI et al., 2006).

Crusciol et al. (2013) relataram que a aplicação de Si via foliar elevou o número de vagens por planta, evidenciando o efeito benéfico da aplicação foliar de Si, o que culminou na elevação da produtividade de grãos de feijão em aproximadamente 290 kg ha<sup>-1</sup>, ou seja, 15%. Os autores descreveram que a melhor arquitetura das plantas fertilizadas com Si pode ter contribuído para o menor contato das vagens de feijão com o solo, reduzindo as perdas por abortamento ou incidência de patógenos.

Durante o cultivo do feijão houveram períodos de déficit hídrico, sendo que um desses períodos ocorreu concomitantemente ao florescimento da cultura (01/02/2012) (Figura 1), e logo após o florescimento as plantas sofreram intenso ataque das lagartas *Pseudoplusia includens* e *Spodoptera frugiperda*.

Tratando-se do efeito benéfico do silício para as plantas de feijão, há relatos de efeitos positivos relacionados à maior tolerância das plantas a doenças e pragas (TEIXEIRA et al., 2010; MORAES et al., 2006) e a condições de salinidade e seca (ZUCCARINI, 2008).

Contudo, a melhor nutrição em Si das plantas cultivadas nas parcelas em que a acidez do solo foi corrigida com o silicato pode ter conferido maior tolerância ao déficit hídrico às plantas de feijão, bem como ao ataque das lagartas, e, assim houve maior produção de massa de matéria seca de parte aérea, número de vagens por planta e produtividade da cultura.

É de suma importância ressaltar que as respostas à aplicação de Si são potencializadas quando as culturas são submetidas a algum tipo de estresse, seja ele de natureza biótica ou abiótica (MA, 2004; GUNES et al., 2007, 2008; HATTORI et al., 2005), e em regiões como o Cerrado caracterizadas por períodos de seca, o Si pode garantir estabilidade às culturas, como o feijão.

Com relação aos sistemas de produção, as produtividades de grãos observadas nos sistemas safra-forageira, safra-adubo verde, safra safrinha e safra – pousio foram, respectivamente, da ordem de 1818, 1699, 1338 e 1282 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 19).

Como já relatado anteriormente, durante o cultivo do feijão ocorreram períodos de veranicos e ataque intenso das lagartas *Pseudoplusia includens* e *Spodoptera frugiperda*, apesar disso as produtividades obtidas foram superiores à estimativa da média nacional de 1074 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2015).

Houve diferenças entre os sistemas de produção quanto à produção de massa de matéria seca de parte aérea, número de vagens por planta e massa de 100 grãos, contudo a variável que exerceu maior influência na produtividade de grãos foi o número de vagens por planta (Tabela 19).

Os benefícios observados nas frações da matéria orgânica e nas propriedades físicas do solo descritos anteriormente, relacionados ao cultivo das *Urochloas spp* em rotação com as culturas graníferas, promoveram melhorias nas condições edáficas, e, por isso a maior produtividade do feijão foi observada no sistema safra-forrageira (Tabelas 9, 11, 16 e 17).

No sistema safra-forrageira, além dos benefícios observados nas frações da matéria orgânica e nos atributos físicos do solo, como o aumento das frações lábeis do C e do COAM bem como do COT, e do IEA, da macro e microporosidade que influem diretamente na aeração, infiltração e retenção de água no solo, são diversos os benefícios promovidos pelas *Urochloas spp* que também podem ter favorecido a maior produtividade do feijão nesse sistema de produção agrícola.

Dentro desse contexto, Lemos et al. (2015) descreveram como sendo as principais vantagens do uso da fitomassa das *Urochloas spp* como plantas de cobertura para o cultivo do feijão em SPD: a maior eficiência na cobertura da superfície do solo, resultando em melhor conservação de água e menor amplitude térmica do solo; maior longevidade na cobertura do solo em razão da lenta decomposição de seus resíduos, controle e minimização das doenças, como o mofo branco, podridão radicular seca ou podridão por *Fusarium* e podridão por *Rhizoctonia*, por ação isolante ou alelopática causada pela microflora do solo sobre os patógenos e maior capacidade da supressão física das plantas daninhas, podendo reduzir ou até mesmo tornar desnecessário o uso de herbicidas pós-emergentes.

Aidar et al. (2000) verificaram que as fitomassas dos consórcios milho + *Urochloa brizantha* e milho + *Urochloa ruziziensis* ultrapassaram 16000 e 17500 kg ha<sup>-1</sup> de massa de matéria seca de parte aérea, respectivamente, antes da semeadura do feijão, garantindo a proteção da superfície do solo por mais de 107 dias.

Diante desses benefícios a Embrapa/ Arroz e Feijão e colaboradores tem difundido o Sistema Santa Fé, esse sistema possui como principais objetivos a produção de forragem para a entressafra e fitomassa em quantidade e qualidade para o SPD (LEMOS et al., 2015).

A fitomassa das plantas de cobertura sobre o solo evitam as perdas de água por evaporação do solo para a atmosfera, assim as quantidades de fitomassas sobre o solo das plantas utilizadas nos diferentes sistemas de produção estudados podem ter minimizado as perdas de água por evaporação, sendo que a ordem decrescente do acúmulo de fitomassa seca sobre o solo desde a instalação do experimento em 2006 foi a seguinte: sistema safra forrageira > safra – adubo verde > safra – safrinha > safra – pousio (Tabela 7), e as produtividades de grãos observadas nos sistemas de produção também seguiram essa mesma ordem decrescente (Tabela 19).

Contudo, a cultura do feijão está entre as que tem apresentado os melhores resultados quando cultivada no SPD, em sucessão as *Urochloas spp*, em comparação com outras plantas utilizadas como plantas de cobertura, principalmente nos cerrados.

A adequada escolha das espécies de cobertura a comporem o esquema de rotação com a cultura do feijão no SPD, considerando, principalmente, as condições climáticas da região, traz inúmeros benefícios relacionados às melhorias nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, prevenção de doenças e infestação por plantas daninhas, os quais resultarão em altas produtividades de grãos do feijão com menor custo de produção.

#### **6.5.1.2. Trigo**

Na Tabela 20 observou-se que a ordem decrescente das concentrações de macronutrientes nas folhas foi a seguinte: N > K > P > Si > Ca > Mg > S.

Os teores foliares de N, P, K, Ca e S obtidos não foram influenciados pela aplicação dos corretivos, pois os mesmos não diferiram do tratamento controle. Por outro lado, os teores de Mg aumentaram em função da aplicação de ambos os corretivos (Tabela 20). O magnésio é constituinte da molécula da clorofila, sendo fundamental na transformação de energia solar em carboidratos pelas plantas.

Quanto aos teores foliares de silício, houve maior teor desse elemento por consequência da aplicação superficial do silicato, que resultou na concentração de 6,2 g kg<sup>-1</sup> desse elemento nas folhas das plantas de trigo. Assim, por consequência da aplicação superficial do calcário e no tratamento controle as concentrações foliares observadas foram, respectivamente, 4,7 e 4,9 g kg<sup>-1</sup> de Si (Tabela 20).

Contudo, a aplicação do silicato foi eficiente não somente em aumentar a disponibilidade de Mg, mas também aumentou a disponibilidade de Si no solo (Figuras 11 e 12), e, posteriormente, esses elementos foram, absorvidos pelas plantas de trigo (Tabela 20).

Tabela 20. Teores foliares de macronutrientes e silício das plantas de trigo em função da aplicação dos corretivos da acidez do solo em sistema de plantio direto.

Tratamentos	Teores foliares de macronutrientes e silício						
	N	P	K	Ca	Mg	S	Si
<b>CORRETIVOS</b>	<u>g kg<sup>-1</sup></u>						
Controle	39,3 a	7,3 a	11,7 a	4,2 a	1,5 b	1,3 a	4,9 b
Silicato	38,5 a	7,3 a	11,9 a	4,4 a	1,9 a	1,3 a	6,2 a
Calcário	39,5 a	7,3 a	11,8 a	4,3 a	1,7 a	1,3 a	4,7 b
	<u>Probabilidade dos valores de F</u>						
	0,539	0,807	0,900	0,372	<0,001	0,838	<0,001

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste LSD ( $p \leq 0,05$ ).

Diversos autores relataram efeitos benéficos em culturas adubadas com Si, principalmente gramíneas, como resistência às doenças e pragas, à toxidez provocada por metais, menor perda de água por transpiração, efeitos na composição mineral, aumento da eficiência fotossintética, dentre outros (EPSTEIN; BLOOM, 2006; BARBOSA FILHO et al., 2001; ACCIOLY et al., 2009; MA; YAMAJI, 2006; GOUSSAIN et al., 2002; BERNI; PRABHU, 2003; PRABAGAR et al., 2010; PULZ et al., 2008).

A massa de matéria seca de parte aérea, o número de espigas por metro quadrado e a massa de mil grãos não aumentaram com a aplicação dos corretivos da acidez do solo, porém com a aplicação do silicato, o número de grãos por espiga e a produtividade de grãos do trigo foram superiores aos demais tratamentos (Tabela 21).

Tabela 21. Massa de matéria seca de parte aérea, componentes da produção e produtividade do trigo em função da aplicação dos corretivos da acidez do solo em sistema plantio direto.

	Componentes da produção				
	Matéria seca	Espigas m <sup>-2</sup>	Grãos espiga <sup>-1</sup>	Massa de mil grãos	Produtividade
CORRETIVOS	kg ha <sup>-1</sup>	nº		g	kg ha <sup>-1</sup>
Controle	967 a	186 a	11,5 b	37,3 a	1318 b
Silicato	1179 a	187 a	14,0 a	36,7 a	1675 a
Calcário	911 a	182 a	11,5 b	38,0 a	1351 b
	Probabilidade dos valores de F				
	0,134	0,304	<0,001	0,192	0,040

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste LSD ( $p \leq 0,05$ ).

Conforme a Figura 1, durante o ciclo da cultura, a distribuição das chuvas foi irregular e isso explica as baixas produtividades obtidas 1318, 1351 e 1675 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, para os tratamentos controle, com a aplicação de calcário e com a aplicação do silicato (Tabela 21). Destaca-se que houve déficit hídrico no período de florescimento da cultura (08/05/2012), o qual ocorreu com aproximadamente 40 DAE, e, conforme observado por Santos et al. (2012), as plantas de trigo que sofreram déficit hídrico no início do florescimento tiveram menor produtividade de grãos.

A maior produtividade obtida por consequência da aplicação do silicato, 21 e 19%, respectivamente, superiores em relação aos tratamentos controle e calcário, pode ser atribuída ao elemento benéfico Si, pois, como já relatado anteriormente por vários autores, diversos são os efeitos benéficos que esse elemento proporciona, principalmente, para as gramíneas, e dentre esses efeitos, destaca-se que o Si reduz a perda de água por transpiração das plantas.

As respostas à aplicação de Si são potencializadas quando as culturas são submetidas a algum tipo de estresse, seja ele de natureza biótica ou abiótica (MA, 2004; GUNES et al., 2007; 2008; HATTORI et al., 2005). A deficiência hídrica, comum no bioma Cerrado, pode diminuir a taxa fotossintética devido a alterações no conteúdo de clorofila, danos no aparato fotossintético e redução da condutância estomática da folha, além de modificar a atividade de algumas enzimas e o acúmulo de açúcares e proteínas na planta (HATTORI et al., 2005), reduzindo a absorção de nutrientes (GUNES et al., 2008), refletindo em menor crescimento e produtividade das culturas.

Contudo, como a cultura passou por períodos de escassez de água durante o ciclo (Figura 1), o maior teor foliar de Si das plantas provenientes do tratamento em que a acidez do solo foi corrigida por meio da aplicação superficial do silicato (Tabela 20), pode ter resultado em menor perda de água por transpiração, e, conseqüentemente, maior número de grãos por espiga e produtividade de grãos do trigo, comparativamente, aos demais tratamentos (Tabela 21).

Com relação à deficiência hídrica, o efeito benéfico do Si, proveniente da aplicação de silicato de cálcio e magnésio, tem sido associado ao aumento da capacidade de defesa antioxidante (GONG et al., 2005) e à manutenção da taxa fotossintética, da condutância estomática da planta, mesmo em solo seco (HATTORI et al., 2005), devido à redução da transpiração através da cutícula (MA; YAMAJI, 2006).

Soratto et al. (2012) observaram aumento de 26,9% da produtividade do trigo com a aplicação foliar de Si, e essa maior produtividade observada no tratamento em que as plantas foram fertilizadas com Si ocorreu devido à maior área fotossintética dessas plantas, pois a produção de massa de matéria seca de parte aérea das mesmas foi superior à observada nas plantas do tratamento sem aplicação de Si.

Estudos tem demonstrado que o Si está envolvido nos aspectos estruturais, fisiológicos e bioquímicos ao longo do ciclo das plantas, esse elemento benéfico pode ativar genes relacionados com a produção de fenóis e atividades enzimáticas envolvidas nos mecanismos de defesa das plantas (MA; YAMAJI, 2006; BUCK et al., 2008; ABDALLA, 2011)

### **6.5.1.3. Milheto**

Em razão da aplicação superficial dos corretivos da acidez do solo, as plantas de milheto avaliadas por ocasião do primeiro corte (52 DAE), estavam mais bem nutridas em N, P e K, além das plantas do tratamento em que foi aplicado o silicato estarem com maior teor de Si em relação ao tratamento controle e com a aplicação do calcário. Em contrapartida, por ocasião do segundo corte, aos 130 DAE, por consequência da aplicação superficial do silicato, as plantas de milheto estavam mais bem nutridas em P, Ca e Si (Tabela 22).

Tabela 22. Teores de macronutrientes e silício da massa de matéria seca de parte aérea do milho por ocasião do 1o e 2o cortes, 52 e 130 DAE, respectivamente, em função da aplicação dos corretivos da acidez do solo em sistema plantio direto.

Tratamentos	Teores de macronutrientes e silício						
	N	P	K	Ca	Mg	S	Si
<u>(52 DAE)</u>							
<u>g kg<sup>-1</sup></u>							
CORRETIVOS							
Controle	21,0 b	6,0 b	16,3 b	4,5 a	3,5 ab	1,8 a	7,8b
Silicato	22,3 a	6,5 a	26,0 a	5,0 a	3,8 a	1,8 a	9,5a
Calcário	22,8 a	6,8 a	24,8 a	4,8 a	3,0 b	2,0 a	7,0b
<u>Probabilidade dos valores de F</u>							
	0,026	0,018	<0,001	0,234	0,049	0,390	0,018
<u>(130 DAE)</u>							
<u>g kg<sup>-1</sup></u>							
CORRETIVOS							
Controle	15,8 a	5,0c	10,8 a	4,5b	2,8 a	1,0 b	10,0 c
Silicato	18,5 a	6,5a	10,6 a	6,5a	2,8 a	1,5 a	13,3 a
Calcário	16,8 a	5,8b	11,0 a	5,3b	3,0 a	1,3 ab	11,5 b
<u>Probabilidade dos valores de F</u>							
	0,107	<0,001	0,002	0,003	0,133	0,037	<0,001

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste LSD ( $p \leq 0,05$ ).

Os maiores teores de P observados na massa de matéria seca de parte aérea das plantas por consequência da aplicação dos corretivos devem-se, principalmente, ao aumento dos valores do pH, diminuição da acidez potencial e da concentração do  $Al^{3+}$ , havendo, portanto, maior disponibilização desse elemento na solução do solo (Figuras 5, 6, 7 e 8). Porém, devido ao silicato ser 6,78 vezes mais solúvel que o calcário (ALCARDE; RODELA 2003), a reação mais rápida do silicato no solo fez com que houvesse maior disponibilização desse macronutriente, comparativamente, à disponibilização de P observada por consequência da calagem, refletindo diretamente na nutrição das plantas de milho.

Além da correção da acidez do solo realizada pelo silicato pode ter ocorrido também a “competição” entre os íons silicato e fosfato pelos mesmos sítios de adsorção dentro do complexo de troca de íons no solo. Assim os íons silicato podem ter deslocado os íons fosfato dos colóides, liberando-os para a solução do solo, conforme descrito por Epstein e Bloom (2006).

Quanto ao Ca, a reação mais rápida do silicato em relação à reação do calcário no solo, também pode ter sido responsável pela melhor nutrição em Ca das plantas nos tratamentos em que a acidez do solo foi corrigida com silicato em comparação aos demais tratamentos (Figura 10). Além disso, esse material fornece silício às plantas, elemento benéfico capaz de proteger as culturas contra estresses bióticos e abióticos e aumentar a eficiência fotossintética das mesmas, e por se tratar de região de inverno seco, houveram períodos de déficit hídrico durante o cultivo das espécies de entressafra, sendo o Si fundamental, atuando nos mecanismos de defesa das plantas contra estresses abióticos e bióticos.

Com relação à deficiência hídrica, conforme discutido anteriormente para a cultura do trigo, o efeito benéfico do Si, proveniente da aplicação de silicato de cálcio e magnésio, tem sido associado ao aumento da capacidade de defesa antioxidante (GONG et al., 2005) e à manutenção da taxa fotossintética, da condutância estomática da planta, mesmo em solo seco (HATTORI et al., 2005), devido à redução da transpiração através da cutícula (MA; YAMAJI, 2006).

Nas plantas, o P é um macronutriente responsável pela formação de ATP, que é um composto rico em energia requerido para a síntese de amido. A energia proveniente do ATP pode ser transferida para outras coenzimas as quais atuam na síntese da sacarose e celulose. Por isso está diretamente relacionado com a produção de massa de matéria seca das culturas e produtividade das mesmas. O cálcio possui papel estrutural e na regulação do metabolismo da planta. A ação conjunta do P, Ca e Si em razão da silicatagem pode ter sido chave para a maior produção de massa de matéria seca do milho observada aos 190 DAE (Tabela 23).

Apesar de não terem sido observadas diferenças entre os tratamentos com relação à produção de massa de matéria seca total do milho, destaca-se que as quantidades totais produzidas foram, respectivamente, da ordem de 12779, 12604 e 13322 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, para os tratamentos controle, e com a aplicação superficial do calcário e do silicato (Tabela 23). Essas quantidades demonstram o elevado potencial de produção de massa de matéria seca de parte aérea que a cultura do milho possui.

Nas regiões brasileiras produtoras de grãos, caracterizadas como de inverno seco, o milho (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Brown), dentre outras gramíneas, têm sido a principal espécie utilizada como planta de cobertura (BOER et al., 2007), pois esta planta caracteriza-se pela elevada produção de fitomassa e persistência sobre o solo

após manejada (SILVA et al., 2010), alta capacidade de extração de nutrientes do solo, com amplas vantagens de reciclagem de nutrientes, principalmente N e K, reduzindo os riscos de perdas por lixiviação (CRUSCIOL; SORATTO, 2009).

Tabela 23. Massa de matéria seca de parte aérea por ocasião do 1º e 2º cortes, 52 e 130 DAE, respectivamente, antes da dessecação aos 190 DAE, e massa de matéria seca de parte aérea total do milho em função da aplicação dos corretivos em sistema plantio direto.

Milheto	Matéria seca (kg ha <sup>-1</sup> )			Total
		DAE		
Corretivos	52	130	190	
Controle	3939 a	5480 a	3360 b	12779 a
Silicato	4062 a	5100 a	4160 a	13322 a
Calcário	3804 a	5220 a	3580 b	12604 a
		Probabilidade dos valores de F		
	0,715	0,687	<0,001	0,551

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste LSD ( $p \leq 0,05$ ).

#### 6.5.1.4. *Urochloa brizantha*

Na massa de matéria seca da parte aérea da *Urochloa brizantha*, analisada antes do manejo com triturador de palha horizontal (130 DAE), verificou-se que os teores de P, Ca, Mg e Si aumentaram com a aplicação dos corretivos da acidez do solo (Tabela 23). Destaca-se que por consequência da aplicação do silicato, os teores de P, Mg e Si da massa de matéria seca da *Urochloa brizantha* foram superiores aos valores observados por consequência da aplicação do calcário. As concentrações de P observadas foram 4,6, 4,9 e 5,2 g kg<sup>-1</sup>, as de Mg 4,1, 5,1 e 6,2 g kg<sup>-1</sup>, e as de Si 10,6, 12,0 e 13,1 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, para os tratamentos controle, com a aplicação de calcário e com a aplicação do silicato (Tabela 24).

Tabela 24. Teores de macronutrientes e silício da matéria seca da parte aérea da *Urochloa brizantha* antes do manejo com triturador de palha horizontal (130 DAE) em função da aplicação dos corretivos da acidez do solo em sistema plantio direto.

Tratamentos	Teores de macronutrientes e silício na matéria seca						
	N	P	K	Ca	Mg	S	Si
<u>g kg<sup>-1</sup></u>							
CORRETIVOS							
Controle	19,8 a	4,6 c	20,2 a	6,1 b	4,1 c	0,9 a	10,6 c
Silicato	18,0 a	5,2 a	17,4 a	7,7 a	6,2 a	0,9 a	13,1 a
Calcário	19,0 a	4,9 b	19,2 a	7,9 a	5,1 b	0,9 a	12,0 b
<u>Probabilidade dos valores de F</u>							
	0, 208	<0,001	0, 353	<0,002	<0,001	0, 970	<0, 001

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste LSD ( $p \leq 0,05$ ).

Como o silicato é mais solúvel que o calcário (ALCARDE; RODELA 2003), os benefícios relacionados ao aumento do pH, diminuição da acidez potencial e da concentração do  $Al^{3+}$  do solo, foram mais acentuados com a aplicação desse corretivo, resultando assim em maior disponibilidade de P e Mg na solução do solo (Figuras 5, 6, 7, 8 e 11). Além da correção da acidez do solo realizada pelo silicato pode ter ocorrido também a “competição” entre os íons silicato e fosfato pelos mesmos sítios de adsorção dentro do complexo de troca de íons no solo. Assim os íons silicato podem ter deslocado os íons fosfato dos colóides, liberando-os para a solução do solo, conforme descrito por Epstein e Bloom (2006).

Quanto ao Si, a maior disponibilidade desse elemento no solo em função da silicatagem ocorreu, principalmente, devido ao silicato ser fonte desse elemento benéfico, além dos benefícios relacionados à diminuição da acidez também terem aumentado a disponibilidade do Si no solo (Figura 12).

Nas plantas, principalmente nas gramíneas como o trigo, milho e a *Urochloa brizantha*, o silício é acumulado na epiderme foliar, aumentando a resistência da parede celular e assim diminuindo a perda de água por evapotranspiração, elevando a tolerância às pragas e doenças, a metais pesados e alumínio tóxico, além de aumentar a eficiência fotossintética e a disponibilidade de P (MA; YAMAJI, 2006; GOUSSAIN et al., 2002; BERNI; PRABHU, 2003; PRAGABAR et al., 2011; PULZ et al., 2008).

A maior tolerância das plantas aos estresses bióticos e abióticos, como o déficit hídrico, confere estabilidade às culturas, visto que em regiões produtoras de grãos como o cerrado pode ocorrer períodos de seca.

Quanto à produção de massa de matéria seca da parte aérea da *Urochloa brizantha*, nota-se que aos 130 DAE, houve maior produção de fitomassa quando por consequência da silicatagem, devido aos resultados dos teores nutricionais e do elemento benéfico Si já descritos. Assim, os valores da produção de massa de matéria seca da parte aérea da *Urochloa brizantha*, obtidos aos 130 DAE, foram 7440, 7960 e 9310 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, quando não foi feita a aplicação dos corretivos do solo, com a aplicação de calcário e com a aplicação do silicato (Tabela 25).

É de suma importância destacar que as quantidades de massa de matéria seca da parte aérea da *U. brizantha*, antes da dessecação (190 DAE), foram, respectivamente, 7100, 8160 e 9600 kg ha<sup>-1</sup>, para o tratamento controle, com a aplicação superficial do calcário e com a aplicação superficial do silicato (Tabela 25).

As *Urochloas spp* tem se destacado como plantas de cobertura no SPD, pois além da produção de fitomassa e as melhorias nos atributos do solo, outra característica que tem conferido sucesso a essas forrageiras perenes nos sistemas de produção de grãos em regiões de inverno seco, é sua maior persistência sobre o solo (CRUSCIOL et al., 2009). O cultivo de culturas anuais em sucessão às forrageiras perenes tem proporcionado ganhos de produtividade, eficiência de utilização de fertilizantes e, conseqüentemente, maior sustentabilidade dos sistemas de produção (CRUSCIOL; SORATTO, 2010).

Tabela 25. Massa de matéria seca de parte aérea antes do manejo com triturador de palha horizontal (130 DAE) e antes da dessecação (190 DAE) e massa de matéria seca total da *Urochloa brizantha* em função da aplicação superficial de calcário e silicato.

<i>Urochloa brizantha</i>	Matéria seca (kg ha <sup>-1</sup> )		
	130 DAE	190 DAE	Total
Corretivos	7440 b	7100 c	14540 c
Controle	9310 a	9600 a	18910 a
Silicato	7960 b	8160 b	16120 b
Calcário			
	<u>Probabilidade dos valores de F</u>		
	<0,001	<0,001	<0,001

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste LSD ( $p \leq 0,05$ ).

### 6.5.2. Ano Agrícola 2012/2013

No segundo ano agrícola, conforme detalhado no item material e métodos, foi cultivada a cultura do arroz em área total. Após a colheita da mesma, foram cultivadas as culturas do trigo, crotalária e *Urochloa brizantha*, que representaram os sistemas safra-safrinha, safra-adubo verde e safra-forrageira, respectivamente, enquanto as outras parcelas permaneceram em pousio, caracterizando o sistema safra-pousio.

#### 6.5.2.1. Arroz

Na Tabela 26 observou-se que com a aplicação dos corretivos, calcário e silicato, os teores foliares de Ca aumentaram, e com a aplicação do silicato, além dos teores de Ca, aumentaram também os teores foliares de Si, não havendo efeito dos corretivos da acidez do solo quanto aos demais macronutrientes. Crusciol et al. (2016), em estudo realizado em Selvíria-MS, não observaram aumentos das concentrações de N, P, K, Ca e Mg nas folhas das plantas de arroz por consequência da aplicação superficial do calcário e silicato, mas também observaram que as concentrações foliares de Si aumentaram em razão da aplicação do silicato. Entretanto, Soratto e Crusciol (2008) verificaram aumento linear das concentrações de Ca e Mg nas folhas das plantas de arroz em função do aumento das doses de calcário aplicadas.

Em geral, as diferenças com relação aos efeitos dos corretivos nos teores foliares das plantas de arroz do presente estudo com os estudos de Crusciol et al. (2016) e Soratto e Crusciol (2008) podem estar relacionadas às características intrínsecas da fertilidade do solo de cada local.

Quanto aos sistemas de produção, não houve diferenças entre os teores foliares dos macronutrientes N, P, K, Ca, Mg e S, somente com relação ao elemento benéfico Si, verificou-se maior concentração foliar desse elemento no sistema safra-forrageira, comparativamente, aos demais sistemas de produção (Tabela 26).

A elevada produção de fitomassa da *Urochloa brizantha*, cultivada no período de entressafra antes da semeadura do arroz, aliada ao acúmulo de Si dessa espécie contribuíram para a ciclagem desse elemento. Assim, provavelmente, após a decomposição da fitomassa da forrageira o Si foi absorvido pelas plantas de arroz.

Tabela 26. Teores de macronutrientes e Si foliares do arroz em função da aplicação dos corretivos e dos sistemas de produção em sistema plantio direto.

Tratamentos	Teores foliares de macronutrientes e Si						
	N	P	K	Ca	Mg	S	Si
<u>g kg<sup>-1</sup></u>							
<b>CORRETIVOS</b>							
Controle	34,7 a	2,9 a	39,0 a	1,5 b	1,4 a	1,0 a	21,8 b
Silicato	33,4 a	3,0 a	39,4 a	1,8 a	1,5 a	1,0 a	30,1 a
Calcário	33,0 a	3,0 a	39,2 a	1,8 a	1,5 a	1,0 a	22,8 b
<b>SISTEMAS</b>							
Forrageira	36,4 a	3,0 a	40,0 a	1,7 a	1,6 a	1,0 a	31,0 a
Safrinha	34,9 a	3,0 a	39,3 a	1,6 a	1,4 a	1,0 a	21,2 b
Ad. Verde	31,4 a	3,0 a	38,8 a	1,6 a	1,5 a	1,0 a	23,6 b
Pousio	32,1 a	2,8 a	38,5 a	1,8 a	1,4 a	1,0 a	23,7 b
<u>Probabilidade dos valores de F</u>							
Corretivos (C)	0,784	0,100	0,886	<0,001	0,113	0,384	<0,001
Sistemas (S)	0,097	0,144	0,314	0,184	0,123	0,306	<0,001
S*C	0,599	0,187	0,365	0,316	0,137	0,807	0,128

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste LSD ( $p \leq 0,05$ ).

Segundo Korndörfer et al. (2005), aumentos da disponibilidade de Si no solo são normalmente acompanhados por acréscimo da concentração desse elemento nas plantas, com resultados positivos no crescimento e na produtividade de diversas gramíneas, especialmente arroz, cana-de-açúcar, sorgo, milho, braquiária, aveia, trigo e milho.

O Si não é considerado elemento essencial às plantas (JONES; HANDRECK, 1967), porque não atende aos critérios diretos e indiretos de essencialidade. No entanto, Epstein (1999) cita efeitos benéficos em culturas adubadas com Si como resistência às doenças e pragas, resistência à toxidez provocada por metais, menor evapotranspiração, efeitos na composição mineral, dentre outros (LIANG et al., 2005; PAIM et al., 2006; LIANG et al., 2007; CUNHA et al., 2008). Por isso, o Si é classificado como elemento benéfico ou útil (MARSCHNER, 1995). Logo, em regiões susceptíveis a períodos de veranicos, a correção da acidez dos solos com silicatos pode otimizar a nutrição silicatada das culturas, constituindo-se em importante alternativa para a exploração do potencial produtivo das mesmas.

Por consequência da aplicação de ambas as fontes de corretivos da acidez do solo, o número de panículas por metro quadrado e de espiguetas por panícula e a

porcentagem de espiguetas férteis aumentaram. Entretanto, não houve diferença entre as fontes de corretivos da acidez do solo aplicadas, calcário e silicato, com relação ao número de panículas por metro quadrado e espiguetas por panícula, porém a maior porcentagem de espiguetas férteis foi obtida em função da aplicação superficial do silicato (Tabela 27).

Crusciol et al. (2016) também relataram que a aplicação superficial de calcário e silicato aumentaram o número de panículas de arroz por metro quadrado, não havendo efeito no número de espiguetas por panícula, na fertilidade das espiguetas, ou na massa de 1000 grãos, no entanto, o uso do silicato exclusivo ou misturado com gesso, resultou no maior número de panículas de arroz por metro quadrado, comparativamente, aos outros tratamentos, e assim os autores destacaram que ficou claro o efeito do Si em aumentar a produtividade do arroz.

Apesar dos efeitos positivos relatados, pouco se conhece sobre influência do Si nos componentes de produção do arroz, sendo contraditórios os resultados encontrados na literatura. Assim, Crusciol et al. (2016) e Takahashi (1995) observaram aumento no número de panículas por metro quadrado enquanto Mauad et al. (2003) não observaram efeito positivo da aplicação do silicato nos componentes produtivos do arroz.

Como descrito anteriormente, por consequência da aplicação dos corretivos os teores foliares de Ca aumentaram, e, como o Ca atua na germinação do grão de pólen e formação do tubo polínico (MARSCHNER, 1995), conseqüentemente, o número de panículas por metro quadrado e de espiguetas por panícula dos tratamentos em que foi realizada a correção da acidez do solo foi superior, comparativamente, ao tratamento controle (Tabelas 26 e 27).

Contudo, o elemento benéfico Si influenciou a fertilidade das espiguetas, pois a maior porcentagem de espiguetas férteis foi obtida quando a correção da acidez do solo foi feita com a aplicação do silicato. Assim, foram observadas as porcentagens de 65, 70 e 74% de espiguetas férteis, respectivamente, quando não foi realizada a correção da acidez do solo, com a aplicação do calcário e com a aplicação do silicato.

Além da aplicação do silicato ter aumentado a porcentagem de espiguetas férteis, também foi verificada maior produção de massa de matéria seca de parte aérea das plantas de arroz por consequência da aplicação desse corretivo da acidez do solo (Tabela 27).

Dorneles et al. (2016) também observaram aumento da massa de matéria seca de parte aérea das plantas de batata que receberam Si via solução nutritiva. Ao menos em parte, o efeito benéfico do Si em aumentar a produção de massa de matéria seca das culturas, principalmente das gramíneas, pode ser atribuído às variações anatômicas produzidas pela deposição de sílica nas paredes das células epidérmicas, que mantém as folhas eretas, melhorando a interceptação luminosa e, conseqüentemente, a taxa fotossintética das plantas (GUNES et al., 2007; DORNELES et al., 2016; MA; TAKAHASHI, 2002; SAVIO et al., 2011).

Korndorfer e Lepsch (2011) relataram os efeitos benéficos do Si em diversas culturas devido à deposição do Si na cutícula das folhas, conferindo proteção às plantas, minimizando os efeitos negativos de estresses bióticos e abióticos. Como durante o cultivo do arroz houve períodos de veranicos (Figura 1), e conforme já discutido anteriormente, os efeitos do elemento benéfico Si são potencializados quando as culturas, principalmente gramíneas, sofrem com estresses bióticos ou abióticos, a massa de matéria seca de parte aérea e o enchimento das espiguetas foram influenciados positivamente pelo Si, e conseqüentemente, a produtividade do arroz (Tabela 27).

Nesse sentido, o fornecimento de Si, por meio da correção da acidez do solo com a aplicação do silicato, pode ter reduzido a perda de água por transpiração (MA; YAMAJI, 2006) e ou aumentado a superóxido dismutase, a peroxidase e a atividade da catalase (MOUSSA, 2006), minimizando os danos causados por veranicos (CRUSCIOL et al., 2009). Ainda, Segundo Agarie et al. (1998), o Si estaria também envolvido na biossíntese dos componentes da parede celular, devido às folhas das plantas de arroz tratadas com Si apresentarem níveis mais altos de polissacarídeos do que as folhas das plantas não tratadas com Si. Portanto, a ação benéfica do Si tem sido associada a diversos efeitos indiretos, dentre os quais, destacam-se a redução da transpiração, o aumento da resistência mecânica das células, maior resistência das plantas a pragas e doenças, aumento da absorção de nutrientes, além do aumento da capacidade fotossintética em razão da melhoria da arquitetura das plantas que, por sua vez, passam a interceptar de maneira mais eficiente a luz solar (GUNES et al., 2007; DORNELES et al., 2016; MA; TAKAHASHI, 2002; SAVIO et al., 2011). Outros autores também relataram que o Si pode aumentar o crescimento e produtividade do arroz (SAVANT et al., 1997; SEEBOLD et al., 2000; CRUSCIOL et al., 2016).

Contudo, a nutrição em Ca e em Si explicam as produtividades obtidas, 1997, 2755 e 3064 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, nos tratamentos sem aplicação de corretivos da acidez do solo, com a aplicação do calcário e com a aplicação do silicato (Tabelas 26 e 27).

As produtividades obtidas por Crusciol et al. (2016) em Selvíria – MS foram, respectivamente, da ordem de 3591 e 4100 kg ha<sup>-1</sup> para os tratamentos que receberam calcário e silicato. As maiores produtividades obtidas no estudo de Crusciol et al. (2016) devem-se, provavelmente, às melhores condições climáticas observadas no estudo dos referidos autores. Logo, pode-se inferir pelos resultados supracitados que para a cultura do arroz de terras altas, a correção da acidez do solo com o silicato é mais eficiente em relação a correção da acidez do solo com calcário, pois maiores produtividades podem ser alcançadas devido aos benefícios proporcionados pelo Si à essa cultura.

Tabela 27. Produção de massa de matéria seca de parte aérea, componentes da produção e produtividade da cultura do arroz em função da aplicação superficial de calcário e silicato e dos sistemas de produção em sistema plantio direto.

Tratamentos	Componentes da produção					
	Matéria seca	Panículas	Espiguetas panícula <sup>-1</sup>	Fertilidade das espiguetas	Massa de mil espiguetas	Produtividade
CORRETIVOS	kg ha <sup>-1</sup>	n° m <sup>-2</sup>	n°	%	g	kg ha <sup>-1</sup>
Controle	5557 b	118 b	119 b	65 c	22 a	1997 c
Silicato	6527 a	140 a	133 a	74 a	22 a	3064 a
Calcário	5722 b	138 a	130 a	70 b	22 a	2755 b
SISTEMAS						
Forrageira	7109 a	159 a	144 a	66 c	23 a	3426 a
Safrinha	5549 c	104 d	106 c	70 b	21 b	1559 d
Ad. Verde	6511 b	143 b	131 b	74 a	23 a	3085 b
Pousio	4571 d	123 c	128 b	69 b	22 ab	2351 c
Probabilidade dos valores de F						
Corretivos (C)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,953	<0,001
Sistemas (S)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,047	<0,001
S*C	0,212	0,188	0,161	0,148	0,951	0,150

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste LSD ( $p \leq 0,05$ ).

Quanto aos sistemas de produção, quando o arroz foi cultivado após a *Urochloa brizantha*, foram obtidos os maiores valores referentes à massa de matéria seca de parte aérea (7109 kg ha<sup>-1</sup>), ao número de panículas por metro quadrado (159), ao número de espiguetas por panícula (144) e à massa de mil espiguetas (23 g), sendo o

sistema safra-forrageira o que proporcionou a maior produtividade do arroz (3426 kg ha<sup>-1</sup>) (Tabela 27).

A segunda maior produtividade do arroz (3085 kg ha<sup>-1</sup>) foi obtida quando as plantas foram cultivadas após o milho, sendo os valores referentes à massa de matéria seca de parte aérea, ao número de panículas por metro quadrado, ao número de espiguetas por panícula, fertilidade das espiguetas e massa de mil espiguetas, respectivamente, da ordem de 6511 kg ha<sup>-1</sup>, 143, 131, 74% e 23 g (Tabela 27).

As maiores produtividades do arroz obtidas nesses sistemas de produção relacionam-se com os benefícios nas condições edáficas promovidos pelo uso do milho e *Urochloa brizantha* como plantas de cobertura, além da melhor nutrição em Si das plantas de arroz cultivadas no sistema safra forrageira, cujos benefícios de elemento benéfico já foram discutidos. Quando cultivado sobre a fitomassa do milho a produtividade esteve próxima, e quando cultivado sobre a fitomassa da *Urochloa brizantha*, a produtividade do arroz foi superior à estimativa da média nacional do arroz de terras altas de, aproximadamente, 3200 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2015).

No entanto, Moro et al. (2013), em estudo realizado em Botucatu-SP, verificaram produtividades do arroz de terras altas cultivado sobre as fitomassas do milho, crotalária, *Urochloa brizantha*, *Urochloa decumbens* e da *Urochloa ruziziensis*, respectivamente, da ordem de 6800, 4200, 4100, 4400 e 6000 kg ha<sup>-1</sup>. Esses autores concluíram que a melhor planta de cobertura a ser cultivada antes da cultura do arroz em SPD é o milho. Já Pacheco et al. (2013) em estudo realizado na área experimental da Embrapa Arroz e Feijão, no município de Santo Antônio de Goiás – GO, concluíram que a *Urochloa ruziziensis* consiste na melhor opção de planta de cobertura para cultivo prévio à semeadura do arroz de terras altas em SPD, as produtividades observadas por esses autores sobre as fitomassas da *Urochloa ruziziensis*, *Urochloa brizantha*, milho e *Urochloa ruziziensis* consorciada com feijão guandu foram, respectivamente, de 1554, 1011, 1444 e 1164 kg ha<sup>-1</sup>, sendo essas produtividades consideradas baixas devido ao déficit hídrico que ocorreu quando a cultura do arroz estava em pré-florescimento.

No estudo de Moro et al. (2013) a menor produtividade do arroz cultivado sobre as fitomassas das plantas do gênero *Urochloa* em relação ao milho, com exceção da *Urochloa ruziziensis*, foi explicada por possíveis efeitos alelopáticos que as *Urochloas brizantha* e *decumbens* teriam exercido na germinação e desenvolvimento das plantas de arroz, pois na literatura existem relatos de efeito alelopáticos das *Urochloas* spp

reduzindo a germinação, o desenvolvimento e a produtividade de culturas graníferas (SOUZA FILHO et al., 1997; MARTINS et al., 2006; SOUZA et al., 2006).

O intervalo entre a dessecação das plantas de cobertura e a semeadura do arroz em SPD é um fator que deve ser considerado, pois Nascente (2012) relatou haver translocação do herbicida aplicado nas plantas de cobertura para as plântulas de arroz, e para que isso não ocorra o milho deve ser dessecado com aproximadamente 20 dias e a espécie de *Urochloa* com aproximadamente 30 dias antes da semeadura do arroz, evitando-se assim que a dessecação dessas espécies de plantas de cobertura interfira negativamente na produtividade de grãos do arroz.

Apesar de ambos os sistemas terem quantidade de fitomassa suficiente para promoverem a proteção do solo e ciclagem de nutrientes, a quantidade de fitomassa da *Urochloa brizantha* avaliada antes da semeadura do arroz foi superior, comparativamente, à fitomassa produzida pelo milho (Tabelas 23 e 25).

Além da produção de fitomassa, outra característica que tem conferido sucesso às forrageiras perenes nos sistemas de produção de grãos, em SPD, em regiões de inverno seco, é sua maior persistência sobre o solo (CRUSCIOL et al., 2009). Crusciol (2007) relatou que, aos 51 dias após o manejo químico, restava menos de 50% da fitomassa do milho, enquanto, no caso da *Urochloa brizantha*, ainda havia cerca de 70% da fitomassa remanescente sobre o solo.

Borghini et al. (2008), avaliando a quantidade de fitomassa remanescente na superfície do solo antes da semeadura da safra de verão seguinte, obtiveram valores da ordem de 7.000 a 13.000 kg ha<sup>-1</sup> na área onde foi cultivado milho consorciado com *Urochloa brizantha*. Esses valores foram muito superiores à média observada na área com milho solteiro (2500 kg ha<sup>-1</sup>) sete meses após a colheita.

O gênero *Urochloa* apresenta sistema radicular abundante, agressivo, o que contribui para a melhoria da infiltração de água, da agregação e da aeração do solo (HECKLER et al., 1998; CRUSCIOL, 2007; CALONEGO, 2007; BORGHI, 2007), esses fatores também contribuíram para a maior produtividade do arroz cultivado no sistema safra-forrageira, pois houve maior microporosidade e IEA do solo quando as *Urochloas spp* foram utilizadas em rotação em relação aos demais sistemas de produção (Tabelas 16 e 17).

A matéria orgânica exerce influência nas propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. Contudo, outro ponto a ser considerado que pode ter

influenciado positivamente a produtividade do arroz foi o aumento das frações lábeis da MOS, do COAM (fração não lábil) bem como do COT do solo na profundidade de 0 a 0,05 m promovido pelo uso das forrageiras em rotação (Tabelas 9 e 11).

O cultivo de culturas anuais em sucessão às forrageiras perenes tem proporcionado ganhos de produtividade, eficiência de utilização de fertilizantes e, conseqüentemente, maior sustentabilidade dos sistemas de produção (CRUSCIOL; SORATTO, 2010).

A menor produtividade da cultura do arroz foi verificada no sistema safra-safrinha, indicando que o cultivo do arroz após o cultivo da cultura do trigo não é uma boa opção de rotação de culturas em SPD (Tabela 27).

Silva et al. (1999) destacaram que o monocultivo de gramíneas, em decorrência de seu sistema radicular fasciculado e superficial, acaba explorando o solo continuamente a uma mesma profundidade, diminuindo o estoque de nutrientes na camada de 0-0,20 m, onde estão concentradas as raízes, e além disso as faixas de nutrientes consideradas adequadas para as culturas do arroz e trigo são semelhantes (AMBROSANO et al., 1997).

Cazetta et al. (2008), em dois anos de cultivo, obtiveram baixa produtividade do arroz após o sorgo, e como possível explicação os autores relataram que pode ter havido efeito alelopático da planta antecessora sobre as plantas de arroz.

#### **6.5.2.2. Crotalária**

Conforme a Tabela 28, os teores de K, Ca, Mg e S da massa de matéria seca da crotalária aumentaram com a aplicação dos corretivos da acidez do solo. Além do aumento do teor de Mg ter sido maior com a aplicação do silicato, comparativamente, à aplicação do calcário, houve também aumento do teor de Si da massa da matéria seca da crotalária com a aplicação desse corretivo da acidez do solo.

Como o silicato é mais solúvel que o carbonato de cálcio (ALCARDE; RODELA, 2003), os benefícios relacionados ao aumento do pH, diminuição da acidez potencial, da concentração do  $Al^{3+}$  do solo, e aumento da saturação por bases foram mais acentuados com a aplicação desse corretivo, resultando assim em maior disponibilidade de Mg na solução do solo, o qual foi absorvido pelas plantas de crotalária (Figuras 5, 6, 7, 11 e 13).

Tabela 28. Produção de massa de matéria seca de parte aérea e teores de macronutrientes e silício por ocasião do florescimento da crotalária em função da aplicação de calcário e silicato em sistema de plantio direto.

Tratamentos	Teores de macronutrientes e silício na matéria seca							Matéria
	N	P	K	Ca	Mg	S	Si	
CORRETIVOS	<u>g kg<sup>-1</sup></u>							<u>kg ha<sup>-1</sup></u>
Controle	21 a	1,6 a	10,6 b	10,8 b	2,5 c	1,4 b	7,3 b	7782 c
Silicato	21 a	1,6 a	11,7 a	11,6 a	4,1 a	1,9 a	9,6 a	8755 a
Calcário	23 a	1,6 a	12,0 a	11,8 a	3,7 b	2,0 a	7,7 b	8439 b
<u>Probabilidade dos valores de F</u>								
	0,104	0,902	0,039	0,017	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste LSD ( $p \leq 0,05$ ).

De acordo com Epstein e Bloom (2006) o silício mesmo não sendo essencial, do ponto de vista fisiológico para o crescimento e desenvolvimento das plantas, sua absorção traz inúmeros benefícios, tanto em mono como em dicotiledôneas.

Os teores de K, Ca, Mg, S e do Si da massa da matéria seca da crotalária influenciaram as produções de massa de matéria seca de parte aérea obtidas, as quais foram, respectivamente, 7782, 8439 e 8755 kg ha<sup>-1</sup> quando não foi feita a correção da acidez do solo, com a aplicação do calcário e silicato (Tabela 28).

O K tem importante função no estado energético das plantas, na translocação e armazenamento de assimilados e na manutenção de água dos tecidos vegetais. Logo, o K não faz parte de nenhuma estrutura ou moléculas orgânicas nas plantas (Meurer, 2006). Com relação ao S, esse macronutriente desempenha funções estruturais e metabólicas nas plantas, e dentre as diversas funções que possui, participa de complexos enzimáticos envolvidos na fotossíntese, na fixação do N<sub>2</sub> e da formação da clorofila (VITTI et al., 2006).

Quanto aos maiores teores de Ca e Mg nas plantas cultivadas nas áreas receberam os corretivos, os resultados são explicados por ambos os corretivos serem fontes desses macronutrientes e terem elevados os níveis no perfil do solo. O cálcio e o magnésio são fundamentais na estruturação da planta e transformação de água, nutrientes e energia solar em carboidratos, conseqüentemente ocorre o aumento do acúmulo de massa de matéria seca de parte aérea das plantas, conforme observado por Forestieri e De-Polli (1990) e Nwachuku e Loganathan (1991).

A crotalária se destaca dentre as espécies de leguminosas normalmente utilizadas como planta de cobertura e adubo verde. As principais características dessa espécie são: a boa cobertura do solo proporcionado pelo rápido crescimento, alta produção de biomassa, resistência a pragas e doenças, elevada ciclagem de nutrientes e supressão de nematóides parasitas (INOMOTO et al., 2008). Essa última característica tem acarretado em grande expansão do cultivo dessa espécie nas áreas de produção de grãos no cerrado brasileiro (COSTA et al., 2012).

### 6.5.2.3. *Urochloa brizantha*

Na tabela 29, verifica-se que os teores de P, K, Ca, Mg e S na massa de matéria seca da parte aérea da *Urochloa brizantha* aumentaram com a aplicação dos corretivos, sendo que com a aplicação do silicato houve aumento também do teor de Si.

Diante desses resultados, nota-se que a *Urochloa brizantha* absorveu esses elementos do solo, assim após o manejo da cultura, esses elementos bem como os demais elementos absorvidos, poderão ser disponibilizados para a cultura subsequente.

Quanto à massa de matéria seca da parte aérea da *Urochloa brizantha* produzida aos 110 DAE, nota-se que os resultados referentes aos teores nutricionais refletiram na produção de massa de matéria seca da parte aérea da *Urochloa brizantha* (Tabela 29). Assim, as produções de massa de matéria seca observadas foram da ordem de 6918, 8638 e 8644 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, quando não foi feita a correção da acidez do solo, com a aplicação do calcário e silicato.

Tabela 29. Teores de macronutrientes e silício da massa de matéria seca da parte aérea da *Urochloa brizantha* aos 110 DAE em função da aplicação de calcário e silicato em sistema de plantio direto. Botucatu, Estado de São Paulo, Brasil, 2013.

Tratamentos	Teores de macronutrientes e silício na matéria seca							Matéria seca
	N	P	K	Ca	Mg	S	Si	
<b>CORRETIVOS</b>	<u>g kg<sup>-1</sup></u>							
Controle	18,9	1,5 b	11,2 b	4,5 b	2,8 b	1,2 b	29,1b	6918 b
Silicato	19,0	2,2 a	14,7 a	12,4 a	3,5	2,9 a	40,0a	8644 a
Calcário	19,9	2,2 a	14,2 a	12,7 a	3,5	2,9 a	27,7b	8638 a
	<u>Probabilidade dos valores de F</u>							
	0,255	<0,011	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo LSD ( $p \leq 0,05$ ).

Para que os benefícios do sistema plantio direto (SPD) sejam alcançados, principalmente a conservação do solo e a ciclagem de nutrientes, faz-se necessária a utilização de plantas de coberturas de qualidade, ou seja, que tenham como principais características a capacidade de manter a superfície do solo sempre coberta com fitomassa e que consigam mobilizar elementos lixiviados ou pouco solúveis e liberá-los posteriormente para a próxima cultura, aumentando, assim, a eficiência da utilização dos fertilizantes por essas culturas (CRUSCIOL; SORATTO, 2007; CRUSCIOL et al., 2008; LEITE et al., 2010; PACHECO et al., 2011).

Dentre as plantas de cobertura utilizadas no SPD, destacam-se as *Urochloas*, pois além da produção de fitomassa, outra característica que tem conferido sucesso a essas forrageiras perenes nos sistemas de produção de grãos, em SPD, em regiões de inverno seco, é sua maior persistência sobre o solo (CRUSCIOL et al., 2009).

O cultivo de culturas anuais em sucessão às forrageiras perenes tem proporcionado ganhos de produtividade, eficiência de utilização de fertilizantes e, conseqüentemente, maior sustentabilidade dos sistemas de produção (CRUSCIOL; SORATTO, 2010).

Segundo Kichel (1998) dentre os inúmeros benefícios desta prática estão a recuperação eficiente da fertilidade do solo, a facilidade da aplicação de práticas para a conservação do solo, a implantação de pastagens com baixos custos, as melhorias nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, o controle de pragas, doenças e invasoras, a reciclagem dos nutrientes do solo, o aproveitamento de adubo residual, o aumento na produção de grãos e resíduos no sistema, o aumento das oportunidades de trabalho, a maior eficiência no emprego de máquinas, equipamentos e mão de obra, a diversificação do sistema produtivo e o aumento da produtividade e lucratividade.

#### **6.5.2.4. Trigo**

Na Tabela 30 observam-se os efeitos da aplicação de calcário e silicato em relação aos teores foliares de macronutrientes e Si das plantas de trigo cultivada em SPD. A ordem decrescente das concentrações de macronutrientes observada nas folhas foi a seguinte:  $K > N > P > Ca > Mg > S$ . O Si, considerado elemento benéfico, teve concentração inferior apenas ao N e K.

Tabela 30. Teores foliares de macronutrientes e silício do trigo em função da aplicação calcário e silicato em sistema de plantio direto.

Tratamentos	Teores foliares de macronutrientes e silício						
	N	P	K	Ca	Mg	S	Si
CORRETIVOS				<u>g kg<sup>-1</sup></u>			
Controle	33,9 a	3,3 a	39,3 a	1,6 b	2,0 a	0,35 c	8,9 c
Silicato	32,3 a	3,4 a	38,2 a	2,0 a	2,0 a	0,43 a	17,2 a
Calcário	32,5 a	3,5 a	38,3 a	1,8 ab	2,0 a	0,40 b	10,6 b
<u>Probabilidade dos valores de F</u>							
	0,458	0,116	0,949	0,025	<0,001	<0,001	<0,001

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo LSD ( $p \leq 0,05$ ).

Os teores foliares de N, P, K e Mg obtidos não foram influenciados pela aplicação dos corretivos, pois os mesmos não diferiram do tratamento controle. Por outro lado, os teores de Ca aumentaram em função da aplicação do calcário e do silicato (Tabela 30). Dentre as funções do Ca, esse macronutriente além de estar relacionado ao crescimento radicular das culturas, relaciona-se também com o desenvolvimento normal de frutos e sementes, atuando na germinação do grão de pólen e no crescimento do tubo polínico (MARSCHNER, 1995).

Verificaram-se também aumentos nos teores foliares de Si com a aplicação dos corretivos da acidez do solo, havendo maior teor foliar desse elemento por ocasião da aplicação do silicato. Assim os teores foliares de Si observados nas plantas de trigo foram, respectivamente, da ordem de 17,2, 10,6 e 8,9 g kg<sup>-1</sup> com a aplicação do silicato, calcário e no tratamento controle (Tabela 30).

Apesar do calcário não ser fonte do elemento benéfico Si, o aumento de pH proporcionado pela aplicação do mesmo, pode ter solubilizado compostos de sílica e, ou, reduzido a capacidade dos sítios de adsorção de silício no solo, aumentando sua concentração na solução (PULZ et al., 2008), sendo esse elemento, posteriormente, absorvido pelas plantas (Figura 5 e Tabela 30). Esse mesmo efeito, provavelmente, ocorreu com a aplicação do silicato, mas, além disso, esse corretivo é fonte de Si e por isso houve maior teor foliar de Si nas plantas do tratamento em que foi aplicado o silicato para a correção da acidez do solo.

Diversos autores relataram efeitos benéficos em culturas adubadas com Si, principalmente gramíneas, como resistência às doenças e pragas, à toxidez provocada por metais, menor perda de água por transpiração, efeitos na composição

mineral, aumento da eficiência fotossintética, dentre outros (EPSTEIN; BLOOM, 2006; BARBOSA FILHO et al., 2001; ACCIOLY et al., 2009; MA; YAMAJI, 2006; GOUSSAIN et al., 2002; BERNI; PRABHU, 2003; PRABAGAR et al., 2010; PULZ et al., 2008). Porém, é de suma importância ressaltar que as respostas à aplicação de Si são potencializadas quando as culturas são submetidas a algum tipo de estresse, seja ele de natureza biótica ou abiótica (MA, 2004; GUNES et al., 2007; HATTORI et al., 2005), e em regiões como o Cerrado, caracterizadas por períodos de seca, a adequada nutrição silicatada pode garantir a estabilidade das culturas, como o trigo.

Com relação aos teores foliares de S, apesar de terem sido observadas diferenças entre os tratamentos, as concentrações foliares observadas desse nutriente foram muito pequenas, o que provavelmente não influenciou a produtividade da cultura (Tabela 30).

Os resultados supracitados referentes à nutrição do trigo refletiram na produção de massa de matéria seca de parte aérea da cultura, sendo os valores, respectivamente, 1457, 2712 e 2481 kg ha<sup>-1</sup> nos tratamentos controle, com a aplicação de calcário e silicato (Tabela 31).

Tabela 31. Massa de matéria seca de parte aérea, componentes da produção e produtividade do trigo em função da aplicação de calcário e silicato.

	Componentes da produção				
	Matéria seca	Espigas m <sup>-2</sup>	Grãos espiga <sup>-1</sup>	Massa de mil grãos	Produtividade
CORRETIVO	kg ha <sup>-1</sup>		nº	g	kg ha <sup>-1</sup>
Controle	1457 b	192 a	31 b	41,5 a	1274 b
Silicato	2481 a	203 a	39 a	42,3 a	1587 a
Calcário	2712 a	213 a	37 a	42,3 a	1555 a
	Probabilidade dos valores de F				
	<0,001	0,109	0,031	0,600	0,003

Médias seguidas de letras distintas na coluna diferem estatisticamente pelo teste LSD ( $p \leq 0,05$ ).

Contudo, o aumento do número de grãos por espiga ocorreu de maneira semelhante ao aumento dos teores foliares de Ca, pois a melhor nutrição em Ca pode ter resultado em um melhor desenvolvimento dos grãos, refletindo diretamente no incremento da produtividade de grãos do trigo nos tratamentos em que foram aplicados os

corretivos da acidez do solo (Tabelas 30 e 31). Logo, as produtividades observadas foram da ordem de 1274, 1555 e 1587 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, no tratamento sem correção da acidez do solo e nos tratamentos em que foram aplicados o calcário e o silicato.

Durante o cultivo do trigo, não houve déficit hídrico durante as fases mais sensíveis da cultura, como o florescimento e enchimento dos grãos, e esse pode ter sido o principal fator responsável pela semelhança da produtividade entre os tratamentos em que foram aplicados superficialmente o calcário e o silicato (Figura 1 e Tabela 31).

Como já relatado, os efeitos benéficos do Si nas culturas são potencializadas quando estas são submetidas a algum tipo de estresse, seja ele de natureza biótica ou abiótica (MA, 2004; GUNES et al., 2007; HATTORI et al., 2005), e, com relação à deficiência hídrica, o efeito benéfico do Si, proveniente da aplicação de silicato de cálcio e magnésio, tem sido associado ao aumento da capacidade de defesa antioxidante (GONG et al., 2005) e à manutenção da taxa fotossintética, da condutância estomática da planta, mesmo em solo seco (HATTORI et al., 2005), devido à redução da transpiração através da cutícula (MA; YAMAJI, 2006).

## **7. RESPOSTAS ÀS HIPÓTESES**

Conforme já descrito na introdução, a presente pesquisa possui as seguintes hipóteses: 1- O silicato de cálcio e magnésio corrige mais rapidamente a acidez do perfil do solo que o calcário no sistema plantio direto. 2 – O sistema safra consorciada com forrageira promove as melhores condições edáficas, por consequência da inserção de forrageiras no sistema de produção. 3 – As produtividades das culturas de verão são maiores no sistema safra consorciada com forrageira. 4 – As produtividades das culturas graníferas são superiores quando a correção da acidez do solo é feita por meio da aplicação superficial do silicato, comparativamente, à calagem superficial.

A hipótese 1 foi confirmada, pois houve maior correção da acidez do solo e aumento da disponibilidade de nutrientes e saturação por bases por consequência da aplicação superficial do silicato, comparativamente, à aplicação superficial do calcário, principalmente, aos 12 meses após a última aplicação dos corretivos da acidez do solo. A hipótese 2 também foi confirmada, pois o sistema safra forrageira foi o sistema de produção em que foram observadas as melhores características físicas do solo, e também os melhores resultados referentes à matéria orgânica do solo. Porém, com relação às hipóteses 3 e 4 confirmou-se que as culturas do feijão e arroz são mais produtivas quando cultivadas no sistema safra forrageira devido aos benefícios que as forrageiras promovem às condições edáficas, mas nem sempre as produtividades das culturas graníferas são superiores por consequência da correção da acidez do solo por meio da aplicação

superficial do silicato em comparação à correção da acidez do solo por meio da aplicação superficial do calcário.

## 8. CONCLUSÕES

O uso de espécies do gênero *Urochloa* em rotação com culturas graníferas, sistema safra-forrageira, aumenta os valores da MOS em todas as suas frações na camada de 0 a 0,05 m do solo. Quanto aos corretivos, não há efeito deletério da aplicação superficial do calcário e silicato na MOS, havendo mais C mineralizável e CBMS na camada superficial do solo (0 a 0,05 m) por consequência da calagem.

Quanto aos atributos químicos do solo, no período entre 12 e 24 meses após a última aplicação dos corretivos ocorre máxima reação dos corretivos da acidez no solo, aumentando a saturação por bases até a profundidade de 0,40 m. A reação do silicato é mais rápida que a reação do calcário, sendo o silicato mais eficiente, principalmente, com relação à disponibilização de P, além de aumentar a concentração de Si no solo.

As rotações de culturas melhoram a macroporosidade e reduzem a resistência mecânica à penetração das camadas superficiais do solo, 0 a 0,05 e 0,05 a 0,10 m, respectivamente, quando comparadas ao sistema safra-pousio. O uso de forrageiras na rotação de culturas, sistema safra-forrageira, melhora a microporosidade na camada de 0 a 0,05 m de profundidade e a estabilidade dos agregados na camada de 0,10 a 0,20 m do solo.

O uso de espécies de adubos verdes e plantas de coberturas, como a crotalária e o milheto, também melhoram a estabilidade dos agregados do solo na camada de 0,10 a 0,20 m.

Do mesmo modo que constatado para à MOS, não há efeito negativo da aplicação dos corretivos da acidez do solo nos atributos físicos do mesmo.

As produtividades das culturas de verão, feijão e arroz são superiores por consequência da aplicação do silicato, comparativamente, à aplicação do calcário. Com relação aos sistemas de produção agrícola, as culturas do feijão e arroz são mais produtivas quando cultivadas sobre a fitomassa da *Urochloa brizantha*, ou seja, no sistema safra-forrageira.

A produtividade do arroz decresce consideravelmente quando cultivado após o trigo.

Por consequência da correção da acidez do solo por meio da aplicação do calcário ou silicato a produtividade do trigo aumenta, podendo esse aumento ser maior em função da aplicação do silicato.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDALLA, M.M. Beneficial effects of diatomite on growth, the biochemical contents and polymorphic DNA in *Lupinus albus* plants grown under water stress. **Agriculture and Biology Journal of North America**, Milford, v.2, p.207-220, 2011.

ACCIOLY, A.M.A. et al. Silicato de cálcio como amenizante da toxidez de metais pesados em mudas de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 180-188. 2009.

ADATIA, M.H.; BESFORD, R.T. The effects of silicon on cucumber plant grown in recirculating nutrient solution. **Annals of Botany**, London, v.58, p.343-351, 1986.

ADEGAS, F.S. Manejo integrado de plantas daninhas. In: CONFERENCIA ANUAL DE PLANTIO DIRETO, 2, 1997, Pato Branco. **Resumo de palestras...** Passo Fundo: Aldeia Norte, 1997. p 26 – 47.

AGARIE, S. et al. Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in rice plants (*Oryza sativa* L.). **Plant Production Science**, Tokyo, v.1, p.89-95, 1998.

AIDAR, H. et al. Bean production and white mould incidence under no-till system. **Annual Report of the Bean Improvement Cooperative**, East Lansing, v. 43, p. 150-151, 2000.

ALBRECHT, J.C. et al. Trigo BRS 207: cultivar com alto potencial de produtividade indicada para os Estados de Minas Gerais, Goiás e o Distrito Federal. Planaltina: **Embrapa Cerrados**, 2005. 22 p. (Documentos, 137).

ALCARDE, J. C.; RODELLA, A. A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: **Tópicos em ciência do solo**. Vol. 3. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.291-334, 2003.

ALCARDE, J.C. Corretivos da acidez dos solos: características de qualidade. In: MALAVOLTA, E. (Coord.). **Seminário sobre corretivos agrícolas**. Piracicaba: Fundação Cargill, 1985. cap.3, p.97 – 117.

ALLEONI, L. R. F. et al. Acidity and aluminum speciation as affected by surface liming in tropical no-till soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.74, p. 1010-1017, 2010.

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**, Viçosa, v.29, p.923-934, 2005.

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

AMARAL, A. S. et al. Movimentação de partículas de calcário no perfil de um Cambissolo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 359-367, 2004b.

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**, Viçosa, v. 28, p. 115-123, 2004a.

AMBROSANO, E.J. et al. Leguminosas e oleaginosas. In: RAIJ, B. van; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, p.189-203, 1997.

ANDERS, M.M. et al. Rice rotation and tillage effects on soil aggregation and aggregate carbon and nitrogen dynamics. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 76, p. 994–1004. 2012.

ANDERSON, J. P.E. Soil respiration. In: A.L. PAGE et al (Ed.), **Methods of soil analysis, Part 2, 2<sup>nd</sup>**. Agronomy monograph. **American Society of Agronomy and Soil Science Society of America**, Madison, p. 837-871.

ANDREOLA, F, et al. A cobertura vegetal de inverno e a adubação orgânica e, ou, mineral influenciando a sucessão feijão/milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 867-874, 2000.

ARF, O. Importância da adubação na qualidade do feijão e caupi. In: SÁ, M.E.; BUZZETI, S. **Importância da adubação na qualidade dos produtos agrícolas**. São Paulo, 1994. p.233-248.

ARGENTA, G. et al. Efeitos do manejo mecânico e químico da aveia-preta no milho em sucessão e no controle do capim-papuã. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, p. 851-860, 2001.

ARGENTON, J. et al. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.425-435, 2005.

- BALABANE, M., PLANTE, A.F. Aggregation and carbon storage in silty soil using physical fractionation techniques. **European Journal of Soil Science**, Amsterdam, v.55, p. 415–427. 2004.
- BALDOCK, J. A.; SKJEMSTAD, J. O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. **Organic Geochemistry**, Oxford, v.31, p.697-710, 2000.
- BALESDENT, J., WAGNER, G.H., MARIOTTI, A. Soil organic matter turnover in long-term field experiments as revealed by carbon-13 natural abundance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 118– 124. 1988.
- BARBER, R. G.; NAVARRO, F. Evaluation of the characteristics of 14 cover crops in a soil rehabilitation trial. **Land Degradation and Development**, v. 5, n. 3, p. 201-214, 1994.
- BARBOSA FILHO, M.P. et al. Importância do silício para a cultura do arroz (uma revisão de literatura). **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v.89, p.1-8, 2000.
- BARBOSA FILHO, M.P. et al. Silicato de Ca como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 325-330, 2001.
- BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. 4. ed. New York: John Wiley, 1972. 529 p.
- BAYER, C. et al. C and N stocks and the role of molecular recalcitrance and organomineral interaction in stabilizing soil organic matter in a subtropical Acrisol managed under no-tillage. **Geoderma**, Amsterdam, v. 133, p. 258-268, 2006.
- BAYER, C. et al. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1473–1478. 2001.
- BAYER, C. et al. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 54, n. 1/2, p. 101-109, Mar. 2000.
- BAYER, C. et al. Tillage and cropping system effects on soil humic acid characteristics as determined by electron spin resonance and fluorescence spectroscopies. **Geoderma**, Amsterdam, v. 105, p. 81-92, 2002.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A. et al. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 7-18.
- BENJAMIN, J.G., NIELSEN, D.C., VIGIL, M.F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, Amsterdam, v. 116, p. 137– 148. 2003.
- BERG, B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 133, p. 13-22, 2000.

BERNI, R.F. & PRABHU, A.S. Eficiência relativa de fontes de silício no controle de bruçone nas folhas em arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 195-201, 2003.

BERTOL, I. et al. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas às do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 8, p.155 – 163, 2004.

BOER, C.A. et al. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.1269-1276, 2007.

BOHN, H. L.; MCNEAL, B. L.; O'CONNOR, G. A. **Soil chemistry**. New York: John Wiley e Sons, 1979. 329 p.

BORDIN, I. et al. Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho em plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 1785-1792, 2008.

BORGHI, E. et al. 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**, Rio de Janeiro, v. 26, p. 559-568, 2008.

BORGHI, E. **Produção de milho e capins Marandu e Mombaça em função de modos de implantação do consórcio**. 2007. 142 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

BORTOLUZZI, E.C.; RHEINHEIMER, D. dos S.; PETRY, C.; KAMINSKI, J. Contribuição de constituintes de solo à capacidade de troca de cátions obtida por diferentes métodos de extração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.507-515, 2009.

BORTOLUZZI, E. C. et al. Aggregation of subtropical soil under liming: a study using laser diffraction. **Revista Brasileira Ciência Solo**, Viçosa, v. 34, p. 725-734, 2010.

BOTTNER, P.; SALLIH, Z. AND BILLES, G. Root activity and carbon metabolism in soils. **Boiology and Fertility of Soils**, Palmerston North, v. 7, p. 71-78, 1988.

BRIEDIS, C. et al. Carbono do solo e atributos de fertilidade em resposta à calagem superficial em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, p. 1007-1014. 2012b.

BRIEDIS, C. et al. Chances 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 American Journal**, Madison, v. 76, p. 151-160. 2012c.

BRIEDIS, C. et al. Soil organic matter pools and carbon-protection mechanisms in aggregate classes influenced by surface liming in a no-till system. **Geoderma**, Amsterdam, v. 170, p. 80–88. 2012a.

BROCH, D. L.; PITOL, C.; SPERA, S. T. Influência de doses de fósforo e uso de calcário e gesso sobre o rendimento da soja em plantio direto sobre pastagem de *Brachiaria decumbens*. **Revista Plantio Direto**, Passo Fundo, v. 38, p. 17-18, 1997.

BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, p. 3-22, 2005.

BUCK G. B. et al. Potassium silicate as foliar spray and rice blast control. **Journal of Plant Nutrition**, Londres, v. 31, p.231-237, 2008.

BURNS, R. G. Interaction of enzymes with soil mineral and organic colloids. In: HUANG, P. M., SCHNITZER, M. (Ed.) **Interactions of soil minerals with natural organic and microbes**. Madison: Soil Science Society of America, Inc. 1986. p. 429-451.

BURNS, R. G. Microbial and enzymatic activities in soil biofilms. In: CHARACKLIS, W. G., WILDERER, P. A. (Ed.) **Structure and function of biofilms**. London: John Wiley & Sons, 1989. p. 333-350.

BUYANOVSKY, G.A.; ASLAM, M.; WAGNER, G.H. Carbon turnover in soil physical fractions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.1167-1173, 1994.

CAIRES, E. F. Correção da acidez do solo em sistema plantio direto. **International Plant Nutrition Institute – Brazil**. In: Informações Agronômicas n.141, Piracicaba. 2013.

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

CAIRES, E. F. et al. Alterações químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na implantação do sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 275-286, 2003.

CAIRES, E. F. et al. Alterações químicas do solo e resposta do milho à aplicação de corretivos e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, p. 125-136, 2004.

CAIRES, E. F. et al. 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**, Viçosa, v. 25, p. 1029-1040, 2001.

CAIRES, E. F. et al. Effect of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 28, p. 57-64, 2008b.

CAIRES, E. F. et al. Soil acidity and aluminum toxicity as affected by surface liming and cover oat residues under a no-till system. **Soil Use and Management**, Londres, v. 24, p. 302-309, 2008a.

CAIRES, E. F. et al. Surface application of lime for crop grain production under no-till system. **Agronomy Journal**, Madison, p. 791-798, v. 97, p. 791-798, 2005.

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

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

CAIRES, E.F. et al. Aplicação de corretivos superficial e cobertura de aveia preta antecedendo os cultivos de milho e soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 87 – 98, 2006.

CAIRES, E.F. et al. 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**, Viçosa, v.23, p.315–327, 1999.

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, p.45-53, 2011.

CALEGARI, A. Rotação de culturas. In: \_\_\_\_\_. **Guia para plantio direto**. Ponta Grossa: FBPD, 2000. p.68 – 78.

CALOMME, M. et al. Silicon absorption from stabilized orthosilicic acid and other supplements in healthy subjects. In: RUSSEL, A. M.; ANDERSON, R. A.; FAVRIER, A. E. (Ed) **Trace Elements in Man and Animals**, New York, v. 10, p. 1111-1114, 2002.

CALONEGO, J. C.; ROSOLEM, C. A. Estabilidade de agregados do solo após manejo com rotações de culturas e escarificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1399-1407, 2008.

CALONEGO, J.C. **Uso de plantas de cobertura na recuperação de solo compactado**. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 125f, 2007.

CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 33, n. 3, p. 242-249. 2010.

CAMARGO, O. A. de et al. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 2009. 77 p. (Boletim técnico, 106).

CAMARGO, O.A. & ALLEONI, L.R.F. Compactação do solo e o desenvolvimento de plantas. **Potafós**, Piracicaba, 132p, 1997.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOT, E. T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, p. 777-783, 1992.

CANTARELLA, H.; FURLANI, P. R. Arroz-de-sequeiro. **Boletim Técnico do Instituto Agrônomo de Campinas**, Campinas, n. 100, p. 48-49, 1997.

CARBONELL, S.A.M. et al. Tamanho de grão comercial em cultivares de feijoeiro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, p.2067-2073, 2010.

CARNEIRO, M. A. C. et al. Produção de fitomassa de diferentes espécies de cobertura e suas alterações na atividade microbiana de solo de cerrado. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 02, p. 455-462, 2008.

CARTER, M. R. Organic matter and sustainability. In: REES, R. M. et al. (Ed.), **Sustainable management of soil organic matter**. New York: CABI Publishing, 2001. p. 9-22.

CARVALHO, R. et al. Dessorção de fósforo por silício em solos ácidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 69-74, 2000.

CARVALHO-PUPATTO, J.G.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C. Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade do arroz de acordo com a aplicação de escórias. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p.1213-1218, 2004.

CASAGRANDE, J. C.; CAMARGO, O. A. Adsorção de fosfato em solos com caráter ácido avaliada por um modelo de complexação de superfície. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Campinas, v. 21, p. 353-360, 1997.

CASTRO FILHO, C. et al. Aggregate stability under different soil management systems in a red latosol in the state of Parana, Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 65, p. 45-51, 2002.

CASTRO FILHO, C., MUZILLI, O., PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio e rotações de culturas e métodos de preparos das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, p. 527-538, 1998.

CASTRO, G. S. A. **Alterações físicas e químicas do solo em função do sistema de produção e da aplicação superficial de silicato e calcário**. 2009. 160 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2009. `

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. et al. Management impacts on soil organic matter of tropical soils. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 14, p. 1-8, 2015.

CASTRO, G. S. A.; CALONEGO, C. 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**, Brasília, v. 46, n. 12, p. 1690-1698, 2011.

CASTRO, G.S.A.; CRUSCIOL, C.A.C. Effects of superficial liming and silicate application on soil fertility and crop yield under rotation. **Geoderma**, Amsterdam, v.195-196, p.234-242, 2013a.

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, p. 673-681, 2013b.

CATTELAN, A. J.; VIDOR, C. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo, em funções de variações ambientais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 14, n. 2, p. 133-142, 1990.

CAZETTA, D. A. et al. Desempenho do arroz de terras altas com a aplicação de doses de nitrogênio e em sucessão às culturas de cobertura do solo em sistema de plantio direto. **Bragantia**. Campinas, SP, v.67, p. 471-479, 2008.

CERETTA, C.A. et al. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia preta/milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 163 – 171, 2002.

CHRISTENSEN, B. T. **Organic matter in soil**: structure, function and turnover. Tijele: DIAS, 2000. 95 p. (Plant Production Report, 30).

CIOTTA, M. N. et al. Acidificação de um latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 1055-1064, 2002.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Séries históricas relativas às safras 1976/77 a 2014/15 de área plantada, produtividade e produção. 2015. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2&Pagina\\_objcmsconteudos=2#A\\_objcmsconteudos](http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&t=2&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcmsconteudos)>. Acesso em: 25 setembro 2015.

CONAB -COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos 2012/13 – Oitavo Levantamento. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13\\_06\\_03\\_15\\_28\\_45\\_boletim\\_mai\\_2013.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_06_03_15_28_45_boletim_mai_2013.pdf)>. Acesso em: 24 jun. 2013.

CONDON, L. M. et al. Effects of liming on organic matter decomposition and phosphorus extractability in an acid humic Ranker soil from northwest Spain. **Biology and Fertility of Soils**, Amsterdam, v. 15, n. 4, p. 279-284, 1993.

CORRÊA, J. C. et al. Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, p. 1307-1317, 2007.

CORRÊA, J.C. et al. Atributos físicos em Latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1583-1590, 2008.

COSTA, A. **Doses e modos de aplicação de calcário na implantação de sucessão soja trigo em sistema de plantio direto**. Botucatu, 2000. 146p. Tese (Doutorado em

Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

COSTA, C. H. M., CRUSCIOL, C. A. C. Long-term effects of lime and phosphogypsum application on topical no-till soybean-oat-sorghum rotation and soil chemical properties. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 74, p. 119-132. 2016.

COSTA, C.H.M. et al. Persistência e liberação de macronutrientes e silício da fitomassa de crotalária em função da fragmentação. **Bioscience Journal**, Uberlandia, v. 28, p. 384-394, 2012.

COSTA, F. de S. et al. Estoques de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 323-332, 2008.

COSTA, F. S. et al. Calagem e as propriedades eletro-químicas e físicas de um Latossolo em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 281-284, 2004.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Nitrate role in basic cation leaching under no-till, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, p. 1975-1984, 2011.

CRUSCIOL, C. A. C. et al. Soil fertility, plant nutrition, and grain yield of upland rice affected by surface application of lime, silicate, and phosphogypsum in a tropical no-till system. **Catena**, Amsterdam, v. 137, p. 87-99. 2016.

CRUSCIOL, C. A. C., SORATTO, R. P., CASTRO, G. S. A., COSTA, C. H. M., FERRARI NETO, J. Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. **Revista Ciência Agrônômica**, Fertaleza, v. 44, p. 404-410, 2013.

CRUSCIOL, C.A.C. et al. Nitrate role in basic cation leaching under no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1975–1984. 2011.

CRUSCIOL, C.A.C. et al. Taxas de decomposição e de liberação de macronutrientes da palhada de aveia preta em plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v.67, p.481- 489, 2008.

CRUSCIOL, C.A.C. Qualidade química do solo. In: DECHEN, S.C.F. **Workshop sobre o Sistema Plantio Direto no Estado de São Paulo**. Piracicaba: Fundação Agrisus; FEALQ; Campinas: Instituto Agrônômico, p.103-117, 2007.

CRUSCIOL, C.A.C. Qualidade química do solo. In: DECHEN, S.C.F. **Workshop sobre o Sistema Plantio Direto no Estado de São Paulo**. Piracicaba: Fundação Agrisus; FEALQ; Campinas: Instituto Agrônômico, p.103-117, 2007.

CRUSCIOL, C.A.C.; SORATTO, R.P. Nitrogen supply for cover crops and effects on peanut grown in succession under a no-till system. **Agronomy Journal**, Madison, v.101, p.40-46, 2009.

CRUSCIOL, C.A.C.; SORATTO, R.P. Nutrição e produtividade do amendoim em sucessão ao cultivo de plantas de cobertura no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, p.1553-1560, 2007.

CRUSCIOL, C.A.C.; SORATTO, R.P.: Sistemas de produção e eficiência agrônômica de fertilizantes. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: contexto mundial e técnicas de suporte**: v.1 Piracicaba: IPNI – Brasil, p.229 – 275, 2010.

CRUSCIOL, C.A.C.; SORATTO, R.P.; BORGHI, E.; MATEUS, G.P. Integração Lavoura-Pecuária: benefícios das gramíneas perenes nos sistemas de produção. **Informações Agrônômicas**, Piracicaba, n.25, p.2-15. 2009.

CUNHA, K.P.V.; NASCIMENTO, C.W.A.; SILVA, A.J. Silicon alleviates the toxicity of cadmium and zinc for maize (*Zea mays* L.) grown on a contaminated soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Tharandt, v.171, p.849-853, 2008.

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

DERPSCH, R. et al. **Controle da erosão no Paraná, Brasil**: sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, 1991. 268 p.

DERPSCH, R.; FRIEDRICH, T. Global overview of conservation agriculture adoption. **In: Proceedings of the 4th World Congress on Conservation Agriculture**, p. 429–438. Lead Papers, New Delhi, India, 2009.

DIEKOW, J. et al. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization. **Plant and Soil**, Amsterdam, v. 268, p. 319-328, 2005.

DORNELES, A. O. S. et al. Silicon reduces aluminum content in tissues and ameliorates its toxic effects on potato plant growth. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.46, p. 506-512. 1997.

DOU, F.; WRIGHT, A. L.; HONS, F. M. Sensitivity of labile soil organic carbon to tillage in wheat-based cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, p. 1445-1453, 2008.

ELAWAD, S. H.; GREEN JUNIOR, V. E. Silicon and the rice plant environment: a review of recent research. **Riso**, Milão, v. 28, n. 3, p. 235-253, 1979.

ELLIOTT, C. L.; SNYDER, G. H. Autoclave: induced digestion for the colorimetric determination of silicon in rice straw. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Davis, v. 39, p. 1118-1119, 1991.

EMBRAPA - Empresa Brasileira De Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 306p, 2006.

EMBRAPA. **Informações técnicas para o cultivo de feijão**. Brasília, DF: Embrapa-SPI, 1996. 32 p.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Pesquisa do Solo. **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja**: região central do Brasil 2009 e 2010. Londrina, 2008.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, p. 641-664, 1999.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Editora Planta., 403p, 2006.

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 Agricola**, Piracicaba, v. 58, p. 825–831. 2001.

EXLEY, C. Silicon in life: a bioinorganic solution to bioorganic essentiality. **Journal of Inorganic Biochemistry**, Amsterdam, v. 69, p. 139-144, 1998.

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

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. **Manejo da acidez dos solos de cerrado e várzea do Brasil**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 42 p. (Documentos, 92).

FAGERIA, N.K.; BARBOSA FILHO, M.P.; STONE, L.F. Resposta do feijoeiro a adubação fosfatada. In: POTAFÓS. Simpósio destaca a essencialidade do fósforo na agricultura brasileira. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n.102, p.1-9, 2003.

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**, New York, v.29, p.2675 – 2682, 1998.

FASSBENDER, H.W. **Química de Suelos, con Énfasis en Suelos de América Latina**. Ed. IICA. San José, Costa Rica, 398 p., 1978.

FERRARI NETO, J. et al. Plantas de cobertura, manejo da palhada e produtividade da mamoneira no sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, p. 978-985. 2011.

FERRAZ, C.A.M.; CIA, E.; SABINO, N.P. Efeito da mucuna e amendoim em rotação com algodoeiro. **Bragantia**, Campinas, SP, v.36, p.1 – 9, 1977.

FERREIRA, D. F. Análise estatística por meio do SISVAR para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCar, 2000. p. 255-258.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Dinâmica da calagem superficial em um Latossolo Vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 235-247, 2005.

FLORA, L. P. D.; 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 Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1591-1598, 2007.

FONTANA, A.; PEREIRA, M.G.; LOSS, A.; CUNHA, T.J.F.; SALTON, J.C. Atributos de fertilidade e frações húmicas de um Latossolo Vermelho no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, p.847-853, 2006.

FORESTIERI, E.F.; DE-POLLI, H. Calagem, enxofre e micronutrientes no crescimento do milho e da mucuna preta num podzólico Vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.14, p.167-172, 1990.

FRANCHINI, J. C. et al. Organic composition of green manures during growth and its effect on cation mobilization in an acid oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, p. 2045-2058, 2003.

FRANCHINI, J. C. et al. Potencial de extratos de resíduos vegetais na mobilização do calcário no solo por métodos biológico. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 58, p. 357-360, 2001.

FRANCHINI, J. C., MIYAZAWA, M., PAVAN, M. A. Influência de resíduos vegetais na toxidez de Al e na mobilidade de íons no solo. In: **REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS**, 26., FertBio 2004. 6p. CD-ROM.

FRANCHINI, J.C. et al. Alterações na fertilidade do solo em sistemas de rotação de culturas em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.459 – 467, 2000.

FRANCHINI, J.C. et al. Alterações químicas em solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.533 – 542, 1999a.

FRANCHINI, J.C. et al. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.12, p.2267 – 2276, 1999b.

FRANZLUEBBERS, A. J. et al. Determination of microbial biomass and nitrogen mineralization following rewetting of dried soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p. 1133-1139. 1996.

FRANZLUEBBERS, A. J. Should soil testing services measure soil biological activity?. **Agricultural e Environmental Letters**, 5 p. 2016.

FRANZLUEBBERS, A.,J., HONS, F., M., ZUBERER D., A., Seasonal changes in soil microbial biomass and mineralizable C and N in wheat management systems. **Soil biology & Biochemistry**, Madison, v. 26, p. 1469-1475. 1994.

FRANZLUEBBERS, A.J. et al. Soil organic C and N pools under long-term pasture management in the Southern Piedmont USA. **Soil biology & Biochemistry**, Madison, v.32, p.469-478, 2000.

FRANZLUEBBERS, A.J. Potential C and N mineralization and microbial biomass from intact and increasingly disturbed soils of varying texture. **Soil Biology & Biochemistry**, Madison v.31, p. 1083-1090. 1999.

FRANZLUEBBERS, A.J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil Tillage Research**, Madison, v. 66, p. 95-106. 2002.

FRANZLUEBBERS, A.J., HANEY, R.L., HONS, F.M., ZUBERER, D.A. Determination of microbial biomass and nitrogen mineralization following rewetting of dried soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p.1133-1139. 1996.

FUENTES, M.; GONZÁLEZ-GAITANO, G.; GARCÍA-MINA, J. M. The usefulness of UV-visible and fluorescence spectroscopies to study the chemical nature of humic substances from soils and composts. **Organic Geochemistry**, Amsterdam, v. 37, p. 1949-1959, 2006.

FUJISAKA, S. et al. The effects of forest conversion on annual crops and pastures: estimates of carbon emissions and plant species loss in a Brazilian Amazon colony. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 69, p. 17-26, 1998.

GARCIA, R. A., LI, Y., ROSOLEM, C. A. Soil organic matter and physical attributes affected by crop rotation under no-till. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, p. 1724-1731. 2013.

GARCIA, R.A. et al. Potassium cycling in a corn-brachiaria cropping system. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 28, p. 579–585. 2008.

GASSEN, D.N.; GASSEN, F.R. **Plantio direto**. Passo Fundo: Aldeia Sul, 1996. 207p.

GONÇALVES, J. R. P. et al. Granulometria e doses de calcário em diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 33, p. 369-375, 2011.

GONÇALVES, W. G. et al. Sistema radicular de plantas de cobertura sob compactação do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, p. 67-75, 2006.

GONG, H. et al. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, Limerick, v. 69, p. 313-321. 2005.

GOUSSAIN, M.M. et al. Efeito da aplicação de silício em plantas de milho no desenvolvimento biológico da lagarta do cartucho *Spodoptera frugiperda* (J.E. Smith) (*Lepidoptera: Noctuidae*). **Neotropica Entomology**, Londrina, v. 31, p. 305-310. 2002.

GUIMARÃES, D.V. et al. Soil organic matter pools and carbon fractions in soil under different land uses. **Soil Tillage Research**, Madison, v. 126, p. 177–182. 2013.

GUNES, A. et al. Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, n. 13, p. 1885-1903, 2008.

GUNES, A. et al. Silicon-mediated changes on some physiological and enzymatic parameters symptomatic of oxidative stress in barley grown in sodic-B toxic soil. **Journal**

of **Plant Physiology**, Amsterdam, v. 164, p. 807-811, 2007.

GUNES, A. et al. Silicon-mediated changes on some physiological and enzymatic parameters symptomatic of oxidative stress in barley grown in sodic-B toxic soil. **Journal of Plant Physiology**, Amsterdam, v. 164, p. 807-811. 2007.

HATTORI, T. et al. Application of silicon enhanced drought tolerance in sorghum bicolor. **Physiologia Plantarum**, v.123, p. 459-466, 2005.

HECKLER, J.C.; HERNANI, L.C.; PITOL, C. Palha. In: SALTON, J.C.; HERNANI, L.C.; FONTES, C.Z (Org.). **Sistema plantio direto: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília: Embrapa – SPI, 1998. p.37-49.

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

HINGSTON, F. J.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. Anion adsorption by goethite and gibbsite. I. The role of the proton in determining adsorption envelopes. **Journal of Soil Science**, Londres, v. 23, p. 177-192, 1972.

HOBBS, P.R.; SAYRE, K.; GUPTA, R. The role of conservation agriculture in sustainable agriculture. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, London, v.363, p.543–555, 2008.

HOLTZ, G. P.; SÁ, J. C. M. Resíduos culturais: reciclagem de nutrientes e impacto na fertilidade do solo. In: CURSO SOBRE MANEJO DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 1995, Castro. **Anais...** Castro: Fundação ABC, 1995. p. 21-36.

INOMOTO, M. M. et al. Avaliação em casa de vegetação do uso de sorgo, milho e crotalária no manejo de *Meloidogyne javanica*. **Tropical Plant Pathology**, Viçosa, v. 33, p. 125-129, 2008.

JENKINSON, D. S., POWLSON, D. S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil. V. A method for measuring soil biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, Madison, v. 25, p.1649-1655. 1976.

JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plants, and animals. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 19, p. 107-149, 1967.

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**, Amsterdam v. 171, p. 245–253, abr. 1995. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF00010278>>.

KARIUKI, S. K. et al. Hard red winter wheat cultivar responses to a pH and aluminum concentration gradient. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, p. 88-98, 2007.

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

- KICHEL, A.N. Pastagens. **DBO Rural**, São Paulo, v.16, n.207, p.64 -66, 1998.
- KIEHL, J.C. Manual de edafologia: Relação solo-planta. **Ceres**, São Paulo, 264p, 1979.
- KORNDÖRFER, C. M.; ABDALA, A. L.; BUENO, I. C. S. O silício e as gramíneas no cerrado. **Revista Veterinária Notícias**, Uberlândia, v. 7, p. 153-163, 2001.
- KORNDÖRFER, G. H. et al. Avaliação de métodos de extração de Si em solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 101-106, 1999.
- KORNDÖRFER, G. H. PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. Uberlândia: GPSi; ICIAG; UFU, 2002. 23 p.
- KORNDÖRFER, G. H.; NOLLA, A. Efeito do silício no crescimento e desenvolvimento de plantas. In: SIMPÓSIO SOBRE SÍLÍCIO NA AGRICULTURA, 2., 2003, Lavras. **Anais...** Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2003. 1 CD-ROM.
- KORNDÖRFER, G. H.; NOLLA, A.; RAMOS, L. A. Available silicon in tropical soils and crop yield. In: SILICON, 3., 2005, Uberlândia. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2005.
- KORNDÖRFER, G.H.; LEPSCH, I. Effect of silicon on plant growth and yield. In: DATNOFF, L.E. et al. (Eds.). **Silicon in agriculture**, Amsterdam: Elsevier, 2001. p.133-147. Available from: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928342001800112>>. Accessed: Nov. 25, 2014. doi: 10.1016/S0928-3420(01)80011-2.
- Lal, R. 2008. Soil carbon stocks under present and future climate with specific reference to European ecoregions. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Columbus v. 81, p.113–127. 2008.
- LAL, R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. **Environmental Pollution**, Amsterdam, v. 116, p. 353-362, 2002.
- LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam v. 123, p. 1–22. 2004.
- LEITE, L.F.C. et al. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos vegetais depositados sobre Latossolo Amarelo no Cerrado Maranhense. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, p.29-35, 2010.
- LEMOS, L. B.; FARINELLI, R.; MINGOTTE, F. L. C. Adubação verde e rotação de culturas. In: Arf, O.; Lemos, L.B.; Soratto, R. P.; Ferrari. S. (Ed). **Aspectos gerais da cultura do feijão *Phaseolus vulgaris* L.** Botucatu: FEPAF, p. 117-147, 2015.
- LIANG, Y. et al. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. **Environmental Pollution**, Barking, v.47, p.422-428, 2007.
- LIANG, Y.; WONG, J.W.C.; WEI, L. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. **Chemosphere**, Oxford, v.58, p.475-483, 2005.

LOMBARDI NETO, F.; DRUGOWICH, M. **Manual técnico de manejo e conservação de solo e água**. Campinas: CATI, v.2, 1994. 168p.

LOPES, A. S. et al. **Sistema plantio direto**: bases para o manejo da fertilidade do solo. São Paulo: ANDA, 2004. 110 p.

LORENZ, K.; LAL, R. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 88, p. 35-66, 2005.

LUCHESE, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. **Fundamentos de química do solo**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2001. 182 p.

LUZ, P.H.C. et al. Effect of silicate fertilization on soil and on palisade grass plants under grazing intensities. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.40, n.7, p.1458-1465, 2011.

MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for crop plants. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Eds.). **Silicon in agriculture**. The Netherlands: Elsevier Science, 2001. 403 p.

MA, J.F. Role of silicon in enhancing the resistance of plants to biotic and abiotic stresses. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokio, v. 50, p. 11-18, 2004.

MA, J.F.; TAKAHASHI, E. Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan. Amsterdam: **Elsevier Science**, 2002. Cap.6, p.73-106.

MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, Oxford, v.11, p.392-397, 2006.

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

MALAVOLTA, E. Manual de nutrição mineral de plantas. Piracicaba: **Editora Ceres**, 2006. 631p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

MALI, M.; AERY, N. C.; Effect of silicon on growth, biochemical constituents, and mineral nutrition of cowpea. **Journal of Plant Nutrition**, Londres, v. 40, n. 6, p. 1041-1052, 2009.

MANCUSO, M.A.C.; SORATTO, R.P.; CRUSCIOL, C.A.C.; CASTRO, G.S.A. Effect of potassium sources and rates on arabica coffee yield, nutrition, and macronutrient export. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.38, p.1448-1456, 2014.

MARCOLAN, A.L.; ANGHINONI, L. Atributos químicos de um argissolo e rendimento de culturas pelo manejo da calagem em plantio direto. In: **CONGRESSO BRASILEIRO**

**DE CIÊNCIA DO SOLO**, 29, 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 1 CD – ROM.

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

MARTINS, D.; MARTINS, C. C.; COSTA, N. V. Potencial alelopático de soluções de solo cultivado com *Urochloa brizantha*: efeitos sobre a germinação de gramíneas forrageiras e plantas daninhas de pastagens. **Planta Daninha**, Viçosa, MG, v. 24, p. 61-70, 2006.

MARY B. et al. C and N cycling during decomposition of root mucilage, roots and glucose in soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Madison, v. 25, p. 1005-1014. 1993.

MASCARENHAS, H.A.A. et al. Efeito na produtividade da rotação de culturas de verão e crotalaria no inverno. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.55, p.534 – 537, 1998.

MAUAD, M. et al. Nitrogen and silicon fertilization of upland rice. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 60, p. 761–765. 2003.

MCKEAQUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soils. II. The adsorption of monosilicic acid by soil and by other substances. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 43, n. 1, p. 83-95, 1963.

MEDA, A. R. et al. Alleviating soil acidity through plant organic compounds. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 44, p. 185-189, 2001.

MEDA, A. R. et al. Plantas invasoras para melhorar a eficiência da calagem na correção da acidez subsuperficial do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 647-654, 2002.

MEDEIROS, L. B. et al. Micronutriente na cana-de-açúcar irrigada: correção do solo com escória siderúrgica. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 6, p. 447-461, 2009.

MELLO, J.C.A. et al. 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**, Viçosa, v. 27, p.553 – 561, 2003.

MENEGALE, M. L. C., CASTRO, G. S. A., MANCUSO, M. A.; Silício: Interação Com o Sistema Solo-Planta. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v. 4, p. 435-454, 2015.

MEURER, E. J. Potássio. In: FERNADES, M. S. (Ed.) **Nutrição mineral de Plantas**. 432p. 2006.

MEYER, J. H.; KEEPING, M. G. Past, present and future research of the role of silicon for sugarcane in southern Africa. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. p. 257-276.

MILORI, D. M. P. B. et al. Organic matter study of whole soil samples using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 70, p. 57-63, 2006.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. MAPA. Projeções do Agronegócio: Brasil 2011/2012 a 2021/2022. Assessoria de Gestão Estratégica. Brasília : Mapa/ACS, 2012. 76 p.

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

MITANI, N.; YAMAJI, N.; MA, J. F. Identification of maize silicon influx transporters. **Plant and Cell Physiology**, Oxford, v. 50, p. 5-12, 2009.

MIYASAKA, S. et al. Adubação verde, calagem e adubação mineral do feijoeiro em solo sob vegetação de cerrado. **Bragantia**, Campinas, v.24, p.321 – 338, 1965.

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

MIYAZAWA, M. et al. Gravimetric determination of soil organic matter. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 43, n. 5, p. 475-478, 2000.

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

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, S. R. G. et al. Efeito de fontes de silício na incidência e na severidade da antracnose do feijoeiro. **Fitopatologia Brasileira**, Brasília, v. 31, p. 69-75, 2006.

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

MORO, E. et al. Teor de nitrogênio inorgânico no solo em função de plantas de cobertura, fontes de nitrogênio e inibidor de nitrificação. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, p. 424-435, 2013.

MOUSSA, H. R. Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt-stressed maize (*Zea mays* L.). **International Journal of Biology**, Amsterdam, v. 8, p. 293-297, 2006.

NARRO, L. et al. Implication of soil acidity tolerant maize cultivars to increase production in developing countries. In: **Plant Nutrient Acquisition: New Perspectives**, Springer, Tokyo, p. 447–463, 2001.

NASCENTE, A.S. et al. Brachiaria ruziziensis and herbicide on the yield of upland rice. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 30, p. 729-736, 2012.

NEALE, S. P., SHAH, Z., ADAMS, A. Changes in microbial biomass and nitrogen turnover in acidit organic soils following liming. **Soil Biology and Biochemistry**, Madison, v. 29, p. 1463-1474. 1997.

NWACHUKU, D. A.; LOGANATHAN, P. The effect of liming on maize yield and soil proprieties in Southern Nigeria. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 22, p. 623-639, 1991.

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

OLIVEIRA, L.A.; KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, A.C. Acumulação de silício em arroz de diferentes condições de pH da rizosfera. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.685-690, 2007.

OLIVEIRA, T.K.; CARVALHO, G.J.; MORAES, R.N.S. Plantas de cobertura e seus efeitos sobre o feijoeiro em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, p.1079 – 1087, 2002.

PACHECO, L. P. et al. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura e produtividade de soja e arroz em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, p.1228-1236, 2013.

PACHECO, L.P. et al. Produção de fitomassa e acúmulo e liberação de nutrientes por plantas de cobertura na safrinha **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, p.17-25, 2011.

PAIM, L.A. et al. Estudo dos efeitos do silício e do fósforo na redução da disponibilidade de metais pesados em área de mineração. **Química Nova**, São Paulo, v.29, p.28-33, 2006.

PEREIRA JÚNIOR, P. et al. Efeito de doses de silício sobre a produtividade e características agronômicas da soja [*Glycine max* (L.) Merrill]. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.34, n.4, p.908-913, 2010.

PEREIRA, J. E. **Solubilidade de alguns calcários e escórias de alto forno**. 1978. 84 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia)–Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1978.

PEREIRA, J.; BURLE, M.L.; RESCK, D.V.S. Adubos verdes e sua utilização no cerrado. In: Simpósio Sobre Manejo E Conservação Do Solo No Cerrado, 1990, Goiânia, GO. **Anais**. Campinas, SP : Fundação Cargill. p.140-154. 1992.

PERIN, A.; GUERRA, J. G. M.; TEIXEIRA, M. G. Cobertura do solo e acumulação de nutrientes pelo amendoim forrageiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 791-796, 2003.

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

PIRES, F. R. et al. Manejo de plantas de cobertura antecessora à cultura da soja em plantio direto. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 55, p. 94-101. 2008.

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

POZZA, A.A.A. et al. Retenção e dessorção competitivas de ânions inorgânicos e gibbsita natural de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.42, p.1627-1633, 2007.

PRABAGAR, S.; HODSON, M.J.; EVANS, D.E. Silicon amelioration of aluminium toxicity and cell death in suspension cultures of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.), **Environmental and Experimental Botany**. Elmsford, v. 70, p.266 – 276, 2011.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um latossolo vermelho-amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, p.1199-1204, 2001.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo da acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.287-286, 2003.

PULZ, A.L. et al. Influencia de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade de batata sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1651-1659, 2008.

QUAGGIO, J. A. et al. Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 28, p. 375-383, 1993.

QUAGGIO, J. A.; MASCARENHAS, H. A. A.; BATAGLIA, O. C. Resposta da soja à aplicação de doses crescentes de calcário em Latossolo Roxo distrófico de cerrado. II - Efeito residual. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 6, p. 113-118, 1982.

RAIJ, B. van et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: IAC, 2001. 285p.

RAIJ, B. van et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1997. 285 p.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A. **Uso eficiente de calcário e gesso na agricultura**. In. : RAIJ, B. van; CAMARGO, O. A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, Campinas, v. 32, p. 223-231, 1973.

RAMOS, L.A. et al. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, p.849-857, 2006.

REDDY, S.S. et al. Long-term effects of poultry litter and conservation tillage on crop yields and soil phosphorus in cotton-cotton-corn rotation. **Field Crops Research**, Madison, v. 114, p. 311–319. 2009.

REIS, T. H. P. et al. Efeito da associação silício líquido solúvel com fungicida no controle fitossanitário do cafeeiro. **Coffee Science**, Lavras, v. 3, p. 78-80, 2008.

REZENDE, C. P. et al. Litter deposition and disappearance in *Brachiaria* pastures in the Atlantic forest region of the South of Bahia, Brazil. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 54, p. 99-112, 1999.

RHEINHEIMER, D. S. et al. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 797-805, 2000.

RHEINHEIMER, D.S. et al. Modificações em atributos químicos de solo arenoso sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 713 – 721, 1998.

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

RODRIGUES FILHO, F.S.O. et al. Adubação verde e orgânica para o cultivo de amendoim (*Arachis hypogaea* L.). **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.53, p.88 – 93, 1996.

ROSOLEM, C. A.; CALONEGO, J. C.; FOLONI, J. S. S. Lixiviação de potássio da palha de espécies de cobertura de solo de acordo com a quantidade de chuva aplicada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 355-362, 2003.

ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S.; TIRITAN, C.S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. **Soil Tillage Research**, Madison, v. 65, p. 109–115. 2002.

ROSS D. J. Soil microbial biomass estimated by the fumigation-incubation procedure: seasonal fluctuations and influence of soil moisture content. **Soil Biology Biochemistry**, Madison, v. 19, p. 397-404. 1987.

RUSSEL, E. W. **Soil condition and plant growth**. 10. ed. New York: Longman, 1976. 849 p.

SÁ, J. C. M. et al. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1486–1499, 2001.

SÁ, J. C. M. et al. Soil organic carbon and fertility interactions affected by a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Tillage Research**, Madison, v. 104, p. 56–64. 2009.

SÁ, J. C. 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**, Madison, v. 103, p. 46-56, 2009.

SALET, J. C., ANGHINONI, I., KOCHHANN, R. A. Atividade do alumínio na solução do solo do sistema plantio direto. **Revista Científica Unicruz**, Cruz Alta, v. 1, p. 9-13, 1999.

SALTON, J. C. et al. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 11-21, 2008.

SALTON, J. C. et al. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, Brasília, v. 46, p. 1341-1356, 2011.

SALTON, J. C.; KICHEL, A. N. Milheto: alternativa para cobertura do solo e alimentação animal. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 1997. 1 **Folder**.

SANCHEZ, P. A., AND SALINAS, J. G. (1981). Low-input technology for managing Oxisols and Ultisols in tropical America. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 34, p. 280–406. 1981.

SANTOS, D. et al. Cultivares de trigo submetidas a déficit hídrico no início do florescimento em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, p.836-842, 2012.

SANTOS, H. P. dos; LHAMBY, J. C. B.; WOBETO, C. Efeito de culturas de inverno em plantio direto sobre a soja cultivada em rotação de culturas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 33, p. 289-295, 1998.

SAVANT, N. K.; SNYDER, G. H.; DATNOFF, L. E. Silicon management and sustainable rice production. **Advances in Agronomy**, Amsterdam, v. 58, p. 151-199, 1997.

SÁVIO, F.L. et al. Produção de biomassa e conteúdo de silício em gramíneas forrageiras sob diferentes fontes de silicato. **Ciências Agrárias, Semina**, v.32, p.103-110, 2011.

SEEBOLD, K.W. et al. 2000. Effect of silicon rate and host resistance on blast, scald, and yield of upland rice. **Plant Disease**, Florida, v. 84, p. 871–876. 2000.

SEGNINI, A. **Estrutura e estabilidade da matéria orgânica em áreas com potencial de seqüestro de carbono no solo**. São Carlos, 2007, 131 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos.

SILVA, A.G. et al. Produção de fitomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura e cultivo da mamona em sucessão no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, p. 2092-2098, 2010.

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

SILVA, J.A.A.; DONADIO, L.C.; CARLOS, J.A.D. **Adubação verde em citros**. Jaboticabal: FUNEP, 1999. 37p. (Boletim citrícola, 9).

SILVA, L. M. V.; PASQUAL, A. Dinâmica e modelagem da matéria orgânica do solo com ênfase ao ecossistema tropical. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 14, n. 3, p. 13-24, 1999.

SILVA, R. H.; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 253-260, 2001.

SILVEIRA, P.M. **Influência do preparo do solo e de rotação de culturas no feijoeiro.** Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA Arroz e Feijão, 2002. 18 p (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento /EMBRAPA Arroz e Feijão).

SIMMONS, B. L.; COLEMAN, D. C. Microbial community response to transition from conventional to conservation tillage in cotton fields. **Applied Soil Ecology**, Madison, v. 40, p. 518–528. 2008.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B.A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, Amsterdam, v.74, p.65-105, 1996.

SORATTO, R. P. et al. Leaf application of silicic acid to white oat and wheat. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1538-1544, 2012.

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

SOUZA FILHO, A. P. S.; RODRIGUES, L. R. A.; RODRIGUES, T. J. D. Potencial alelopático de forrageiras tropicais: efeitos sobre invasoras de pastagens. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 15, p. 53-60, 1997.

SOUZA, L. S. et al. Efeito alelopático de capim-braquiária (*Urochloa decumbens*) sobre o crescimento inicial de sete espécies de plantas cultivadas. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 24, p.657-668, 2006.

SPARLING, G.; VOJVODIC-VUKOVIC, M.; SCHIPPER, L.A. Hot-water-soluble C as a simple measure of labile soil organic matter: The relationship with microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, Madison, v. 30, p. 1469–1472. 1998.

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: Genesis, composition, reactions.** 2. ed. New York : J. Wiley & Sons, 1994. 496p.

STEVENSON, F.J.; COLE, M.A. **Cycles of soils: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients.** 2. ed. New York: J. Wiley, 1999. 427 p.

SWINNEN, J., VAN VEEN, J. A., MERCKX, R. Rhizosphere carbon fluxes in field-grown spring wheat: model calculation bases on <sup>14</sup>C partitioning after pulse labelling. **Soil Biology & Biochemistry**, Madison, v. 26, p. 171-182. 1994.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: Matsuo, T., Kumazawa, K., Ishii, R., Ishihara, K., Hirata, H. (Eds.), **Science of Rice Plant Physiology.** Tokyo, pp. 420-433. 1995.

TANAKA, A.; PARK, Y. D. Significance of the absorption and distribution of silica in the growth of rice plant. **Soil Science and Plant Nutrition**, Londres, v. 12, p. 23-28, 1966.

TANAKA, R.T. et al. Cultura da soja após a incorporação de adubo verde e orgânico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, p.1477 – 1483, 1992.

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

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

TEIXEIRA, I. R. et al. Fontes de silício em cultivares de feijão nas safras das águas e da seca. **Revista Ciência Agronômica**. Fortaleza, v. 39, p. 562-568, 2008.

TEIXEIRA, L.G.; LOPES, A.; LA SCALA JR, N. Temporal variability of soil CO<sub>2</sub> emission after conventional and reduced tillage described by an exponential decay in time model. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, p.224-231, 2010.

TIAN, S., Y. et al. Continued no-till and subsoiling improved soil organic carbon and soil aggregation levels. **Agronomy Journal**, Madison, v. 106, p. 212–218. 2014.

TIMOSSI, P. C.; DURIGAN, J. C.; LEITE, G. J. Formação de palha por braquiárias para adoção do sistema plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 66, p. 617-622, 2007.

TIROL-PADRE, A., LADHA, J.K. Assessing the reliability of permanganate-oxidizable carbon as an index of soil labile carbon. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, p. 969–978. 2004.

TISDALE, S.L.; BEATON, J.D.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers**. 4.ed. New York: Mac Millan, 1985. 754p.

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

TORRES, J. L. R. et al. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 609-618, 2005.

TRINDADE, M. G. et al. Nitrogênio e água como fatores de produtividade do trigo no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, p. 24 – 29, 2006.

VIEIRA, F.C.B. et al. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. **Soil Tillage Research**, Madison, v. 96, p. 195 -204. 2007.

VILELA, L.; BARCELLO, A. O.; SOARES, W. V. Restabelecimento da capacidade produtiva das pastagens do cerrado: experiências da Embrapa Cerrados. In: **WORKSHOP INTERNACIONAL PROGRAMA DE INTEGRAÇÃO AGRICULTURA E PECUÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DAS SAVANAS SULAMERICANAS, 2001**, Santo Antônio de Goiás. **Anais...** Santo Antônio de Goiás: EMBRAPA, 2001. p. 94-124.

- VITTI, G. C. Enxofre. In: FERNADES, M. S. (Ed.) **Nutrição mineral de Plantas**. 432p. 2006.
- VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, Magnésio e Enxofre. In: Fernandes, M.S. (Ed). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2006. p. 300-322.
- VON UEXKULL, H.; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. **Plant Soil**, Netherlands, v.171, p.1–15, 1995.
- VORONEY R. P. AND PAUL E. A. Determination of  $k_C$ , and  $k_N$ , in situ for calibration of the chloroform fumigation-incubation method. **Soil Biology & Biochemistry**, Madison, v. 16, p. 9-14. 1984
- WANG, Q.R., LI, Y.C., KLASSEN, W. Changes of soil microbial biomass carbon and nitrogen with cover crops and irrigation in tomato field. **Journal of Plant Nutrition**, Londres, v. 30, p. 623–639. 2007.
- WARDLE, D. A. A comparative assessment of factors witch influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. **Biological Reviews**, Cambridge, v. 67, n. 3, p. 321-358, 1992.
- XAVIER, F. A. S. et al. Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânico e convencional na Chapada da Ibiapaba, CE. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 247-258, 2006.
- XU J. G.; JUMA N. G. Above- and below- ground transformation of photosynthetically fixed carbon by two barley (*Hordeum vulgare* L.) cultivars in a typic cryoboroll. **Soil Biology & Biochemistry**, Madison, v. 25, p. 1263-1272. 1993.
- YANG, Y. et al. Effects of forest conversion on soil labile organic carbon fractions and aggregate stability in subtropical China. **Plant Soil**, Netherlands, v. 323, p. 153–162. 2009.
- YAO, H.Y. et al. 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**, Madison, v. 41, p. 1425–1432. 2009.
- ZECH, W. et al. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v. 79, p. 117-161, 1997.
- ZIGLIO, C. M.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. a. Formas orgânicas e inorgânicas de mobilização do cálcio no solo. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 42, p. 257–262, 1999.
- ZONTA, E. et al. O sistema radicular e suas interações com o ambiente edáfico. In: FERNADES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 7-52.
- ZOTARELLI, L. **Balanco de nitrogênio na rotação de culturas em sistema de plantio direto e convencional na região de Londrina - PR**. 2000. 134p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

ZUCARELI, C. et al. Adubação fosfatada, componentes de produção, produtividade e qualidade fisiológica em sementes de feijão. **Revista Brasileira Sementes**, Brasília, v. 28, p. 09-15, 2006.

ZUCCARINI, P. Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl stress. **Biologia Plantarum**, Praha, v.52, p.157-160, 2008.