

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**APLICAÇÃO DE CORRETIVOS DE ACIDEZ DO SOLO NA
IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

ANGÉLICA CRISTINA FERNANDES DEUS

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp – Campus de
Botucatu, para obtenção do título de
Doutor em Agronomia (Agricultura).

BOTUCATU-SP
Junho – 2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**APLICAÇÃO DE CORRETIVOS DE ACIDEZ DO SOLO NA
IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

ANGÉLICA CRISTINA FERNANDES DEUS

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Theodoro Büll

Tese apresentada à Faculdade de Ciências
Agronômicas da Unesp – Campus de
Botucatu, para obtenção do título de
Doutor em Agronomia (Agricultura).

BOTUCATU-SP
Junho – 2014

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

D486a Deus, Angélica Cristina Fernandes, 1983-
Aplicação de corretivos de acidez do solo na implantação do sistema plantio direto / Angélica Cristina Fernandes Deus. - Botucatu : [s.n.], 2014
xvi, 112 f. : grafs., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2014
Orientador: Leonardo Theodoro Büll
Inclui bibliografia

1. Silicatos. 2. Solos - Acidez. 3. Calagem dos solos. 4. Metais pesados. I. Büll, Leonardo Theodoro. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "APLICAÇÃO DE CORRETIVOS DE ACIDEZ DO SOLO NA
IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA PLANTIO DIRETO "

ALUNA: ANGÉLICA CRISTINA FERNANDES DEUS

ORIENTADOR: PROF. DR. LEONARDO THEODORO BULL

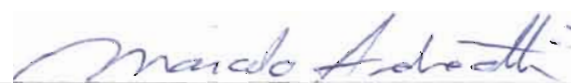
Aprovado pela Comissão Examinadora



PROF. DR. LEONARDO THEODORO BULL



PROFª DRª ROSEMARY MARQUES DE A. BERTANI



PROF. DR. MARCELO ANDREOTTI



PROF. DR. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES



PROF. DR. CARLOS ALEXANDRE COSTA CRUSCIOL

Data da Realização: 27 de junho de 2.014.

*“Determinação, coragem e autoconfiança são
fatores decisivos para o sucesso. Não importa
quais sejam os obstáculos e as dificuldades.
Se estivermos possuídos de uma inabalável
determinação, conseguiremos superá-los.
Independente das circunstâncias devemos ser
sempre humildes, recatados e despidos de orgulho.”*

Dalai Lama

*“Há uma força motriz mais poderosa que
o vapor, a eletricidade e a energia
atômica: a vontade”*

Albert Einstein

*Aos amores da minha vida,
Minha mãe Luzia e,
Meu Pai Florisvaldo*
DEDICO

Agradecimentos

À Deus sempre e acima de tudo, por iluminar meus pensamentos e guiar sempre no melhor caminho;

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônomicas Campus de Botucatu por proporcionar a realização do Curso de Mestrado e Doutorado e aos seus docentes pelos ensinamentos e formação profissional.

Ao meu orientador, professor, Dr. Leonardo Theodoro Büll, pela confiança depositada na realização deste trabalho e ensinamentos, que me fizeram crescer MUITO.

Ao Professor, Dr. Chris Guppy pela oportunidade e apoio na realização do doutorado sanduíche; aos funcionários da Universidade de New England, em especial, Roz, Jane, Leanne, Mic, pela forma tão carinhosa como me acolheram e na ajuda com as análises de sílicio.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro concedido por meio de bolsa de estudo e auxílio financeiro.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos no exterior.

A empresa Harsco Minerais pela doação do Agrosilício e ao Professor Dr. Augusto Piau pela doação das escórias de aciaria, forno de panela e alto forno.

Aos funcionários do Departamento de Solos “minha segunda casa” onde passei a maior parte do meu tempo durante esses seis anos de pós-graduação e tive a oportunidade de conhecer e trabalhar com pessoas incríveis que não mediram esforços para me ajudar, Adriana, Silvinha, Zé Carlos, Dorival, Néia, Marta, Isabel, Seu Hélio, Dona Izaura, Seu De Pieri, Adenir, Cris, Emerson, Roberto, Pedrinho, Adilson, Sonia, meu muito-OBRIÇADA!

Aos funcionários de campo do Departamento de Agricultura Célio, Mateus e Casemiro, pela disposição em sempre ajudar.

Aos funcionários da Fazenda Lageado por todos os serviços prestados.

Ao professor, Dr. Edvaldo A. Amaral da Silva por disponibilizar o Laboratório de sementes, e a técnica Valéria pelo auxílio nas avaliações.

Aos funcionários da Biblioteca da FCA e da seção de Pós Graduação pela gentileza e presteza no atendimento.

À professora Marta Mischon pela orientação na parte estatística.

À minha família por fazer parte desta caminhada, por se manterem ao meu lado me incentivando na realização dos meus sonhos.

Às grandes amigas Almecina, Carla, Franciana, Graciele e Regininha, que sem as quais não seria possível conhecer o verdadeiro sentido da palavra amizade. Obrigada pela prazerosa convivência, incentivo e amizade.

Ao estagiário Rafael e às amigas Laís e Susiane pela ajuda nas avaliações do experimento.

Aos amigos de pós-graduação Laís, Susiane, Deise, Gabriela, Rai, Clescy, Priscila "Pira", Erica, Joselina, Gêssica, Ana Kummer, Eliel, Aline Sandim, Natalia, Zé, Natália Soares, Adriana Almeida, Aline Matoso, Ana Cláudia, pela amizade e momentos de descontração.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE FIGURAS	XVI
1.RESUMO	1
2.SUMMARY	3
3. INTRODUÇÃO	5
4. REVISÃO DE LITERATURA	7
4.1 Acidez do solo em sistema de semeadura direta.....	7
4.2 Correção da acidez do solo em sistema de semeadura direta	9
4.3 Escórias de siderurgia como corretivos da acidez do solo	14
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
5.1 Localização e Caracterização da Área Experimental	17
5.2 Tratamentos e condução do experimento.	20
5.4 Amostragens e avaliações realizadas	24
5.4.1 Avaliações do solo	24
5.4.1.1. Análise química.....	24
5.4.1.2 Avaliação de extratores químicos de silício no solo	25
5.4.1.3 Características físicas do solo: densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total	25
5.4.2 Avaliações na cultura do feijoeiro.....	26
5.4.2.1 Diagnose foliar de nutrientes, de silício e de metais pesados	26
5.4.2.2 Componentes da produção e produtividade de grãos.....	26
5.4.3 Avaliações na cultura da aveia-preta (Inverno 2011, 2012 e 2013).....	27
5.4.3.1 Matéria seca da parte aérea.....	27
5.4.3.2 Diagnose foliar de nutrientes, de silício e de metais pesados	27
5.4.3.3 Componentes da produção e produtividade de grãos	28
5.4.4. Avaliações na cultura da soja (Verão 2011/2012 e 2012/2013)	28
5.4.4.1 Diagnose foliar de nutrientes, de silício e de metais pesados	28
5.4.4.2 Componentes da produção e produtividade de grãos	28
5.5 Análise estatística.....	29
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
6.1 Atributos químicos do solo	30
6.2 Metais pesados no solo e no tecido vegetal do feijoeiro, da aveia preta e da soja. ..	63

6.3 Silício	67
6.3.1 Silício no solo	67
6.3.2 Silício na planta.....	70
6.3.3 Extratores de Si no solo	72
6.4 Atributos físicos do solo: densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade.....	73
6.5 Diagnose foliar de nutrientes, componentes de produção e produtividade das culturas	77
6.5.1 Cultura do feijoeiro (Verão 2011).....	77
6.6 Cultura da aveia preta (Inverno 2011, 2012 e 2013).....	80
6.7 Cultura da soja (Verão 2011/2012 e 2012/2013).....	89
8. CONCLUSÕES	95
9. REFERÊNCIAS.....	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização química inicial do solo.	18
Tabela 2. Caracterização química e física dos corretivos de acidez do solo.	21
Tabela 3. Valores de pH em CaCl_2 do solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).....	31
Tabela 4. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para valores de pH em CaCl_2 nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade após 23 meses da aplicação dos corretivos.	34
Tabela 5. Valores de acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}$) (mmolc dm^{-3}) após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).	35
Tabela 6. Valores de saturação por bases (V%) após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).....	37
Tabela 7. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para valores de saturação por bases (V%) na camada de 5-10 cm, após 12 e 23 meses da aplicação dos corretivos.	38
Tabela 8. Valores de matéria orgânica do solo (M.O.) após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).	40
Tabela 9. Teor de fósforo (P) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF),	

escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T)..... 42

Tabela 10. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para o teor de fósforo (P) nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade após 2 e 12 meses da aplicação dos corretivos. 44

Tabela 11. Teor de cálcio (Ca) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T)..... 45

Tabela 12. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para o teor de cálcio (Ca) no solo, nas camadas de 0-5; 5-10; 10-20 e 20-40 cm após 2, 12 e 23 meses da aplicação dos corretivos..... 46

Tabela 13. Teor de magnésio (Mg) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T)..... 47

Tabela 14. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para o teor de magnésio (Mg) na camada de 0-5 e 20-40 cm após 12 e 23 meses da aplicação dos corretivos. ... 50

Tabela 15. Teor de potássio (K) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T). 51

Tabela 16. Valores de soma de bases (SB) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T)..... 52

Tabela 17. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para os valores de soma de bases (SB) na camada de 0-5 cm, após 2 e 23 meses da aplicação dos corretivos. 53

Tabela 18. Valores da capacidade de troca de cátions (CTC) após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílicio (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T). 54

Tabela 19. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para capacidade de troca de cátions (CTC) na camada de 0-5 cm após 2 e 23 meses da aplicação dos corretivos. 55

Tabela 20. Teor de boro (B) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílicio (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T). 56

Tabela 21. Teor de cobre (Cu) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílicio (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T). 57

Tabela 22. Teor de ferro (Fe) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílicio (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T). 58

Tabela 23. Teor de manganês (Mn) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílicio (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T). 59

Tabela 24. Teor de zinco (Zn) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílicio (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T). 60

Tabela 25. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para os teores de Fe na camada de 0-5 cm, Mn na camada de 20-40 cm e Zn nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm..... 62

Tabela 26. Teores de metais pesados no solo, na camada de 0 a 20 cm de profundidade, após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T)..... 63

Tabela 27. Teores de metais pesados na parte aérea do feijoeiro (verão 2011), aveia preta (inverno 2011, 2012 e 2013), soja (verão 2011/2012 e 2012/2013), em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T)..... 65

Tabela 28. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para os teores de Ni nas folhas do feijoeiro, Pb na parte aérea da aveia preta (inverno 2011) e de Cr na parte aérea da aveia preta (inverno 2012). 66

Tabela 29. Teor de silício (Si) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T)..... 69

Tabela 30. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para o teor de silício (Si) no solo, na camada de 10-20 cm, aos dois meses após aplicação dos corretivos..... 70

Tabela 31. Teor de silício (Si) na parte do feijoeiro, soja e aveia preta em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T)..... 71

Tabela 32. Teor de silício (Si) no solo extraído por CaCl_2 , ácido acético e resina coletados na camada de 0-20 cm após 23 meses da aplicação incorporada e em superfície dos corretivos de acidez do solo. 73

Tabela 33. Médias de densidade do solo, porosidade total, microporosidade e macroporosidade, nas camadas de solo de 0-5 e 5-10 cm, após 34 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T)..... 75

Tabela 34. Teores médios de macronutrientes foliares do feijoeiro em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T). 77

Tabela 35. Teores médios de micronutrientes foliares do feijoeiro em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T). 78

Tabela 36. Componentes da produção e produtividade de grãos do feijoeiro em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T). 79

Tabela 37. Produção de matéria seca (MS) e teores médios de nutrientes na parte aérea da aveia preta (2011), em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T). 81

Tabela 38. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para a produção de MS da parte aérea da aveia preta (2011). 82

Tabela 39. Produção de matéria seca (MS) e teores médios de nutrientes na parte aérea da aveia preta (inverno 2012) em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T)..... 83

Tabela 40. Produção de matéria seca (MS) e teores médios de nutrientes na parte aérea da aveia preta (inverno 2013) em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).....	84
Tabela 41. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para o teor de Fe na parte aérea da aveia preta (2013).....	85
Tabela 42. Componentes da produção e produtividade da aveia preta (2011) em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).	87
Tabela 43. Componentes da produção e produtividade da aveia preta (inverno 2012) em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).	88
Tabela 44. Componentes da produção e produtividade da aveia preta (2013) em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).	89
Tabela 45. Teores médios de macronutrientes foliares da soja cultivar 5D688, safra 2011/2012 e 2012/2013, em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).....	90
Tabela 46. Teores médios de micronutrientes foliares da soja cultivar 5D688, safras 2011/2012 e 2012/2013, em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).....	92

Tabela 47. Componentes de produção e produtividade média de grãos de soja, cultivar 5D688, safras 2011/2012 e 2012/2013 em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T)..... 93

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Precipitação pluvial acumulada mensal (mm) e temperaturas máxima e mínima (°C) registradas durante a condução do experimento, no período de dezembro de 2010 a outubro de 2013, Botucatu, SP.	19
--	----

1. RESUMO

No sistema de semeadura direta (SSD), a prática da correção da acidez do solo se restringe ao uso do calcário, havendo poucas informações em relação às escórias de siderurgia. O trabalho objetivou avaliar as alterações em atributos químicos do solo, absorção de nutrientes e produtividade do feijoeiro, aveia preta e soja em sucessão, em função da aplicação incorporada e superficial de escórias de siderurgia, comparadas ao calcário, na implantação do sistema de plantio direto. O experimento foi conduzido sob um Latossolo Vermelho distrófico, durante três anos (2010-2013). Os tratamentos consistiram na aplicação superficial e incorporada de sete corretivos da acidez do solo: escórias de aciaria (EA), de alto forno (EAF), forno de panela (EFP), do aço inox (agrosilício®) (AG), wollastonita (W), calcário dolomítico (CD) e calcário dolomítico calcinado (CDC), além de uma testemunha sem aplicação de corretivo. A dose aplicada de cada corretivo foi calculada para elevar a saturação por bases do solo a 70%. Em fevereiro de 2011 foi realizado o primeiro cultivo com o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*), em seguida o experimento foi desenvolvido obedecendo a um sistema de sucessão de culturas, ou seja, no inverno foi semeada a aveia preta (*Avena strigosa*) e no verão a soja (*Glycine max*). Os corretivos de acidez do solo proporcionaram alterações nos atributos químicos do solo, com elevação nos teores de Ca, Mg, P refletindo em alterações nos valores de soma de bases, saturação por bases e capacidade de troca catiônica. As escórias forno de panela (EFP), do aço inox (AG) e de aciaria (EA) podem ser aplicadas em SSD, com eficiência semelhante aos calcários na neutralização da acidez do solo. A maior solubilidade do silicato em relação ao carbonato não torna as

escórias de siderurgia mais eficiente que os calcários, nem proporcionam correção da acidez do solo mais rápida na fase de implantação do SSD. A produtividade do feijoeiro aumenta com o uso de corretivos da acidez do solo em SSD, enquanto, a produtividade da aveia preta apresenta pouca resposta ao uso dos corretivos. A aplicação do AG, EA, EFP, W, CDC e CD, proporciona acréscimos semelhantes na produtividade da cultura da soja em SSD. As escórias de aciaria (EA), do aço inox (AG), forno de panela (EFP) e alto forno (EAF) aplicadas em doses para corrigir a acidez do solo não traz problemas de contaminação com metais pesados. As diferenças entre os extratores de Si no solo e a pouca correlação com os teores de silício absorvido pelas plantas mostra a necessidade de mais estudos sobre o assunto.

Palavras-chave: escórias de siderurgia, acidez do solo, calagem, silício, metal pesado.

APPLICATION OF SOIL ACIDITY CORRECTIVES AT THE ESTABLISHMENT OF NO-TILLAGE SYSTEM. Botucatu, 2014. 112 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho.”

Author: Angélica Cristina Fernandes Deus

Adviser: Leonardo Theodoro Büll

2. SUMMARY

In the no-tillage system, soil acidity correction practice is restricted to limestone use and there is little information regarding the use of steel slag. The study aimed to evaluate the amendments in soil chemical attributes, yield and nutrient uptake of common bean, soybean and black oat according to the application forms of slags, compared to limestone, in the implantation of no till system. The experiment was conducted under a Rhodic Hapludox for three years (2010-2013). The treatments consisted of surface and incorporated application of seven soil acidity correctives: steel slag (SS), blast furnace slag (BFS), ladle furnace slag (LFS), stainless steel slag (“agrosilício”) (AG), wollastonite (W), lime (L) and calcined dolomite lime (CDL), plus one control without corrective application. Each material dose was calculated to raise the base saturation to 70%. In February 2011, the first cultivation of bean (*Phaseolus vulgaris*) occurred. Afterwards, the experiment was developed according to a succession of cultures, that is, in winter black oats was sown (*Avena strigosa*) and in summer, soybean (*Glycine max*) was sown. Soil acidity correctives materials provided changes in soil chemical properties, increased Ca, Mg, P and values of sum of bases, base saturation and CEC. The ladle furnace slag (LFS), SS and AG can be applied in the no-tillage system with similar efficiency to limestone to neutralize soil acidity. Higher solubility of the silicate in regard to the carbonate neither become the steel slag more efficient than the limes not even correct soil acidity faster at the establishment of no-tillage system. The common bean yield increases by application of correctives in soil acidity, while, black oat yield shows low answer to the correctives materials applications. The agrosilicate (AG), SS, LFL, W, CDL and L increases similarly soy bean yield in the no-tillage system. The dose of AG, SS, BFS, LFS applied to correct soil acidity does not represent a risk of excessive accumulation of heavy

metals. Differences between soil silicon extractants and the low correlation with uptake silicon by the plants show the necessity of more studies on the subject.

Key words: steel slag, soil acidity, liming, silicon, heavy metal

3. INTRODUÇÃO

Com a adoção do sistema de semeadura direta (SSD) intensificou-se o interesse por alternativas para correção da acidez do solo. Nesse sistema, o calcário, corretivo mais utilizado, é aplicado superficialmente sem incorporação, porém este apresenta baixa solubilidade em água e necessita entrar em contato com o solo para reagir. Assim, neste sistema de manejo, a eficiência da calagem e a neutralização da acidez nas camadas mais profundas do solo podem diminuir, sendo os seus efeitos observados nas camadas mais superficiais do solo, normalmente até 10 cm (LEAL et al., 2008; GONÇALVES et al., 2011).

Apesar dos calcários serem poucos solúveis e os produtos de sua reação com o solo terem mobilidade limitada, há resultados experimentais que confirmam a eficiência da calagem superficial na correção da acidez de camadas superficiais e do subsolo em SSD (CAIRES et al., 2008a,b; SORATTO e CRUSCIOL, 2008a). Todavia, se ao invés do calcário forem utilizados os silicatos de cálcio e magnésio provenientes das escórias de siderurgia, os efeitos na correção da acidez do solo poderão ocorrer com maior rapidez e em maior profundidade do que o calcário, em razão do silicato possuir solubilidade 6,8 vezes superior ao calcário (ALCARDE, 1992).

Este aspecto torna o uso de escórias de siderurgia interessante em SSD, pois podem possibilitar maior mobilidade dos ânions silicatos no perfil do solo, com correção da acidez do solo e o deslocamento da frente alcalinizante no perfil com menor intervalo de tempo em relação ao calcário.

Trabalhos conduzidos por Corrêa et al. (2007; 2008a e 2009a) evidenciaram efeitos positivos de escória de aciaria aplicada superficialmente em SSD comparado ao calcário na correção da acidez do solo, no deslocamento do Ca^{2+} , no aumento da saturação por bases e na redução do Al^{3+} até 40 cm com o uso da escória de aciaria após 27 meses de reação, o que refletiu em maior produtividade de soja, enquanto os efeitos do calcário no solo foram observados até 20 cm.

Neste contexto, torna-se importante o estudo e o entendimento da reação dos diferentes tipos de escórias no solo. Pouco se sabe sobre a utilização de escórias de siderurgia de diferentes origens, composição química e granulometria (reatividade) em aplicações superficiais, tornando-se importante para o SSD conhecer as alterações nos atributos do solo e da planta, para seu melhor aproveitamento, contribuindo também para redução do acúmulo de escórias geradas pelas indústrias siderúrgicas.

Diante do exposto, o estudo objetivou avaliar as alterações em atributos químicos do solo, absorção de nutrientes e produtividade do feijoeiro, aveia preta e soja em função das formas de aplicação de escórias de siderurgia, comparadas ao calcário, na implantação do sistema de plantio direto.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Acidez do solo em sistema de semeadura direta

O sistema de semeadura direta (SSD) têm se destacado com uma estratégia eficaz para melhorar a sustentabilidade da agricultura em regiões tropicais e subtropicais, contribuindo para minimizar perdas de solo e de nutrientes por erosão (CAIRES, 2007). Esse sistema caracteriza-se pelo não revolvimento do solo, cobertura permanente do solo por resíduos vegetais e rotação de culturas.

A acidez do solo é um fator limitante para a produção agrícola no Brasil, sendo a sua correção o primeiro requisito para a implantação do SSD. Os solos podem ser naturalmente ácidos em razão da pobreza do material de origem em cátions básicos, ou por condições de pedogênese ou de formação de solo que favoreceram a remoção de elementos químicos do solo (RAIJ 1983). Os solos que se encontram nas zonas de clima quente e com altas precipitações pluviais são, na maioria, ácidos ($\text{pH} < 5,5$), mesmo que os materiais que lhe deram origem não tenham reação ácida em contato com a água. O processo de acidificação do solo, nas regiões tropicais e subtropicais inicia-se com a solubilização da rocha, com posterior perda de bases trocáveis do solo associada à retenção preferencial de cátions de maior valência, como o Al, nos sítios de troca das argilas, óxidos e hidróxidos de Fe e Al e da matéria orgânica (MEURER et al., 2012).

Em condições de acidez elevada podem ocorrer teores de Al e Mn em níveis tóxicos, associados às deficiências de Ca, Mg, K e P, e como consequência, há redução da produtividade das plantas cultivadas, pois, a deficiência de Ca e a toxidez de Al são as principais limitações químicas para o crescimento radicular, prejudicando a absorção de água e nutrientes pelas plantas (MEURER et al., 2012).

A mudança no sistema de cultivo com preparo do solo, sistema plantio convencional (SPC), para o SSD tem levado uma série de mudanças químicas e físicas do solo, especialmente quanto à disponibilidade de nutrientes e estruturação para cultivo (PAVINATO e ROSOLEM, 2008). No decorrer do tempo ocorrem modificações na quantidade de matéria orgânica, temperatura, e umidade do solo, e estas modificações interferem tanto na disponibilidade de nutrientes quanto no processo de acidificação do solo.

As maiores concentrações de Ca, Mg, K e P nas camadas superficiais no SSD, ocorrem em razão de não haver revolvimento do solo, e também, pelo acúmulo de nutrientes nos tecidos das plantas cultivadas, com posterior decomposição e liberação desses nutrientes nas camadas superficiais (PAVINATO e ROSOLEM, 2008). A maior saturação por bases, resultante da maior concentração de Ca, Mg e K trocáveis no solo e, possivelmente, da complexação de Al pela matéria orgânica podem minimizar possíveis efeitos negativos da acidificação superficial do solo (CIOTTA et al., 2002).

A ausência de preparo do solo, a quantidade e a qualidade dos resíduos das culturas ao longo dos anos acarretam um aumento gradual no teor de matéria orgânica, notadamente na camada superficial (0 a 10 cm). Este aumento geralmente ocorre após seis ou sete anos de adoção do SSD (LOPES et al., 2004). A elevação do teor de matéria orgânica na camada superficial do solo ocorre pela mineralização mais lenta no SSD em relação ao SPC, devido ao menor contato com o solo, o que retarda a ação dos microrganismos responsáveis por este processo, e, também, pela maior preservação da estrutura do solo, que confere à matéria orgânica maior proteção ao ataque de microrganismos e de seus complexos enzimáticos (LOPES et al., 2004).

O aumento de matéria orgânica decorrente do SSD pode amenizar possíveis efeitos negativos da acidificação superficial pela diminuição da toxidez por Al a partir da lixiviação de compostos orgânicos solúveis em água, os quais atuam na complexação do Al no solo (MIYAZAWA et al., 1993). O aumento na

capacidade de troca de cátions do solo, devido ao maior teor de matéria orgânica, pode proporcionar concentrações suficientes de cátions trocáveis, mesmo em solo com alta acidez (CAIRES et al., 1998). Além disso, a cobertura do solo reduz perdas de água por evaporação e proporciona maior umidade nas camadas superficiais que pode favorecer a absorção de nutrientes pelas plantas em condições de solo ácido (CAIRES e FONSECA, 2000).

No entanto, após alguns anos de cultivo em SSD, ocorre diminuição do pH na camada superficial do solo. A decomposição dos resíduos das culturas, a aplicação de adubos fosfatados e nitrogenados amoniacais ou amídicos e a absorção de nutrientes pelas plantas são considerados os principais fatores que provocam a acidez do solo no SSD. A decomposição dos resíduos vegetais contribui para a formação de ácidos húmicos e fúlvicos, os quais apresentam alta densidade de grupos carboxílicos e fenólicos que sofrem hidrólise com o aumento do pH gerando cargas negativas, podendo acidificar o solo (MIYAZAWA et al., 2000). Entretanto, a acidificação do solo, nesse caso, não tem acentuada toxidez por Al, devido à sua complexação pelas substâncias orgânicas (MEURER et al., 2012).

A reação dos adubos nitrogenados amoniacais ou amídicos e dos fosfatos de amônio causam a acidificação da camada superficial do solo, pois, liberam na sua reação com o solo, íons H^+ . Este fato é agravado quando ocorrem longos períodos de cultivo sem reaplicação de calcário, ou quando altas doses de fertilizantes são aplicadas (BLEVINS et al., 1983; ERNANI et al., 2001). A absorção de nutrientes pelas plantas também pode acidificar o solo; quando as plantas absorvem cátions ocorre a liberação de íons H^+ na rizosfera. As leguminosas absorvem mais cátions, como Ca e Mg, quando comparado às gramíneas, resultando em maior liberação de íons H^+ para o solo e consequente maior acidificação (MEURER et al., 2012).

4.2 Correção da acidez do solo em sistema de semeadura direta

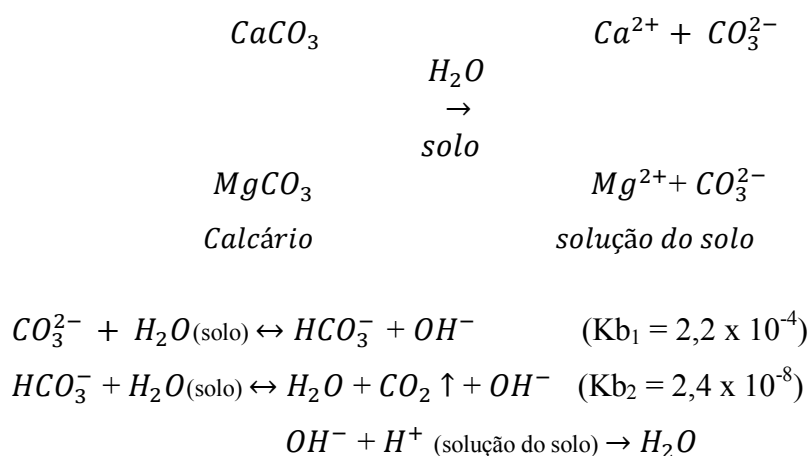
A acidez do solo pode ser corrigida por meio da aplicação de corretivos de acidez do solo, que além da correção de acidez e eliminação da toxidez por Al, fornecem Ca e Mg. O calcário é o corretivo mais utilizado, todavia sua reação é restrita a uma pequena distância do local de aplicação. Por ser um sal pouco solúvel,

necessita inicialmente ser aplicado uniformemente e com incorporação profunda para que após a dissolução o máximo benefício seja alcançado (QUAGGIO, 2000).

Apesar da correção da acidez pressupor a incorporação do calcário ao solo com arações e gradagens para proporcionar o máximo contato entre as partículas do corretivo com os colóides do solo, é crescente o interesse para implantação ou manutenção do SSD, a aplicação superficial do calcário, o que pode ser feito desde que não haja impedimento físico do solo ao crescimento radicular. As vantagens desse procedimento estão relacionadas com a manutenção de atributos químicos e estruturais do solo, com o maior controle da erosão e com a economia de operações de incorporação de calcário e preparo do solo (CAIRES et al., 2003).

A aplicação superficial dos corretivos de acidez do solo, sem incorporação, proporciona menor contato entre as partículas de solo e o corretivo em comparação à aplicação incorporada, determinando que as reações de dissolução ocorram basicamente na superfície do solo. Assim, seus efeitos são observados gradativamente da superfície para as camadas mais subsuperficiais, constituindo a chamada frente de alcalinização, cuja taxa de progressão depende além das características do corretivo, da disponibilidade de água, da dose aplicada, do tempo decorrente e das características físico químicas do solo (RHEINHEIMER et al., 2000; AMARAL e ANGHINONI, 2001).

O calcário na presença de água dissolve-se e os carbonatos dissociam-se e corrigem a acidez do solo de acordo com as seguintes reações (ALCARDE e RODELLA, 2003).



O calcário libera Ca^{2+} , Mg^{2+} e CO_3^{2-} ; e esta é a base química, ou seja, o componente que proporciona a formação de OH^- é o CO_3^{2-} (e posteriormente o HCO_3^-). O valor da constante de ionização (K_{b1}) mostra que o CO_3^{2-} é uma base fraca, isto é, a reação de formação de OH^- é relativamente lenta e parcial. O OH^- produzido neutralizará o H^+ da solução do solo, responsável pela acidez.

Para que ocorra a lixiviação de cátions, é necessário que haja no solo íons acompanhantes, como o cloreto, sulfato, nitrato, formiato, bicarbonato, entre outros, sendo esse um dos motivos que explicam a baixa mobilidade no solo de Ca aplicado na forma de carbonato, já que o ânion CO_3^{2-} reage com o H^+ formando CO_2 , que evolui para a atmosfera (MIYAZAWA et al., 2000).

Devido à baixa solubilidade do calcário, quando o mesmo é aplicado superficialmente espera-se uma ação lenta e restrita às camadas superficiais do solo, em comparação à aplicação incorporada. Rheinheimer et al. (2000) verificaram que a correção da acidez em subsuperfície só ocorreu quando o pH, na zona de dissolução do calcário ficou em torno de 5,5. De acordo com os autores, enquanto existirem cátions ácidos (H^+ , Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+}), a reação de neutralização da acidez ficará limitada à camada superficial, retardando o efeito na subsuperfície.

Alguns trabalhos têm demonstrado que o efeito do calcário aplicado sem incorporação se restringe às camadas superficiais do solo. Alleoni et al. (2005) verificaram que a aplicação superficial de calcário dolomítico em um Latossolo Vermelho distrófico corrigiu a acidez nos primeiros 5 cm de solo aos 6 meses, e até 10 cm aos 18 e 30 meses, contudo, com a aplicação incorporada a correção da acidez alcançou os 20 cm aos 6 meses após a aplicação do calcário. Caires et al. (2006) também observaram ação da calagem superficial sem incorporação até 10 cm, aos 18 e 30 meses após a aplicação superficial. Leal et al. (2008) verificaram que a aplicação superficial de calcário, em dose única ou parcelada, corrigiu a acidez do solo somente até 5 cm de profundidade, decorridos 30 meses da aplicação em um Latossolo Vermelho na região do Cerrado, bem como Caires et al. (2003) constataram que os efeitos benéficos da calagem superficial na correção da acidez do subsolo foram pouco pronunciados sendo mais evidentes com a incorporação do calcário no solo.

Contudo, existem indicativos que a ação do calcário aplicado na superfície pode atingir camadas mais profundas de solo. A calagem superficial calculada para elevar a saturação por bases do solo, em SSD, para 50%, 70% e 90% proporcionou correção da acidez do solo, revelada pela elevação do pH e redução do

alumínio trocável, até a profundidade de 10 cm, observado 12 meses após aplicação do calcário e em camadas subsuperficiais após 28 meses (CAIRES et al., 1998). A ação corretiva foi mantida até a profundidade de 20 cm, aos 40 meses após a calagem, sobretudo, com a maior dose de calcário (CAIRES et al., 2000). Transcorridos nove anos realizou-se reaplicação de calcário na dose de 3 Mg ha⁻¹, o que permitiu que a correção da acidez alcançasse, após 24 meses da reaplicação camadas mais profundas, atingindo os 60 cm de solo (CAIRES et al., 2008a). Assim verifica-se que, devido a menor acidez na camada superficial, a reaplicação sem incorporação de calcário, em solo corrigido com calagem, pode facilitar a movimentação do calcário em direção ao subsolo e proporcionar melhoria ainda mais acentuada na correção da acidez do perfil do solo (CAIRES, 2013).

Um dos mecanismos atribuídos à eficiência da correção da acidez do solo em subsuperfície, com a aplicação superficial de calcário em SSD, é a liberação de compostos orgânicos hidrossolúveis de baixo peso molecular pelos materiais vegetais presentes na superfície do solo (FRANCHINI et al., 1999). Franchini et al. (2001) verificaram que a calagem superficial sem resíduo vegetal aumentou o pH e o teor de Ca e diminuiu o teor de Al apenas na camada de 0 a 5 cm, demonstrando a baixa mobilidade do carbonato na ausência de íons inorgânicos e orgânicos. No entanto, quando a calagem foi associada à aplicação dos extratos de aveia (*Avena strigosa* Schrebe) e nabo (*Raphanus sativus* L.), o pH e o teor de Ca aumentou, e o teor de Al diminuiu até aproximadamente 20 cm de profundidade.

Existe, entretanto, variação do efeito neutralizante da acidez pela aplicação de diferentes resíduos vegetais (LOPES et al., 2004). A aplicação do calcário, na superfície do solo, associada ao manejo dos resíduos vegetais de crotalaria juncea (*Crotalaria juncea* L.), capim moa (*Setaria incana* L.) e pé-de galinha gigante (*Eleusine gracilis* Salisb), proporcionou diminuição da acidez potencial (H+Al) e aumento do pH do solo na camada de 10-20 cm, por outro lado, os resíduos vegetais de milheto (*Pennisetum glaucum* L.) e mucuna anã (*Mucuna deeringiana*) não alteraram as condições iniciais de H+Al e pH do solo nesta camada (ANDREOTTI et al., 2008). Desta forma, deve-se conhecer a espécie vegetal a ser utilizada no programa de rotação de culturas, quanto à sua produção de matéria seca e tempo de decomposição, pois, são fatores que, irão interferir diretamente na qualidade e quantidade de palha sobre o solo (ANDREOTTI et al., 2008).

A formação de complexos organo-metálicos hidrossolúveis tem sido o principal mecanismo sugerido para a movimentação de Ca^{2+} e Mg^{2+} após a aplicação de calcário e com resíduos vegetais no solo. A permanência de resíduos vegetais na superfície e a ausência de revolvimento do solo reduzem a taxa de decomposição dos ligantes orgânicos por microorganismos. Os ligantes orgânicos complexam o cálcio trocável do solo, formando complexos CaL^0 ou CaL^- e a alteração da carga do Ca^{2+} facilita sua mobilidade no solo. Na camada subsuperficial, o cálcio dos complexos Ca-orgânicos é deslocado pelo Al trocável do solo, porque os íons Al^{3+} formam complexos mais estáveis que Ca^{2+} , diminuindo a acidez trocável e aumentando o cálcio trocável. Reações semelhantes também ocorrem para o Mg (CAIRES et al., 2008a).

Todavia, Caires et al. (2006) e Caires et al. (2008c) verificaram que o resíduo de aveia preta (*Avena strigosa* Schrebe) mantido na superfície do solo em SSD não ocasionou benefícios à ação da calagem superficial na correção da acidez de camadas do subsolo. A provável explicação para essa discordância de resultados, de acordo com os autores, está relacionada com a pequena quantidade de resíduos vegetais obtida nos estudos. Além disso, deve-se considerar que a reação da fração hidrossolúvel de resíduos vegetais no solo é rápida, e seus efeitos sobre a química do solo se reduz pelo processo de decomposição microbiana (FRANCHINI et al., 1999). Deve-se considerar, também, que o cultivo de plantas leguminosas e o uso de fontes inorgânicas de N na rotação de culturas podem acidificar o solo com o tempo e anular o efeito das plantas de cobertura na neutralização da acidez do solo (CAIRES et al., 2006).

Outro mecanismo relacionado com a amenização da acidez do solo em subsuperfície por meio da calagem superficial em SSD é a movimentação vertical de partículas finas de calcário decorrente de condições favoráveis de estruturação do solo, por canais formados por raízes mortas e insetos, mantidos intactos em razão da ausência de preparo do solo (PAVAN, 1994), e o arrastamento de partículas finas de calcário pela água de infiltração nos macrocanais biológicos, ou incorporação biológica do calcário pela ação da macrofauna do solo, como minhocas e outros insetos. Entretanto, devido à baixa solubilidade do calcário e a grande necessidade de corrigir a acidez do solo em subsuperfície, essas contribuições podem ser pequenas (RHEINHEIMER et al., 2000).

Um fator importante a considerar no sucesso da calagem é a qualidade do corretivo utilizado. Algumas características devem ser observadas,

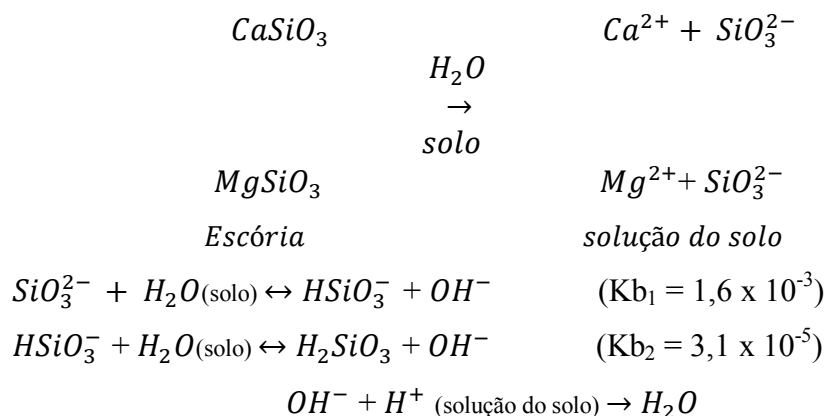
principalmente quanto às suas características químicas e físicas, ou seja, o grau de moagem do material. Estas características podem influenciar a velocidade de correção do solo. No Brasil, o material mais utilizado como corretivo é o calcário, entretanto, a utilização de resíduos siderúrgicos para a mesma finalidade pode ser uma opção viável.

4.3 Escórias de siderurgia como corretivos da acidez do solo

As escórias de siderurgia do ferro ou do aço são originárias do processamento em altas temperaturas, geralmente acima de 1400 °C, da reação do calcário com a sílica (SiO_2), presente no minério de ferro. O parque siderúrgico nacional é composto por 28 usinas, distribuídas, principalmente, nos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro, Espírito Santo e São Paulo (MARAFON e ENDRES, 2011), produzindo anualmente cerca 6,25 milhões de toneladas de escória, todavia, o aproveitamento agrícola destes resíduos no Brasil ainda é pequeno. Em razão da grande quantidade produzida e da falta de destinação para as escórias, o seu acúmulo tem-se tornado um sério problema ambiental, pela possibilidade de lixiviação de compostos químicos, ocasionada por exposição às chuvas, podendo ocorrer contaminação do lençol freático (PREZOTTI e MARTINS, 2012).

O uso de resíduos da indústria siderúrgica na agricultura, como as escórias de alto forno e aciaria, vem demonstrando que suas aplicações de forma adequada traz em benefícios sobre os atributos químicos do solo, como a elevação do pH, em razão da presença de agente neutralizante da acidez SiO_3^{2-} (ALCARDE, 1992), aumento da saturação por bases (V%) (BRASSIOLI et al., 2009), aumento do teor de fósforo (P) pela competição dos íons SiO_3^{2-} pelos mesmos sítios de adsorção do fosfato, liberando o P adsorvido para a solução do solo (PRADO e FERNANDES, 2001), além de serem fontes de micronutrientes (PRADO et al., 2001) e silício (SOUZA e KORNDÖRFER, 2010), aspectos que favorecem o aumento da produtividade das culturas (CARVALHO-PUPATTO et al., 2004).

Segundo Alcarde e Rodella (2003), os silicatos apresentam ação neutralizante por meio da sua base SiO_3^{2-} que reage com a água e libera íons OH^- , conforme as seguintes equações:



A ação neutralizante da escória é muito semelhante à do calcário, pois, a base SiO_3^{2-} também é fraca ($Kb_1 = 1,6 \times 10^{-3}$), mas é mais forte que a base CO_3^{2-} ($Kb_1 = 2,2 \times 10^{-4}$).

Avalhães (2010) verificaram similaridade na correção da acidez do solo da escória de siderurgia em relação ao calcário, incorporados na camada de 0-20 cm em pré-plantio da cana-de-açúcar. Em SSD, a aplicação superficial de escória de aciaria permitiu a correção da acidez do solo, o deslocamento do Ca^{2+} , o aumento da saturação por bases e a redução do Al^{3+} até 40 cm, o que refletiu na maior produtividade da soja, enquanto o calcário atingiu apenas 20 cm de profundidade do solo (CORRÊA et al., 2009a).

Em SSD já estabelecido, a aplicação da escória corrigiu a acidez do solo e elevou os teores de Ca trocável até a camada de 20 cm, aos 34 meses após aplicação, enquanto que a utilização de calcário limitou-se a correção da camada de 5 cm, e os maiores teores de Ca até a camada de 10 cm (SILVA, 2009). Entretanto, em alguns casos verifica-se reação mais lenta da escória em comparação ao calcário como observado por Prado e Fernandes (2000) que verificaram que a eficiência da escória baseada no poder de neutralização adotado para o calcário não apresentou comportamento satisfatório para estimar a necessidade de produto para a correção da acidez. A divergência dos resultados entre as escórias pode ser atribuída à sua composição química, embora os silicatos tenham maior solubilidade, o processo industrial promove a obtenção de vários tipos de escórias, com recristalização diferente em função da quantidade de Ca, Mg e do tempo de resfriamento, podendo reduzir sua solubilidade (PEREIRA et al., 2010a).

A composição química das escórias é influenciada pela variação na composição química do minério de ferro utilizado como matéria prima em uma

indústria siderúrgica, tipo de refratário usado nas paredes do forno e o tipo de resfriamento do material no momento de saída do forno (PRADO et al., 2001), além da presença de impurezas, como o Al (ANDO et al., 1998) e contaminantes como micronutrientes metálicos, cuja presença podem interferir nos resultados da determinação do poder de neutralização (PN) das escórias (PIAU, 1995).

Considerando que a aplicação de calcário sem incorporação pode ter sua ação limitada às camadas superficiais do solo, principalmente nos primeiros anos de cultivo, a utilização de escórias no SSD pode ser uma alternativa interessante no processo de correção de acidez do solo, visto que podem apresentar maior solubilidade que o calcário, promovendo, dessa forma, efeito corretivo em profundidade e em menor tempo.

Além disso, a escória libera silício no solo, que poderá trazer benefícios às plantas tais como: a redução de doenças foliares, melhora no controle de pragas, aumento na capacidade fotossintética devido o silício beneficiar a arquitetura da planta, deixando as folhas mais eretas (DEREN et al., 1994; KORNDÖRFER et al., 2003) e melhoria no aproveitamento da água pela planta (AGARIE et al., 1998). O Si também pode influenciar a absorção e translocação de vários macro e micronutrientes e aumentar a tolerância da planta ao excesso de Mn e Fe (TAVAKKOLI et al., 2011) e Zn, Al e Cd (LIANG et al., 2007).

Fonseca et al. (2007) observaram correções da acidez do solo similares proporcionadas pela escória de siderurgia e calcário, no entanto, a aplicação da escória promoveu incremento no teor de silício disponível no solo oito vezes mais que o calcário. A aplicação superficial de escória após dois anos mostrou efeito residual para os aspectos de correção da acidez do solo e para o teor de silício com reflexos até a camada de 20 cm (FARIA et al., 2008).

Embora estudos tenham demonstrado eficiência destes resíduos na agricultura, ainda se dispõe de poucos resultados experimentais sobre o uso de diferentes escórias de siderurgia com aplicação sem incorporação em SSD.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Localização e Caracterização da Área Experimental

O estudo foi desenvolvido no período de outubro de 2010 a outubro de 2013 na Fazenda Experimental Lageado, que pertence à Faculdade de Ciências Agrônômicas – FCA / UNESP, localizada no município de Botucatu, SP, na região Centro-Oeste do Estado (22°51'15"S, 48°26'30"W e altitude de 740 m). Segundo a classificação climática de Köppen, o clima predominante na região é do tipo Cwa, caracterizado pelo clima tropical de altitude, com inverno seco e verão quente e chuvoso.

Por ocasião da instalação do experimento, o local encontrava-se em pousio por 20 anos e a cobertura vegetal predominante era capim brachiaria (*Brachiaria decumbens*). Apresentava uma cobertura em massa seca de 6,6 Mg ha⁻¹ de brachiaria contendo no seu tecido vegetal os seguintes teores de nutrientes 10; 1; 11; 7; 3,6; 1,3; de N, P, K, Ca, Mg, S (g kg⁻¹) e 3; 4; 393; 220 e 22 de B, Cu, Fe, Mn, Zn (mg kg⁻¹), respectivamente.

O trabalho foi desenvolvido em Latossolo Vermelho distrófico (EMBRAPA, 2013), caracterizado quimicamente, antes da instalação do experimento. Para tanto foram coletados 15 amostras em pontos aleatórios da área experimental (subamostra) a fim de obter uma amostra composta de solo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, com a utilização de um trado tipo sonda.

A análise química foi realizada segundo a metodologia proposta por Raij et al. (2001) (Tabela 1). A caracterização física do solo foi realizada determinando-se a composição granulométrica do solo de acordo com a metodologia da Embrapa (1997) até a profundidade de 20 cm, que constou de 332 g kg⁻¹ de areia, 200 g kg⁻¹ de silte e 468 g kg⁻¹ de argila.

Tabela 1. Caracterização química inicial do solo.

Atributos químicos	Camadas (cm)				
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-20
P resina (mg dm ⁻³)	8	7	4	4	6
M.O (g dm ⁻³)	34	31	30	24	32
pH (CaCl ₂)	4,3	4,1	4,1	4,1	4,2
K (mmol _c dm ⁻³)	1,8	1,2	1,1	0,6	1,4
Ca (mmol _c dm ⁻³)	11	09	10	10	10
Mg (mmol _c dm ⁻³)	9	6	5	3	7
H+Al (mmol _c dm ⁻³)	66	72	65	76	68
SB (mmol _c dm ⁻³)	22	16	16	14	18
CTC (mmol _c dm ⁻³)	88	88	81	90	86
V (%)	25	18	19	15	21
B (mg dm ⁻³)	0,29	0,34	0,32	0,30	0,32
Cu (mg dm ⁻³)	6,6	7,1	7,1	7,5	6,9
Fe (mg dm ⁻³)	46	50	44	34	47
Mn (mg dm ⁻³)	14,4	15,8	16,1	8,2	15,4
Zn (mg dm ⁻³)	1,0	0,9	0,8	0,6	0,9

Os dados climáticos referentes à precipitação pluvial, temperatura máxima e mínima durante a condução do experimento foram coletados na Estação Meteorológica da Fazenda Experimental Lageado, pertencente ao Departamento de Recursos Naturais - Setor de Climatologia, e estão apresentados na Figura 1.

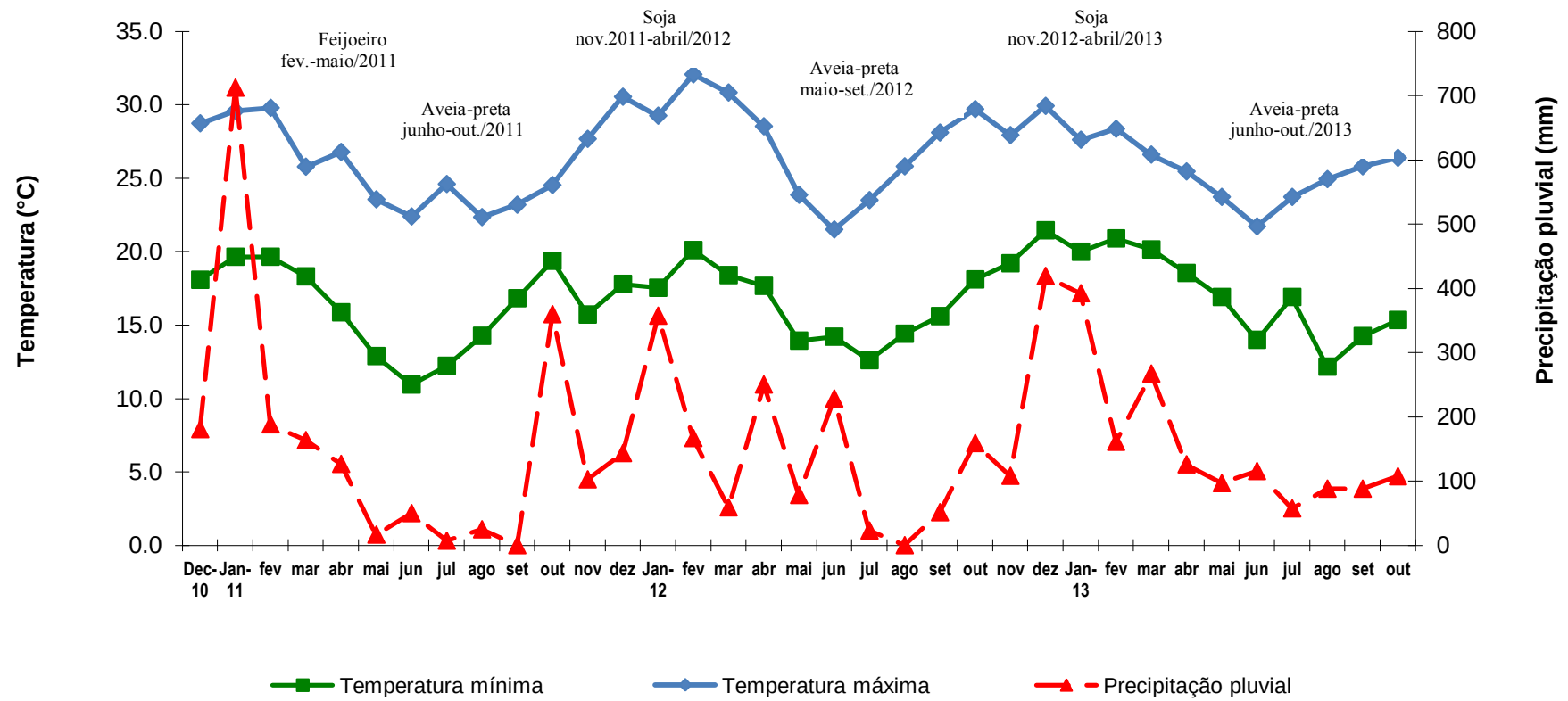


Figura 1. Precipitação pluvial acumulada mensal (mm) e temperaturas máxima e mínima (°C) registradas durante a condução do experimento, no período de dezembro de 2010 a outubro de 2013, Botucatu, SP.

5.2 Tratamentos e condução do experimento.

O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com parcelas subdivididas e quatro repetições. As parcelas principais constituíram-se nas formas de aplicação dos corretivos de acidez do solo, superficial ou incorporado, enquanto as subparcelas de 42 m² (6x7 m) constituíram-se dos materiais corretivos, agrosilício® (escória do aço inox) (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC) e calcário dolomítico (CD), além de uma testemunha (T) sem aplicação de corretivo.

A caracterização química e física dos corretivos (Tabela 2), foi realizada de acordo com a legislação brasileira de calcários (ALCARDE, 2009), o silício total foi determinado seguindo a metodologia proposta por Korndörfer et al. (2004).

Para o preparo da área, em outubro de 2010, realizou-se a retirada das plantas de brachiaria, roçando toda a área experimental. O excesso da palhada foi retirado com auxílio de um enleirador. Este procedimento foi realizado em razão da grande quantidade de brachiaria que havia na área, o que formou uma camada espessa de palhada que poderia prejudicar a aplicação dos corretivos em superfície.

A dose aplicada de cada corretivo foi calculada para elevar a saturação por bases inicial do solo ao valor de 70%, considerando-se a camada de 0-20 cm de profundidade de solo (Tabela 1). Para este cálculo, considerou-se o material na base seca, para tanto a umidade de cada material foi descontada (Tabela 2).

As parcelas referentes aos tratamentos com aplicação incorporada dos corretivos foram preparadas antes da aplicação dos corretivos, em dezembro de 2010 com uma aração e uma gradagem, no mesmo mês aplicou-se os corretivos de acidez do solo manualmente. Nos tratamentos com incorporação aplicou-se metade da dose de cada corretivo e procedeu-se à incorporação com enxada rotativa, em seguida aplicou-se a outra metade e incorporou novamente com enxada rotativa.

Após a aplicação dos corretivos de acidez estabeleceu-se o sistema de semeadura direta em ambos os modos de aplicação.

Tabela 2. Caracterização química e física dos corretivos de acidez do solo.

Corretivos *	CaO	MgO	Peneiras (ABNT n°) ⁽¹⁾			RE ⁽²⁾	PN ⁽³⁾	PRNT	Mg	P ₂ O ₅	K ₂ O	Ca
			10	20	50							
	%	%	% partículas passantes									
AG	37,65	9,55	91,4	77,7	53,5	71	84	60	16,1	3,5	0,3	256
EA	28,13	6,10	99,9	80,0	47,9	71	70	50	15,6	11,0	0,3	216
EAF	26,63	8,00	54,0	17,4	4,4	19	65	13	15,9	1,5	5,9	204
EFP	36,10	5,76	99,6	97,4	52,9	80	77	62	15,6	2,5	0,3	274
W	30,00	3,00	100,0	100,0	100,0	100	60	60	13,1	1,5	0,1	262
CDC	38,39	23,63	100,0	99,9	95,9	98	120	119	16,6	2,5	0,8	244
CD	27,75	16,40	99,7	86,9	58,1	75	88	67	16,0	3,5	0,2	275
Corretivos *	Si	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Cd	Ni	Pb	Cr	Hg	Umidade
	%	-----mg kg ⁻¹ -----										%
AG	13,6	300	20	38.000	5.300	50	3,1	53,6	12,6	990,0	< 0,1	3,10
EA	14,2	900	30	193.500	21.500	70	14,5	3,0	< 0,5	941,0	< 0,1	0,75
EAF	15,0	200	20	17.400	51.000	50	1,8	1,4	< 0,5	104,0	< 0,1	0,10
EFP	21,6	300	20	28.600	3.700	50	1,6	1,1	< 0,5	126,1	< 0,1	0,46
W	16,0	100	10	600	100	40	< 0,03	0,3	< 0,5	0,5	< 0,1	0,00
CDC	3,9	100	50	2.300	100	90	< 0,03	0,8	< 0,5	1,7	< 0,1	5,50
CD	9,7	400	20	36.800	4.800	50	3,2	59,0	12,9	1019,8	< 0,1	16,90

* agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC) e calcário dolomítico (CD).

⁽¹⁾ABNT n° 10= fração superior a 2,00 mm; ABNT n° 20= fração de 2,00 - 0,84 mm; ABNT n° 50= fração de 0,84 - 0,30 mm; fundo (ABNT n° <50)= fração inferior a 0,30 mm; ⁽²⁾RE= reatividade, expressa o percentual do corretivo que reage em três meses; ⁽³⁾PN= poder neutralizante, expressa o potencial químico do corretivo, em equivalente de CaCO₃.

Considerando a dose aplicada e o teor de silício total de cada material corretivo, verificou-se que a quantidade de silício total fornecida com a aplicação dos materiais corretivos foi de 1,0 Mg ha⁻¹ com agrosilício, 1,3 Mg ha⁻¹ com escória de aciaria, 5,2 Mg ha⁻¹ com escória de alto forno, 1,6 Mg ha⁻¹ com escória de forno de panela, 1,2 Mg ha⁻¹ com wollastonita, 0,15 Mg ha⁻¹ com calcário dolomítico e 0,66 Mg ha⁻¹ com calcário dolomítico calcinado.

Em fevereiro de 2011 foi semeado o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*) cultivar Pérola em espaçamento de 0,45 m e com 14 sementes por metro. As sementes foram tratadas com fungicida carboxina (carboxanilida) + tiram (dimetilditiocarbamato) (60 g i.a. por 100 kg de sementes) e inseticida imidacloprid (neonicotinóide) (15 g i.a. por 100 kg de sementes).

A adubação de semeadura foi calculada de acordo com as características químicas iniciais do solo na camada de 0-20 cm (Tabela 1) e levando-se em consideração as recomendações de Raij et al. (1996) para a cultura do feijoeiro e constou da aplicação de 250 kg ha⁻¹ da fórmula 08-28-16 (N-P₂O₅-K₂O) e 40 kg ha⁻¹ de superfosfato triplo com 41% de P₂O₅. A adubação de cobertura realizada aos 27 dias após emergência das plântulas constou da aplicação de 90 kg ha⁻¹ de N, utilizando-se como fonte o sulfato de amônio.

Durante o desenvolvimento da cultura foram realizadas duas pulverizações, aos 9 e 23 dias após emergência das plântulas, com inseticida sistêmico imidacloprid (175 g ha⁻¹ do i.a) para o controle de mosca branca (*Bemisia tabaci*). Devido à presença de vaquinha (*Diabrotica speciosa*) realizou-se uma pulverização, aos 36 dias após emergência das plântulas, com inseticida de contato/ingestão lambda-cialotrina (10 g ha⁻¹ do i.a). Também foram realizadas duas pulverizações com fungicida sistêmico e de contato, aos 60 e 68 dias após emergência das plantas com clorotalonil + tiofanato metílico (1.000 + 400 g ha⁻¹ do i.a) para o controle de mancha de alternaria (*Alternaria alternata*).

O controle das plantas daninhas que surgiram na área foi feito através de aplicações do herbicida fluazifope-p-butilico + fomesafen (160 + 200 g.ha⁻¹ do i.a.) aos 29 e 60 dias após emergência das plântulas de feijoeiro. Em maio de 2011 realizou-se a colheita do feijoeiro. Após o cultivo do feijoeiro o experimento foi conduzido em sistema de sucessão de culturas, sendo cultivada aveia preta no inverno e soja no verão.

A aveia preta cultivar Comum foi semeada com o espaçamento de 17 cm entre linhas, e 350 sementes por m² nos anos de 2011 (mês de junho), 2012 (mês de maio) e 2013 (mês de junho), para cobertura do solo durante o período de inverno. Sempre antecedendo a sua semeadura realizou-se uma pulverização com herbicida a base de glifosato na dose de 792,5 g ha⁻¹ do i.a. para dessecação de brachiaria e outras plantas daninhas da área.

A adubação de cobertura realizada aos 30 dias após emergência das plântulas constou da aplicação de 40 kg ha⁻¹ de N, utilizando-se como fonte o sulfato de amônio. Devido ao aparecimento de sintomas visuais de deficiência de potássio nas plantas de aveia durante o cultivo do ano de 2013 realizou-se a aplicação de 40 kg ha⁻¹ de K₂O usando como fonte o cloreto de potássio, com 60% de K₂O, aos 16 dias após a emergência das plântulas de aveia preta.

Durante o cultivo das plantas de aveia preta não foi necessário o controle de plantas daninhas, pragas e doenças. No final do ciclo da aveia preta, em outubro de 2011, setembro de 2012 e outubro de 2013 as plantas foram dessecadas com herbicida a base de glifosato na dose de 792,5 g ha⁻¹ do i.a., sendo em seguida passado o triturator horizontal na área.

A soja cultivar 5D688 de ciclo semi precoce, crescimento determinado foi semeada em novembro de 2011 e 2012, com espaçamento entre linhas de 0,45 m. Utilizou-se uma densidade de semeadura de, aproximadamente, 18 e 22 sementes m⁻¹, respectivamente. As sementes foram tratadas com fungicida carboxina (carboxanilida) + tiram (dimetilditiocarbamato) (60 g i.a. por 100 kg de sementes) e inseticida tiametoxam (105 g i.a. por 100 kg de sementes) e inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* por meio de inoculante líquido. Utilizou-se 60 ml de inoculante por 50 kg de sementes. A operação de mistura entre o inoculante e as sementes deu-se no mesmo dia da semeadura, por meio do emprego de betoneira e secagem à sombra por alguns minutos.

Na adubação de semeadura foram aplicados 300 kg ha⁻¹ do formulado 04-20-20 (N-P₂O₅-K₂O) e 65 kg ha⁻¹ de super triplo com 41% de P₂O₅.

No primeiro cultivo da cultura da soja no verão de 2011/2012 foram realizadas pulverizações aos 22 e 100 dias após a emergência das plântulas, com o inseticida tiametoxam + lambda cialotrina (21,5 + 15,9 g do i.a ha⁻¹) e aos 110 dias com a aplicação do inseticida acefato (300 g do i.a ha⁻¹). Para prevenção da ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) realizaram-se pulverizações aos 70 e 100 dias após a

emergência das plântulas, aplicando-se o fungicida epoxiconazol + piraclostrobina (30 + 79,8 g do i.a ha⁻¹). Devido ao aparecimento do mofo branco (*Sclerotinia sclerotiorum*) foram necessárias pulverizações com o fungicida procimidona (500 g do i.a ha⁻¹), aos 100 e 110 dias após a emergência das plântulas.

No segundo cultivo da soja, no verão de 2012/2013 foram realizadas aos 44, 85 e 107 dias após a emergência das plântulas pulverizações com o inseticida tiametoxam + lambda cialotrina (21,5 + 15,9 g do i.a ha⁻¹). Para prevenção da ferrugem asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) realizou-se pulverizações, aos 85 e 107 dias após a emergência das plântulas, aplicando-se o fungicida epoxiconazol + piraclostrobina (30 + 79,8 g do i.a ha⁻¹).

A colheita da soja foi realizada com colhedora mecânica de parcelas para experimento aos 130 e 127 dias após a emergência das plântulas de soja no verão de 2011/2012 e no verão de 2012/2013, respectivamente.

5.4 Amostragens e avaliações realizadas

5.4.1 Avaliações do solo

5.4.1.1. Análise química

Após 2, 12 e 23 meses da aplicação dos corretivos de acidez do solo realizaram-se amostragens de solo para caracterização química. Para tanto foram coletadas quatro subamostras por subparcela para constituir uma amostra composta nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20- 40 cm, utilizando-se de trado tipo sonda. Foram determinados nestas amostras o pH em CaCl₂, os teores M.O., P, H+Al, Ca, Mg, K, Cu, Fe, Mn, Zn e B, a partir dos resultados foram calculados os valores de SB, CTC e V%, conforme descrito por Raij et al. (2001).

Os teores de metais pesados, Ni, Cd, Cr, Pb e Hg, foram determinados na camada de 0-20 cm. Para tanto, amostras de solo coletadas nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm foram homogeneizadas em quantidade proporcional para compor a amostra de 0-20 cm. A extração foi realizada com DTPA, seguindo a mesma metodologia para micronutrientes catiônicos, proposta por Raij et al. (2001). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro de emissão em plasma induzida em argônio (ICP/AES), para as amostras coletadas após dois meses da aplicação dos corretivos, e em espectrofotômetro de emissão óptica com plasma acoplado

indutivamente, para as amostras coletadas após 12 e 23 meses da aplicação dos corretivos.

Determinou-se o teor de silício (Si) no solo com o extrator CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ seguindo a metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004) modificando a velocidade de agitação de 50 rpm para 220 rpm.

5.4.1.2 Avaliação de extratores químicos de silício no solo

Após 23 meses da aplicação dos tratamentos foram coletadas quatro subamostras por subparcela para constituir uma amostra composta na camada de 0-20 cm de profundidade. As mesmas foram enviadas à University of New England, Austrália para a realização de estudos com extratores de silício. Utilizaram-se três extratores de silício, a resina de troca aniônica, o CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ e o ácido acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$.

Utilizou-se resina de troca aniônica (positivamente carregada) na forma de lâminas saturadas com NaHCO_3 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$. Foi agitado 0,5 gramas de solo com 10 mL de água, juntamente com a lâminas de resina com $2,5 \times 6 \text{ cm}$ por 16 horas a 33 rpm. Depois desse período as lâminas de resina foram retiradas e lavadas com água destilada para a retirada de terra. Em seguida foram colocadas em um tubo com 15 mL de NaCl $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, deixando-se por repouso durante 90 minutos e depois foi agitado por 30 minutos a 33 rpm.

Para a extração com ácido acético agitou dois gramas de solo com 20 mL de ácido acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ por 1 hora a 50 rpm (SNYDER, 2001). A extração com CaCl_2 foi realizada com dois gramas de solo agitados com 20 mL de solução CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ à 17 rpm por 16 horas (HAYSOM e CHAPMAN, 1975). Todas as leituras foram realizadas por colorimetria.

Os resultados obtidos com os extratores de silício no solo foram correlacionados com o teor de silício obtido nas plantas de soja (verão 2012/2013), com uso da análise de correlação linear simples de Pearson.

5.4.1.3 Características físicas do solo: densidade do solo, macroporosidade, microporosidade e porosidade total

Aos 34 meses após a calagem foram coletadas amostras indeformadas do solo para determinação de seus atributos físicos, nas camadas de 0-5 cm e 5-10 cm, por meio de anéis volumétricos. As amostras foram retiradas em três pontos aleatórios dentro de cada subparcela, sempre nas entrelinhas da soja.

As determinações físicas do solo foram realizadas de acordo com a Embrapa (1997) sendo: densidade do solo e porosidade total, pelo método do anel volumétrico; microporosidade, pelo método da mesa de tensão com coluna de água de 0,60 m; e a macroporosidade foi calculada por diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

5.4.2 Avaliações na cultura do feijoeiro

5.4.2.1 Diagnose foliar de nutrientes, de silício e de metais pesados

Na ocasião do florescimento pleno das plantas de feijão, foram coletadas as 3^{as} folhas com pecíolos, tomadas no terço médio de 10 plantas por unidade experimental, para determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, B e Zn, segundo a metodologia descrita por Malavolta et al. (1997) e do teor de silício determinado de acordo com a metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004).

Os metais pesados, Ni, Cd, Cr, Pb e Hg foram determinados através de digestão nitro-perclórica, seguindo metodologia proposta por Malavolta et al. (1997). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro de emissão em plasma induzida em argônio (ICP/AES).

5.4.2.2 Componentes da produção e produtividade de grãos

A quantificação da população final de plantas foi realizada na véspera da colheita, 82 dias após a emergência das plântulas. Considerou-se duas fileiras dentro da área útil de cada subparcela, com comprimento de 5 m, sendo os resultados estimados em plantas ha⁻¹.

O número de vagens por planta foi determinado mediante a contagem do número total de vagens com pelo menos um grão por planta, avaliado em 10 plantas coletadas dentro da área útil de cada subparcela. O número de grãos por vagem foi determinado mediante a relação entre número total de grãos e o número total

de vagens, avaliados em 10 plantas coletadas dentro da área útil de cada área experimental.

Determinou-se a massa de 100 grãos mediante a pesagem de quatro amostras, de 100 grãos cada uma, em cada unidade experimental. Os dados obtidos foram corrigidos para 13% de umidade (base úmida).

Para determinação da produtividade de grãos colheu-se, manualmente as plantas contidas em duas fileiras de 5 m de comprimento na área útil de cada unidade experimental. As plantas, após serem arrancadas, foram secadas ao sol e, posteriormente trilhadas mecanicamente. Os grãos, após abanação, foram pesados e posteriormente foi calculada a produtividade em Mg ha^{-1} , corrigida para 13% de umidade (base úmida).

5.4.3 Avaliações na cultura da aveia-preta (Inverno 2011, 2012 e 2013)

5.4.3.1 Matéria seca da parte aérea

No final do ciclo da aveia preta, aos 108; 115 e 118 dias após a emergência das plântulas, nos anos de 2011, 2012 e 2013, respectivamente, foram coletadas todas as plantas presentes em uma área de $0,25 \text{ m}^2$ que foram submetidas à lavagem com água destilada, sendo posteriormente colocadas para secagem em estufa de ventilação forçada de ar a 65°C por 72 horas e pesadas para quantificação da produção da matéria seca da parte aérea.

5.4.3.2 Diagnose foliar de nutrientes, de silício e de metais pesados

O material utilizado para determinação da matéria seca foi submetido à moagem e digestão para determinação dos teores de N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, B e Zn, segundo a metodologia descrita por Malavolta et al. (1997), enquanto que o silício foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004).

Os teores dos metais pesados, Ni, Cd, Cr e Pb, foram determinados por digestão nitro-perclórica, seguindo metodologia proposta por Malavolta et al. (1997). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente.

5.4.3.3 Componentes da produção e produtividade de grãos

Para avaliar o número de panículas por m^2 foram coletadas todas as plantas presentes em uma área de $0,25 m^2$ por subparcela. O número de sementes por panícula foi determinado mediante a relação entre número total de sementes e o número total de panículas, avaliados em uma área de $0,25 m^2$ por subparcela.

O peso de 100 sementes foi determinado mediante a pesagem de quatro amostras, de 100 grãos cada uma, em cada subparcela. Os dados obtidos foram corrigidos para 13% de umidade (base úmida).

Os grãos referentes às plantas coletadas em uma área de $0,25 m^2$ por unidade experimental foram pesadas e posteriormente calculou-se a produtividade em $Mg ha^{-1}$, corrigida para 13% de umidade (base úmida).

5.4.4. Avaliações na cultura da soja (Verão 2011/2012 e 2012/2013)

5.4.4.1 Diagnose foliar de nutrientes, de silício e de metais pesados

As amostras de folhas foram coletadas no período de florescimento pleno da soja, correspondente ao estágio R2, coletando-se o terceiro ou o quarto trifólio com pecíolo, a partir do ápice da planta, sem deformações ou ataques de pragas e doenças (MALAVOLTA et al., 1997). Coletaram-se 20 folhas por subparcela para determinação dos teores N, P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, B e Zn, segundo a metodologia descrita por Malavolta et al. (1997), enquanto que o teor de Si foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004).

Os teores de metais pesados, Ni, Cd, Cr, Pb e Hg foram determinados através de digestão nitro-perclórica, seguindo metodologia proposta por Malavolta et al. (1997). As leituras foram realizadas em espectrofotômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente.

5.4.4.2 Componentes da produção e produtividade de grãos

O número de vagens por planta foi determinado mediante a contagem do número total de vagens com pelo menos um grão por planta, avaliado em 10 plantas coletadas dentro da área útil de cada área experimental. O número de grãos

por vagem foi determinado mediante a relação entre número total de grãos e o número total de vagens.

Para determinação da massa de 100 grãos pesou-se quatro amostras, de 100 grãos cada uma, em cada unidade experimental. Os dados obtidos foram corrigidos para 13% de umidade (base úmida).

A contagem da população final de plantas foi realizada no dia da colheita, considerando duas fileiras dentro da área útil de cada subparcela, com comprimento de 2 m, sendo os resultados convertidos em plantas ha^{-1} . A colheita da soja foi realizada em abril de 2012 e 2013, correspondendo a 129 e 126 dias após a emergência das plântulas, respectivamente. Utilizou-se uma colhedora mecânica de parcelas para experimento, coletando-se três linhas com 7m de comprimento por subparcela. Os grãos foram pesados e posteriormente calculou-se a produtividade em Mg ha^{-1} , corrigida para 13% de umidade (base úmida).

5.5 Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância e quando significativos foram comparados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. A eficiência dos extratores de Si foi avaliada por análise de correlação linear simples de Pearson. Para as análises estatísticas utilizou-se o programa estatístico SISVAR.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Atributos químicos do solo

Não houve diferença entre o modo de aplicação dos corretivos sobre os valores de pH (Tabela 3). A ausência de diferença entre o modo de aplicação dos corretivos indica que, tanto os corretivos aplicados com incorporação, como aplicados superficialmente apresentaram movimentação no perfil do solo até a profundidade de 10 cm, pois, atingiram valores de pH superiores ao tratamento testemunha, chegando à valores 5,5 e 5,0 na camada de 0- 5 cm e 5-10 cm, respectivamente, aos 12 meses com a aplicação superficial (Tabela 3).

A pequena mobilização que ocorreu na linha de semeadura durante a semeadura do feijoeiro e da aveia preta pode ter possibilitado a incorporação dos corretivos na profundidade de semeadura, e, auxiliado a movimentação descendente das partículas dos corretivos para a camada de 5-10 cm. A semeadura pode acelerar o efeito da calagem, sendo, mais acentuado em solos que receberam altas doses de corretivo, podendo alcançar a profundidade de 20 cm (FLOWER e CRABTREE, 2011).

Os resultados obtidos diferem dos observados em outros estudos com aplicação incorporada e superficial de calcário, que verificaram maior eficiência da aplicação incorporada (ALLEONI et al., 2005; CAIRES et al., 2003). Também Kaminski et al. (2005) verificaram que a incorporação do calcário antes do início da implantação SPD neutralizou a acidez em maiores profundidades quando comparados à superficial.

Tabela 3. Valores de pH em CaCl_2 do solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos Aplicação (A)	2 meses				12 meses				23 meses			
					Camadas (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
	pH CaCl_2											
Incorporada	5,3 a	5,2 a	4,9 a	4,6 a	5,2 a	5,2 a	4,8 a	4,6 a	4,8	5,2	4,7 a	4,4 a
Superfície	5,5 a	4,9 a	4,7 a	4,5 a	5,5 a	5,0 a	4,6 a	4,7 a	5,3	4,8	4,5 a	4,4 a
F	1,6 ^{ns}	2,1 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,6 ^{ns}	1,3 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,2 ^{ns}	8,6 ^{ns}	5,4 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,3 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	5,3 bc	5,0 bc	4,8 ab	4,6 ab	5,6 ab	5,3 ab	4,7 bc	4,8 ab	5,0	5,0	4,6 ab	4,4 ab
EA	5,2 c	4,9 bc	4,8 ab	4,5 ab	5,2 b	5,0 bc	4,6 bcd	4,6 abc	5,6	5,2	4,6 ab	4,4 ab
EAF	4,7 d	4,5 c	4,5 b	4,4 ab	4,5 c	4,4 cd	4,4 cd	4,4 bc	4,5	4,6	4,3 bc	4,3 ab
EFP	5,6 bc	5,1 ab	4,9 ab	4,7 a	5,6 ab	5,2 ab	4,8 abc	4,8 ab	5,2	5,1	4,7 a	4,4 ab
W	5,8 ab	5,4 ab	4,8 ab	4,7 a	6,0 a	5,7 a	5,2 a	5,0 a	5,3	5,6	4,8 a	4,6 a
CDC	6,2 a	5,7 a	5,1 a	4,7 a	5,8 a	5,7 a	4,8 abc	4,9 a	5,5	5,1	4,6 ab	4,3 ab
CD	5,8 ab	5,3 ab	5,1 a	4,7 a	5,7 a	5,5 ab	4,9 ab	4,9 a	5,5	5,3	4,8 a	4,6 a
T	4,6 d	4,5 c	4,5 b	4,3 b	4,4 c	4,3 d	4,2 d	4,2 c	4,1	4,1	4,1 c	4,2 b
F	24,5**	9,8**	4,5**	3,2**	24,3**	17,1**	9,2**	7,7**	11,9**	9,7**	7,8**	2,9*
AxC	1,1 ^{ns}	1,3 ^{ns}	2,1 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,2 ^{ns}	0,7 ^{ns}	1,7 ^{ns}	1,1 ^{ns}	2,3*	3,2**	1,4 ^{ns}	0,8 ^{ns}
CV _{parcela} (%)	9,1	20,4	21,1	10,1	22,6	23,5	24,3	21,8	13,3	10,7	19,2	7,2
CV _{subparcela} (%)	5,9	7,6	6,3	5,4	6,4	7,0	5,9	5,8	8,7	8,7	5,4	5,0

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

A escória de alto forno não alterou o pH do solo nos períodos e camadas avaliadas. Resultado semelhante foi obtido por PEREIRA et al. (2010a) em que os autores avaliaram a reatividade de seis escórias de siderurgia, dentre elas duas escórias de alto forno e uma de aciaria, e verificaram baixa eficiência na correção da acidez do solo e liberação de Ca e Mg pelas escórias de alto forno, atribuindo o resultado à baixa solubilidade do material. Por outro lado Carvalho-Pupatto et al. (2004) obtiveram bons resultados na correção da acidez do solo com o uso de escória de alto forno, pois a escória utilizada por estes autores apresentava granulometria mais fina, o que proporcionou reação mais rápida.

A solubilidade dos ânions de silicatos aproximadamente sete vezes superior ao dos carbonatos (ALCARDE, 1992) não refletiu como esperado, em maior eficiência das escórias em relação aos calcários. O efeito dos corretivos na correção da acidez do solo variou no decorrer do tempo; aos dois meses após a aplicação dos corretivos a EA e o AG mostraram ação corretiva restrita aos 0-5 cm de profundidade enquanto a EFP e W atingiram as camadas de 0-5 e 5-10 cm, com efeito significativo também na camada de 20-40 cm, e os calcários elevaram os valores de pH do solo em todas as camadas. A escória forno de panela, a W, o CDC e o CD, apresentavam granulometria mais fina, que favoreceu o contato com o solo ácido, e com umidade adequada, estas partículas se dissolveram rapidamente, proporcionando os maiores valores de pH do solo no início do experimento, aos dois meses após a aplicação dos corretivos (Tabela 3).

Decorridos 12 meses da aplicação dos corretivos, exceto a EAF, os corretivos elevaram o valor de pH nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de modo semelhante. Nas camadas de 10-20 e 20-40 cm o aumento nos valores de pH foram observados com a aplicação do AG, EFP, W, CDC e CD.

Houve interação significativa aplicação x corretivos para os valores de pH nas camadas de 0-5 e 5-10 cm aos 23 meses após aplicação dos corretivos (Tabela 4). Os valores de pH foram superiores na camada de 0-5 cm com a aplicação em superfície de EA, W e CDC, em razão do acúmulo superficial desses corretivos. Todavia, a incorporação do AG, EA, EFP e CD distribuiu os corretivos no perfil do solo favorecendo a correção da acidez na camada de 5-10 cm de profundidade.

No período de 23 meses da aplicação incorporada e em superfície dos corretivos, os valores de pH do solo aumentou na camada de 20-40 cm

com a W e o CDC, enquanto o AG, EA, EFP e o CDC proporcionaram acréscimos no pH até a camada de 10-20 cm.

A escória de aciaria, o AG e a EFP não diferiram entre si sobre os valores de pH. Embora a EA apresentasse o mesmo valor de RE que o AG, esta possuía granulometria mais grosseira, com 20% de suas partículas entre 2,0-0,84 mm, que reagiram de forma mais lenta no solo. Aos dois meses a EA mostrou efeitos na correção da acidez do solo apenas na camada de 0-5 cm, atingindo a camada de 5-10 cm aos 12 meses e 10-20 cm aos 23 meses após aplicação. Isto permite inferir que a granulometria, bem como a composição química e a solubilidade desta escória podem ter interferido na correção da acidez do solo.

O efeito corretivo da EA no decorrer das avaliações mostra que esta escória continuou apresentando reação no solo. Efeito residual com aplicação de escória de aciaria foi relatado por Faria et al. (2008) que verificaram que a aplicação da escória promoveu melhorias nos atributos químicos relacionados com a correção da acidez do solo, com reflexos até a camada de 40 cm de profundidade após 720 dias da aplicação.

As escórias utilizadas no presente estudo não foram mais eficientes do que os calcários. Em um curto período de tempo após a implantação do SSD, os calcários mostraram-se mais eficientes na correção do pH, enquanto as escórias precisaram de um tempo maior. Por outro lado, estudos conduzidos por Castro e Crusciol (2013a) e Corrêa et al. (2007) evidenciaram efeito superior das escórias em relação aos calcários na neutralização da acidez em profundidade, observados aos 18 e 27 meses após aplicação superficial das escórias, respectivamente. A divergência dos resultados obtidos no presente estudo com os citados na literatura pode ser atribuída à composição química das escórias, pois, embora os silicatos tenham maior solubilidade, o processo industrial promove a obtenção de vários tipos de escórias com recristalização diferente em função da quantidade de Ca, Mg e do tempo de resfriamento, podendo reduzir sua solubilidade (PEREIRA et al., 2010a). Além disto, a presença de impurezas nas escórias pode influenciar a determinação do PN, superestimando-o, com consequente erro na determinação da dose a ser aplicada para corrigir a acidez do solo (PRADO e FERNANDES, 2000).

O aumento nos valores de pH nas camadas de 10-20 e 20-40 cm aos 12 e 23 meses após a aplicação de AG, EA, EFP, CDC e CD foram pequenos, mantendo valores de acidez ativa considerado alto (RAIJ et al., 1996), sendo a W o

único corretivo capaz de tornar a acidez em concentrações médias nas camadas de 10-20 e 20-40 cm aos 12 meses. Nível baixo de acidez somente foi alcançado com o CDC na camada de 0-5 cm logo aos dois meses, entretanto esse efeito não se manteve ao longo do tempo (Tabela 3).

Isto evidencia a dificuldade de correção da acidez do solo em maiores profundidades do solo, mesmo com a incorporação dos corretivos. De acordo com Rheinheimer et al. (2000), os efeitos da calagem só ocorrem em profundidade após o pH da zona de dissolução do calcário atingir valores de 5,2 a 5,5. Os ânions (OH^- e HCO_3^-) liberados pelo corretivo são consumidos pelos cátions de reação ácida (H^+ , Al^{3+} , Fe^{2+} , Mn^{2+}) e somente migram para camadas mais profundas com o pH na superfície em torno de 5,5.

Tabela 4. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para valores de pH em CaCl_2 nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade após 23 meses da aplicação dos corretivos.

Corretivos*	Aplicação			
	Incorporada	Superfície	Incorporada	Superfície
	0-5 cm		5-10 cm	
	pH CaCl_2			
AG	5,0 Aabc	5,1 Abcd	5,5 Aa	4,4 Bbc
EA	5,2 Bab	6,1 Aa	5,5 Aa	4,8 Bbc
EAF	4,3 Abc	4,6 Acd	4,5 Abc	4,6 Abc
EFP	5,0 Aab	5,3 Aabc	5,5 Aa	4,8 Bbc
W	4,9 Babc	5,7 Aab	5,3 Aab	5,9 Aa
CDC	4,8 Babc	6,1 Aa	5,1 Aab	5,1 Aab
CD	5,4 Aa	5,5 Aabc	5,7 Aa	5,0 Babc
T	4,0 Ac	4,2 Ad	4,1 Ac	4,0 Ac

*agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T). Letras maiúsculas distintas correspondem às comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo. Letras minúsculas distintas correspondem às comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo de aplicação pelo teste de Tukey $p > 0,05$.

Exceto a EAF, a aplicação dos corretivos, de modo geral, reduziu a acidez potencial do solo ($\text{H}^+\text{+Al}$), em todas as camadas, com exceção da camada de 20-40 cm aos 23 meses após aplicação dos corretivos (Tabela 5).

Tabela 5. Valores de acidez potencial (H+Al) (mmolc dm^{-3}) após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos Aplicação (A)	2 meses				12 meses				23 meses			
	Camadas (cm)											
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
H+Al (mmolc dm ⁻³)												
Incorporada	33 a	35 a	42 a	46 a	39 a	38 a	47 a	51 a	56 a	45 a	61 a	68 a
Superfície	34 a	48 a	51 a	52 a	33 a	45 a	56 a	49 a	48 a	63 a	77 a	68 a
F	0,3 ^{ns}	5,3 ^{ns}	1,6 ^{ns}	2,2 ^{ns}	0,7 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,1 ^{ns}	0,0 ^{ns}	2,4 ^{ns}	6,8 ^{ns}	1,9 ^{ns}	0,2 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	32 b	42 bc	48 ab	49 ab	28 b	33bc	49 bc	48 bc	48 bc	48 bc	65 b	68 a
EA	33 b	43 bc	46 ab	50 ab	35 b	45 b	56 ab	51 bc	31 c	45 bc	67 b	64 a
EAF	49 a	54 ab	54 a	55 ab	56 a	61 a	59 ab	61 ab	73 b	70 b	79 b	75 a
EFP	27 bc	36 c	41 b	44 b	27 b	36 bc	47 bc	45 c	46 bc	49 bc	64 b	63 a
W	26 bc	33 c	46 ab	46 ab	25 b	28 c	41 c	41 c	43 c	35 c	59 b	59 a
CDC	21 c	30 c	40 b	44 b	26 b	26 c	46 bc	41 c	35 c	38 c	57 b	72 a
CD	26 bc	37 c	40 b	46 ab	27 b	32 bc	48 bc	48 bc	38 c	40 bc	58 b	59 a
T	56 a	54 a	57 a	58 a	63 a	67 a	67 a	67 a	103 a	108 a	106 a	79 a
F	24,8**	9,6**	5,5**	3,0*	17,9**	19,2**	7,0**	8,3**	14,1**	12,4**	8,5**	1,7 ^{ns}
AxC	0,4 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,9 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,3 ^{ns}	1,0 ^{ns}	1,4 ^{ns}	1,2 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,7 ^{ns}	1,1 ^{ns}	0,4 ^{ns}
CV _{parcela} (%)	26,0	55,6	57,9	35,2	74,9	69,2	73,2	58,2	42,6	51,1	67,5	23,4
CV _{subparcela} (%)	20,6	22,2	16,7	17,8	27,6	23,9	17,4	18,1	34,6	36,0	22,6	23,4

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

A escória de alto forno mostrou-se ineficiente na correção da acidez do solo, constatado pelos baixos valores de pH e alta acidez potencial. Após 23 meses da aplicação dos corretivos, os valores de H+Al obtidos com a aplicação da EAF foram significativamente inferiores aos obtidos pelo tratamento testemunha, contudo, isto não indica que houve reação deste corretivo, pois, observa-se que o aumento dos valores de H+Al no decorrer do tempo, ocorreu tanto para a EAF como para o tratamento testemunha, todavia, a acidificação foi superior para a testemunha, o que provocou a diferença significativa entre esses dois tratamentos. A acidificação provavelmente está relacionada com a aplicação do sulfato de amônio, fertilizante de reação ácida, que, liberou íons H^+ na sua reação com o solo, assim como, a extração de bases pelas culturas.

A aplicação dos corretivos de acidez do solo elevou os valores de saturação por bases (V%) (Tabela 6). A dose de cada corretivo foi calculada afim de elevar a saturação por bases a 70% na camada de 0-20 cm, contudo, este valor só foi alcançado aos 12 meses após aplicação da W. Devido ao efeito tampão em solo argiloso, normalmente, verifica-se que, as doses estimadas pelo método de saturação por bases, não tem atingido os valores desejados (SILVA et al., 2008). Até mesmo em condições controladas (PRADO e NATALE, 2005). Prado e Natale (2004) verificaram que a aplicação de escória de siderurgia ferrocromo, até duas vezes a dose necessária para elevar a saturação por bases a 80%; resultou no valor de 66%. O mesmo também ocorre para os calcários onde Araújo et al. (2009) utilizando-se de calcários de diferentes graus de reatividade obtiveram valores de saturação por bases até 60 % quando a calagem fora calculada para atingir 80 %.

O valor de V% considerado adequado para a cultura da soja é de 60% na camada de 0-20 cm de solo (RAIJ et al., 1996). Considerando-se a média das camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm para os valores de V% (Tabela 6), ou seja, para a camada de 0-20 cm observa-se que aos dois meses após a aplicação de EFP, W, CDC e CD obteve-se valores de saturação por bases de 66, 60, 66 e 66%, respectivamente. Aos 12 meses com a aplicação de AG, EFP, W, CDC e CD, proporcionou valores de saturação por bases de 63, 64, 70, 65 e 67%, respectivamente. Mantendo-se valores adequados de V% para a cultura da soja após 23 meses da aplicação da W e do CD, com médias de 62 e 61%, respectivamente.

Tabela 6. Valores de saturação por bases (V%) após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos Aplicação (A)	2 meses				12 meses				23 meses			
					Camadas (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
	V%											
Incorporada	66 a	64 a	54 a	47 a	60 a	62	50 a	48 a	51 b	60	45 a	32 a
Superfície	68 a	51 a	41 a	38 a	73 a	58	41 a	51 a	67 a	49	33 a	33 a
F	0,3 ^{ns}	6,8 ^{ns}	4,0 ^{ns}	4,5 ^{ns}	3,7 ^{ns}	0,5 ^{ns}	1,0 ^{ns}	0,2 ^{ns}	16,5*	8,5 ^{ns}	2,7 ^{ns}	0,1 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	68 a	57 a	46 ab	43 ab	73 a	68	48 ab	52 ab	59 ab	57	40 a	33 ab
EA	66 a	59 a	51 a	45 ab	71 a	58	45 ab	54 ab	75 a	62	41 a	35 ab
EAF	61 a	55 a	46 ab	39 ab	49 b	42	40 b	44 b	58 b	59	35 a	31 ab
EFP	77 a	66 a	56 a	48 a	77 a	65	51 ab	55 a	59 ab	54	42 a	35 ab
W	73 a	62 a	46 ab	44 ab	77 a	76	56 a	56 a	68 ab	70	49 a	38 a
CDC	79 a	67 a	51 a	45 ab	73 a	72	50 ab	55 a	65 ab	59	43 a	29 ab
CD	77 a	64 a	58 a	48 a	78 a	71	52 ab	54 ab	71 ab	67	46 a	39 a
T	33 b	27 b	27 b	27 b	35 c	29	23 c	26 c	17 c	10	18 b	21 b
F	33,7**	9,9**	7,8**	3,9**	33,2**	34,3**	14,9**	17,1**	24,9**	30,9**	10,3**	2,5*
AxC	0,8 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,4 ^{ns}	1,4 ^{ns}	3,1**	2,0 ^{ns}	1,9 ^{ns}	1,8 ^{ns}	4,0**	2,1 ^{ns}	0,6 ^{ns}
CV _{parcela} (%)	16,7	35,3	50,6	38,9	41,5	43,9	75,8	64,9	26,2	26,6	69,9	38,9
CV _{subparcela} (%)	10,9	20,3	20,4	23,3	11,5	13,3	16,7	14,1	17,4	17,5	21,6	31,0

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

A respeito da EAF ter proporcionado valor da saturação por bases próximo aos demais corretivos, e esta possuir baixo valor de PRNT, pode ser atribuído à solubilização do cálcio, magnésio e potássio contidos neste material durante o processo de extração na análise química, elevando o valor de CTC e V% e tornando-o incompatível com o valor de pH atingido neste tratamento.

O agrosilício, a EA e a EFP foram semelhantes aos calcários no aumento dos valores de V%, demonstrando a sua eficiência no fornecimento de Ca e Mg em condições de implantação do sistema de semeadura direta. Além de acréscimos semelhantes nos valores de V%, estas escórias mostraram-se semelhantes aos calcários no aumento dos valores de pH (Tabela 3).

A interação aplicação x corretivo foi significativa para os valores de saturação por bases na camada de 5-10 cm aos 12 e 23 meses (Tabela 6). Na análise de seu desdobramento (Tabela 7) verifica-se que a incorporação da EA favoreceu a elevação da V% aos 12 meses, bem como no período de 23 meses, no qual também houve aumento no valor de V% com a aplicação incorporada de AG e CD. O contato do corretivo com o solo proporcionado pelo tratamento com incorporação favoreceu a liberação de Ca e Mg contribuindo para o aumento da V%.

Tabela 7. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para valores de saturação por bases (V%) na camada de 5-10 cm, após 12 e 23 meses da aplicação dos corretivos.

Corretivos	Aplicação			
	Incorporada	Superfície	Incorporada	Superfície
	12 meses		23 meses	
	V%			
AG	67 Aa	68 Aa	72 Aa	41 Bb
EA	71 Aa	45 Bab	70 Aa	53 Bab
EAF	37 Ab	47 Ab	58 Aa	59 Aab
EFP	68 Aa	62 Aab	66 Aa	42 Ab
W	78 Aa	74 Aa	69 Aa	71 Aa
CDC	74 Aa	71 Aa	60 Aa	59 Aab
CD	74 Aa	67 Aa	76 Aa	59 Bab
T	30 Ab	27 Ab	8 Ab	12 Ac

*agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T). Letras maiúsculas distintas correspondem às comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo. Letras minúsculas distintas correspondem às comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo de aplicação pelo teste de Tukey $p > 0,05$.

No Brasil, são usados diversos indicadores para verificar se existe ou não necessidade de calagem, que foram desenvolvidos pelos programas regionais de pesquisa em Fertilidade do Solo (NOLLA e ANGHINONI, 2006). No Estado de São Paulo emprega-se a saturação por bases (RAIJ et al., 2001) que baseia-se na elevação de V% para patamares de máxima eficiência econômica de uso do calcário de acordo com a cultura de interesse. Para a soja, o valor considerado adequado é de 60%, na camada arável de 0-20 cm. Segundo esse critério após 23 meses da aplicação dos corretivos tornaria-se necessária a reaplicação de corretivos nos tratamentos com uso de AG, EA, EAF, EFP e CDC.

Todavia, há de se considerar que as alterações ocorridas em sistemas de cultivo, onde não há revolvimento do solo com o acúmulo de matéria orgânica e nutrientes em camadas superficiais podem sugerir alterações nestes critérios. Nesta linha de pesquisa, foram realizados estudos no Estado do Rio Grande Sul para estabelecer critérios quanto à calagem para o cultivo da soja em SSD consolidado (NOLLA e ANGHINONI, 2006). De acordo com os autores, valores de pH em CaCl_2 menores que 4,5 nas camadas de 0-10 e 0-15 cm e V% inferior a 62% indicam a necessidade de reaplicação de corretivos de acidez do solo para o cultivo da soja em SSD. Considerando tal informação, com base nos valores de pH obtidos no presente trabalho não haveria a necessidade de reaplicação dos corretivos, porém, com os resultados de V% após 23 meses da aplicação incorporada e em superfície (Tabela 6) verifica-se a necessidade de reaplicação de corretivos de acidez para os tratamentos com aplicação de AG, EAF e EFP.

Em relação aos teores de M.O., houve efeito significativo do modo de aplicação dos corretivos sobre o seu conteúdo nas camadas superficiais do solo (Tabela 8). As parcelas com o tratamento de aplicação incorporada passou por um preparo do solo com aração e gradagem, e posteriormente houve a incorporação dos materiais corretivos. O revolvimento do solo, proporcionou maior contato do material vegetal de brachiaria com o solo aumentando a atividade dos microorganismos e, conseqüentemente, o processo de mineralização, com isto, houve redução do teor de M.O com a aplicação incorporada dos corretivos, verificados logo aos dois meses após a implantação do SSD.

Tabela 8. Valores de matéria orgânica do solo (M.O.) após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos Aplicação (A)	2 meses				12 meses				23 meses			
					Camadas (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
	M.O. (g dm ⁻³)											
Incorporada	21 b	22 a	20 a	17 a	37 b	38 b	39 a	37 a	36 b	35 a	31 a	24 a
Superfície	25 a	21 a	18 a	15 a	44 a	43 a	38 a	35 a	42 a	36 a	32 a	25 a
F	10,4*	0,6 ^{ns}	2,6 ^{ns}	3,8 ^{ns}	21,3*	12,2*	0,1 ^{ns}	1,7 ^{ns}	56,7**	2,5 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,2 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	23 a	21 ab	19 a	17 a	39 a	39 a	37 a	35 a	40 a	38 a	33 a	25 ab
EA	23 a	21 ab	18 a	16 a	41 a	40 a	39 a	36 a	40 a	34 a	30 a	25 ab
EAF	22 a	23 a	19 a	16 a	40 a	42 a	43 a	34 a	39 a	34 a	30 a	24 ab
EFP	23 a	21 ab	18 a	17 a	40 a	42 a	37 a	37 a	36 a	37 a	32 a	26 a
W	24 a	23 a	20 a	16 a	41 a	40 a	37 a	37 a	41 a	36 a	32 a	24 ab
CDC	24 a	21 ab	19 a	16 a	38 a	38 a	39 a	37 a	34 a	32 a	32 a	21 b
CD	22 a	21 ab	19 a	17 a	41 a	41 a	38 a	35 a	39 a	37 a	32 a	25 ab
T	21 a	18 b	18 a	16 a	41 a	42 a	38 a	35 a	40 a	36 a	32 a	23 ab
F	1,5 ^{ns}	4,1**	0,7 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,7 ^{ns}	2,0 ^{ns}	1,7 ^{ns}	0,5 ^{ns}	2,0 ^{ns}
AxC	0,7 ^{ns}	0,7 ^{ns}	0,7 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,6 ^{ns}	1,2 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,4 ^{ns}	1,6 ^{ns}	1,1 ^{ns}	1,7 ^{ns}
CV _{parcela} (%)	17,2	20,5	26,7	25,6	14,4	15,4	16,5	16,3	7,9	11,4	19,2	28,8
CV _{subparcela} (%)	10,9	9,9	11,3	16,6	13,2	11,2	16,4	12,4	11,6	13,1	12,7	11,8

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo

Ao longo do tempo a deposição dos restos vegetais do feijoeiro, da aveia preta e soja, favoreceu o aumento da M.O., mantendo valores superiores com a aplicação superficial na camada de 0-5 cm aos 12 e 23 meses e na camada de 5-10 cm aos 23 meses.

Entre os corretivos houve diferença significativa no teor de M.O. para a camada de 5-10 cm na avaliação de dois meses e na camada de 20- 40 cm aos 23 meses após aplicação dos corretivos. Na primeira avaliação, a EAF e a W aumentaram o teor de M.O. do solo em relação ao tratamento testemunha, porém, vale ressaltar que estes materiais não são fonte de matéria orgânica, a sua contribuição poderia ocorrer em razão de proporcionarem melhores condições para o crescimento das culturas, favorecendo a deposição de maior palhada, no entanto, na avaliação de dois meses ainda não havia sido implantado nenhuma cultura e os resíduos vegetais eram os que haviam na área antes da instalação do experimento.

A aplicação superficial dos corretivos promoveu aumento no teor de P, Ca e Mg nos primeiros 5 cm do solo (Tabelas 9, 11 e 13). Além do acúmulo superficial dos corretivos pelo não revolvimento do solo, o aumento no teor de Ca, Mg e P é favorecido pela deposição de resíduos de culturas na superfície; os ácidos orgânicos provenientes de plantas podem interagir com a fase sólida e ocupar os sítios de adsorção de nutrientes, competindo diretamente com eles e aumentando sua disponibilidade no solo (PAVINATO e ROSOLEM, 2008).

Em adição o P possui baixa mobilidade no solo e o acúmulo superficial, normalmente é maior do que dos demais nutrientes (RHEINHEIMER e ANGHINONI, 2001). É importante considerar que o fornecimento de P na semeadura da soja foi realizado sem incorporação, uma vez que o SSD já havia sido estabelecido. A não incorporação do fertilizante ao solo diminui o contato solo-fertilizante e, consequentemente, a intensidade das reações de adsorção do fosfato (CIOTTA et al., 2002), podendo ter contribuído para os maiores teores de P nos primeiros 5 cm de solo (Tabela 9).

Tabela 9. Teor de fósforo (P) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílicio (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos Aplicação (A)	2 meses				12 meses				23 meses			
	Camadas (cm)											
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
	P (mg dm ⁻³)											
Incorporada	8	7 a	6 a	4 a	12	12	8 a	7 a	14 b	19 a	9 a	4 a
Superfície	11	8 a	6 a	4 a	21	14	9 a	9 a	25 a	18 a	10 a	6 a
F	29,5*	8,6 ^{ns}	5,1 ^{ns}	2,0 ^{ns}	57,4*	1,9 ^{ns}	1,1 ^{ns}	1,4 ^{ns}	33,3*	0,2 ^{ns}	0,6 ^{ns}	1,8 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	10	8 b	6 b	4 b	19	16	8 ab	9 ab	19 b	23 a	9 a	6 a
EA	14	13 a	10 a	7 a	24	15	9 ab	11 a	42 a	22 a	11 a	7 a
EAF	8	7 b	5 b	3 b	15	12	8 ab	7 b	17 b	13 a	7 a	4 a
EFP	10	7 b	6 b	4 b	12	12	8 ab	8 ab	15 b	18 a	10 a	5 a
W	8	8 b	5 b	5 ab	20	16	11 a	9 ab	17 b	17 a	9 a	5 a
CDC	10	8 b	6 b	4 b	16	13	8 ab	7 b	19 b	15 a	10 a	4 a
CD	9	6 b	5 b	4 b	12	10	7 b	6 b	15 b	23 a	9 a	6 a
T	7	6 b	5 b	4 b	12	10	7 b	7 b	12 b	18 a	8 a	4 a
F	11,1**	5,0**	7,4**	4,2**	13,6**	4,4**	2,6 ^{ns}	4,6**	5,4**	0,8 ^{ns}	1,6 ^{ns}	1,5 ^{ns}
AxC	3,4**	0,3 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,6 ^{ns}	7,0**	3,1**	2,0 ^{ns}	2,2 ^{ns}	2,5 ^{ns}	2,2 ^{ns}	2,5 ^{ns}	0,4 ^{ns}
CV _{parcela} (%)	23,3	17,5	15,9	25,5	28,9	58,1	40,4	71,9	41,2	62,2	45,7	89,8
CV _{subparcela} (%)	20,2	36,1	27,9	36,1	21,5	25,2	28,7	29,6	57,3	63,3	27,6	42,3

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Nos resultados de dois meses após aplicação dos corretivos a EA proporcionou os maiores teores de P em todas as camadas, aos 12 meses nas camadas de 0-5 e 20 -40 cm e aos 23 meses na camada de 0-5 cm de solo (Tabela 9). Resultados semelhantes foram relatados por Corrêa et al. (2008b) e Castro e Cruscioi (2013b). Tal fato explica-se pela competição dos ânions de silicatos contidos na escória com o P pelos mesmos sítios de adsorção, impedindo ou dificultando a adsorção de P (PRADO e FERNANDES, 2001).

Outra explicação plausível é a liberação de P contido na EA, pois, esse material possuía $11,0 \text{ g kg}^{-1}$ de P_2O_5 (Tabela 2), dessa forma, com a sua aplicação, foi fornecido $98,7 \text{ kg ha}^{-1}$ de P_2O_5 , o que pode ter contribuído em grande parte para o aumento de P no solo. A ação do SiO_4^- da escória, obstruindo os sítios de adsorção das argilas e dos óxidos de Fe e Al, aliada ao P presente na sua constituição, torna este insumo uma excelente alternativa para o aumento de P em solos tropicais (PREZOTTI e MARTINS, 2012).

Nota-se que houve aumento no teor de P no tratamento testemunha da primeira para a segunda e terceira amostragem (Tabela 9). A adubação de plantio da soja pode ter contribuído para este acréscimo, já que todos os tratamentos receberam 90 kg ha^{-1} de P_2O_5 . Na profundidade de 0-5 cm houve efeito significativo da interação aplicação x corretivos para o teor de P (Tabela 9), cujo desdobramento demonstra que os corretivos aplicados em superfície, exceto a EA e a EAF, aos dois meses, promoveram maior teor de P do que a aplicação incorporada. Maior teor de P com a aplicação em superfície também foi observado aos 12 meses, exceto para a EA. (Tabela 10).

Houve efeito significativo do modo de aplicação dos corretivos sobre os teores de Ca do solo (Tabela 11). Aos dois e 23 meses após aplicação dos corretivos houve maior teor de Ca na camada de 5-10 cm com a aplicação incorporada. O contato corretivo/solo proporcionado pela incorporação com a enxada rotativa favoreceu a dissolução do corretivo liberando o Ca.

Todos os corretivos, no período de 12 meses, foram capazes de tornar os teores de Ca do solo superiores ao da testemunha, até 40 cm de profundidade, indicando que os compostos liberados pela hidrólise dos corretivos movimentaram-se verticalmente. Este movimento também foi observado para o Mg (Tabela 13) em que os acréscimos na camada de 20-40 cm ocorreram com o uso de CD, CDC e EFP. O mecanismo de lixiviação de Ca por meio da formação de complexos orgânicos

hidrossolúveis presentes nos restos das plantas pode estar relacionado com a movimentação de Ca no perfil (TISSI et al., 2004).

Tabela 10. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para o teor de fósforo (P) nas camadas de 0-5 e 5-10 cm de profundidade após 2 e 12 meses da aplicação dos corretivos.

Corretivos*	2 meses		12 meses			
	0-5 cm		0-5 cm		5-10 cm	
	Incorporada	Superfície	Incorporada	Superfície	Incorporada	Superfície
	-----P (mg dm ⁻³) -----					
AG	7 Bb	13 Aa	13 Bb	25 Aab	15 Aab	17 Aab
EA	15 Aa	13 Aa	26 Aa	24 Aabc	18 Aa	12 Bb
EAF	6 Ab	9 Aab	12 Bb	18 Abcd	12 Aabc	13 Ab
EFP	8 Bb	12 Aab	9 Bb	15 Ad	11 Aabc	13 Ab
W	7 Bb	9 Aab	10 Bb	30 Aa	12 Babcd	20 Aa
CDC	7 Bb	12 Aab	9 Bb	23Aabcd	11 Aabc	15 Aab
CD	6 Bb	10 Aab	8 Bb	17 Acd	8 Abc	12 Ab
T	5 Bb	8 Ab	8 Bb	16 Acd	7 Bc	13 Ab

*AG: agrosilício; EA: escória de aciaria; EAF: escória de alto forno; EFP: escória de forno de panela; W: wollastonita; CDC: calcário dolomítico calcinado; CD: calcário dolomítico; T: testemunha. Letras maiúsculas correspondem às comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo. Letras minúsculas correspondem às comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo de aplicação pelo teste de Tukey $p > 0,05$.

Miyazawa (2001) citado por Altmann (2010) explica que os ácidos orgânicos solúveis neutralizam temporariamente as frentes de acidez, promovendo o transporte de cátion por ligantes do solo. Na camada superficial do solo, esses ligantes orgânicos complexam os cátions trocáveis Ca e Mg, formando moléculas de carga neutra e facilitando sua descida no perfil (MIYASAWA et al., 1993). Também há relatos na literatura de que ânions como os nitratos e sulfatos, originados da decomposição dos resíduos culturais ou da adição de fertilizantes, podem contribuir para a movimentação descendente dos cátions básicos (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^{+}) (CAIRES et al., 1998; CRUSCIOL et al., 2011).

Contudo, o Ca e Mg transportado para as camadas subsuperficiais não aumentam o pH e nem reduzem a toxidez de Al no subsolo (MIYAZAWA, 2001 citado por ALTMANN, 2010), fato contrastado pelo pequeno acréscimo nos valores de pH do solo na camada de 20-40 cm (Tabela 3).

Tabela 11. Teor de cálcio (Ca) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílicio (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos Aplicação (A)	2 meses				12 meses				23 meses			
					Camadas (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
	Ca (mmol _c dm ⁻³)											
Incorporada	44	44 a	33	28	42	50	31 a	33	38	48 a	32	20 a
Superfície	53	35 b	25	22	69	41	24 a	33	87	40 b	23	22 a
F	10,9*	11,5*	10,1 ^{ns}	9,0 ^{ns}	19,1*	0,6 ^{ns}	1,6 ^{ns}	0,0 ^{ns}	16,2*	115,6**	9,0 ^{ns}	0,6 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	50	40 a	27 a	28 a	59	49	31 a	37	51	46 bcd	29	23 ab
EA	44	47 a	34 a	30 a	66	48	32 a	43	138	53 abc	31	24 a
EAF	53	47 a	32 a	24 ab	40	29	25 a	33	74	68 a	27	22 ab
EFP	67	50 a	36 a	29 a	68	47	29 a	39	43	35 d	27	21 ab
W	56	44 a	28 a	26 ab	80	71	35 a	38	83	63 ab	41	26 a
CDC	47	38 a	25 ab	23 ab	47	44	28 a	35	47	36 cd	25	17 ab
CD	57	40 a	33 a	28 a	64	47	29 a	27	52	43 cd	26	22 ab
T	15	11 b	13 b	14 b	18	14	10b	13	10	6 e	12	13 b
F	16,1**	7,1**	5,9**	3,1**	24,6**	26,3**	10,3**	16,5**	7,6**	25,5**	9,5**	3,0*
AxC	5,2**	0,5 ^{ns}	0,4 ^{ns}	1,9 ^{ns}	5,3**	5,5**	1,0 ^{ns}	4,2**	4,6**	2,6 ^{ns}	3,4**	0,8 ^{ns}
CV _{parcela} (%)	20,7	29,5	33,5	29,6	44,7	52,2	75,1	66,5	77,5	6,6	43,2	35,7
CV _{subparcela} (%)	22,2	32,7	30,4	32,4	19,9	21,0	24,1	19,6	61,5	24,6	27,2	32,7

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Tabela 12. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para o teor de cálcio (Ca) no solo, nas camadas de 0-5; 5-10; 10-20 e 20-40 cm após 2, 12 e 23 meses da aplicação dos corretivos.

Corretivos ¹	2 meses		12 meses						23 meses			
	0-5 cm		0-5 cm		5-10 cm		20-40 cm		0-5 cm		10-20 cm	
	Aplicação*											
	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S
	Ca (mmolc dm ⁻³)											
AG	49 Aa	51 Abc	42 Bab	75 Abc	47 Ac	52 Aab	32 Ba	43 Aa	40 Aa	62 Abc	35 Aab	24 Babc
EA	53 Aa	35 Bcd	61 Aa	71 Abc	67 Aab	29 Bcd	48 Aa	39 Aa	47 Ba	229 Aa	41 Aa	20 Babc
EAF	50 Aa	56 Abc	22 Bbc	58 Abc	22 Bd	36 Abc	29 Ab	36 Aa	52 Aa	95 Abc	24 Abc	30 Aab
EFP	52 Ba	81 Aa	54 Ba	82 Ab	49 Abc	45 Abc	41 Aab	36 Aa	40 Aa	47 Abc	36 Aab	18 Bbc
W	56 Aa	55 Abc	49 Ba	111 Aa	75 Aa	68 Aa	42 Aab	35 Aa	46 Ba	121 Ab	47 Aa	35 Ba
CDC	38 Bab	56 Abc	42 Aab	53 Ac	44 Ac	43 Abc	30 Ab	39 Aa	31 Aa	63 Abc	23 Abc	27 Aab
CD	40 Bab	74 Aab	50 Ba	79 Ab	47 Abc	46 Abc	33 Ab	20 Bb	40 Aa	64 Abc	31 Aabc	20 Babc
T	16 Ab	13 Ad	14 Ac	23 Ad	15 Ac	13 Ad	10 Ac	17 Ab	9 Aa	12 Ac	15 Ac	9 Ac

*I: incorporado; S: superficial; ¹AG: agrosilício; EA: escória de aciaria; EAF: escória de alto forno; EFP: escória de forno de panela; W: wollastonita; CDC: calcário dolomítico calcinado; CD: calcário dolomítico; T: testemunha. Letras maiúsculas correspondem às comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo. Letras minúsculas correspondem às comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo de aplicação pelo teste de Tukey p> 0,05

Tabela 13. Teor de magnésio (Mg) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos Aplicação (A)	2 meses				12 meses				23 meses			
	Camadas (cm)											
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
	Mg (mmolc dm ⁻³)											
Incorporada	19 a	19 a	15 a	12 a	17	18 a	15 a	13	15	17 a	14,5 a	9,8 a
Superfície	25 a	17 a	11 a	8 a	27	19 a	12 a	16	28	16 a	11,5 a	9,8 a
F	8,1 ^{ns}	0,4 ^{ns}	5,1 ^{ns}	8,2 ^{ns}	21,1*	0,4 ^{ns}	1,1 ^{ns}	1,8 ^{ns}	24,1*	0,1 ^{ns}	1,6 ^{ns}	0,0 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	18 bcd	15 bc	12 b	9 b	23	19 bcd	13 bc	12	18	15 c	12 bcd	9 ab
EA	18 bcd	14 bc	12 b	9 b	19	14 cde	12 cd	13	24	15 c	10 cd	9 ab
EAF	24 bc	19 bc	13 b	10 ab	17	14 de	12 bc	13	31	23 ab	13 bcd	9 ab
EFP	26 b	19 bc	15 b	11 ab	26	21 bc	16 abc	15	18	16 c	14 abc	11 ab
W	14 cd	12 c	10 bc	8 b	13	15 cde	12 bcd	12	16	13 c	12 bcd	9 ab
CDC	28 b	25 ab	15 b	12 ab	24	23 b	17 ab	17	20	18 bc	16 ab	11 ab
CD	40 a	31 a	20 a	16 a	40	30 a	21 a	27	37	28 a	19 a	14 a
T	9 d	8 c	6 c	6 b	13	10 e	6 d	8	7	3 d	7 d	6 b
F	13,6**	8,1**	12,0**	4,9**	16,1**	17,0**	12,6**	24,3**	13,5**	33,0**	7,9**	3,8**
AxC	0,9 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,8 ^{ns}	1,7 ^{ns}	2,7*	1,5 ^{ns}	0,9 ^{ns}	6,6**	4,1*	1,5 ^{ns}	1,1 ^{ns}	0,3 ^{ns}
CV _{parcela} (%)	36,9	59,6	62,3	50,8	42,0	54,7	71,2	71,6	48,7	53,5	74,0	52,2
CV _{subparcela} (%)	33,4	42,0	26,8	38,3	28,2	24,5	25,2	22,2	33,9	21,7	28,0	31,8

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Para o Ca e Mg transportados para as camadas mais profundas terem efeito na neutralização da acidez, os ácidos orgânicos solúveis na planta não podem ser decompostos pelos microorganismos do solo, e sim, serem fornecidos pela constante exdução das folhas, preferencialmente com as plantas intactas. Portanto, torna-se essencial a constante adição de palhada, em quantidades superiores à mineralizada, para a sustentabilidade do plantio direto, e da aplicação superficial dos corretivos (ALTMANN, 2010).

Apesar da EAF não ter corrigido a acidez do solo, esta foi capaz de fornecer Ca, elevando o teor deste nutriente quase que ao dobro do que havia no tratamento testemunha (Tabela 11), também houve acréscimos no teor de Mg com aplicação da EAF (Tabela 13). A EAF tem em sua constituição quantidades suficientes de CaO e MgO para ser considerada um corretivo, com adequado valor PN, de 65, no entanto, o que limita sua ação corretiva é a granulometria, a qual é muito grosseira. Desta forma, é possível inferir que este cálcio que foi extraído não seja realmente o que estava na solução do solo disponível para as plantas, pois se o material fosse capaz de solubilizar o Ca ele teria sido capaz de corrigir a acidez modificando o pH do solo. Assim, há a possibilidade deste Ca e Mg serem em decorrência de pequenas partículas do corretivo que foram amostradas juntamente com o solo e solubilizadas no processo de extração. Isso justifica a inconsistência nos valores de V% e pH obtidos com este tratamento.

A interação entre o corretivo e o modo de aplicação foi significativa para o teor de Ca no solo (Tabela 11). Na análise do desdobramento (Tabela 12) verifica-se que a aplicação superficial de EFP, CDC e CD aos dois meses, AG, EAF, EFP, e CD aos 12 meses, e EA e W aos 23 meses após sua aplicação aumentou o teor de Ca nos primeiros 5 cm de solo. Esse resultado pode ser atribuído a não incorporação dos corretivos, e desta forma a quantidade recomendada de corretivo para a camada de 0-20 cm de solo ficou quase inteiramente depositada na superfície.

Decorridos 12 meses da aplicação da EA houve aumento no teor de Ca na camada de 5-10 cm em relação à aplicação superficial. Após 23 meses da aplicação dos corretivos, a incorporação de AG, EA, EFP, W e CD aumentou o teor de Ca na profundidade de 10-20 cm em relação à aplicação superficial (Tabela 12), enfatizando que a incorporação favoreceu a distribuição do corretivo até a profundidade de 20 cm com aumento do contato corretivo/solo favorecendo sua dissolução e liberação de Ca. Observou-se interação significativa para a EAF na camada 5-10 cm, aos 12

meses, com maior teor de Ca com a aplicação em superfície, como discutido anteriormente, provavelmente esse resultado seja em decorrência da amostragem de pequenas partículas do corretivo e sua quantificação.

Nota-se que na avaliação dos 23 meses após aplicação dos corretivos, o teor de Ca com a aplicação da EA foi extremamente elevado em relação ao demais corretivos (Tabela 11), analisando o desdobramento da interação aplicação x corretivos (Tabela 12), verifica-se que o teor de Ca foi cinco vezes superior quando a aplicação da EA foi superficial.

A provável explicação para esse valor tão elevado é que uma parte do Ca foi superestimada em razão da amostragem de pequenas partículas de escória juntamente com o solo, e durante o processo de extração na análise química houve a solubilização do cálcio, contidos neste material, não representando o que realmente estava disponível no solo, já que não houve diferença entre a EA e os demais corretivos no teor de Ca foliar da aveia preta (Tabela 38) e soja (Tabela 43). O valor exagerado de Ca obtido no tratamento EA refletiu nos valores de SB e CTC (Tabelas 16 e 18), proporcionando a interação significativa entre aplicação e corretivo (Tabelas 17 e 19).

A maior eficiência na disponibilidade de Mg ocorreu com aplicação do CD, em todas as camadas e épocas de amostragem (Tabela 13). Verifica-se que a aplicação superficial do CD aumentou o Mg na camada 0-5 cm aos 12 e aos 23 meses, e na camada de 20-40 cm aos 12 meses após sua aplicação (Tabela 14).

Avaliando a composição química dos corretivos, verifica-se que os calcários apresentavam a maior percentagem de MgO, o que justifica os resultados obtidos. Entre os calcários, o CDC possuía a maior percentagem de MgO, todavia, no decorrer das amostragens apresentou menor teor de Mg que o CD em algumas das camadas avaliadas. O menor teor de Mg no solo com o tratamento CDC é explicado pela absorção de Mg pelas plantas. No teor foliar de Mg no feijoeiro (Tabelas 34) não houve diferença significativa entre os calcários, todavia, somente o CDC foi capaz de aumentar o Mg em relação ao tratamento testemunha, evidenciado o processo de absorção.

Tabela 14. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para o teor de magnésio (Mg) na camada de 0-5 e 20-40 cm após 12 e 23 meses da aplicação dos corretivos. .

Corretivos ¹	12 meses				23 meses	
	0-5cm		20-40 cm		0-5cm	
			Aplicação*			
	I	S	I	S	I	S
	Mg (mmol _c dm ⁻³)					
AG	15 Bab	30 Ab	11 Aab	13 Abc	14 Aa	21 Acde
EA	16 Aab	23 Abc	13 Aab	13 Abc	13 Ba	35 Abc
EAF	10 Bb	24 Abc	11 Aab	14 Aab	21 Ba	42 Aab
EFP	20 Bab	33 Ab	14 Aab	16 Aab	14 Aa	22 Acde
W	12 Ab	14 Ac	13 Aab	11 Ac	14 Aa	18 Ade
CDC	19 Bab	29 Ab	15 Aab	19 Ab	15 Aa	25 Acd
CD	29 Ba	52 Aa	19 Ba	36 Aa	22 Ba	52 Aa
T	12 Ab	14 Ac	8 Ab	9 Ac	6 Aa	7 Ae

*I: incorporado; S: superficial; Letras maiúsculas correspondem às comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo. ¹AG: agrosilício, EA: escória de aciaria, EAF escória de alto forno, EFP: escória forno de panela, W: wollastonita, CDC: calcário dolomítico calcinado, CD: calcário dolomítico, T: testemunha. Letras minúsculas correspondem às comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo de aplicação pelo teste de Tukey $p > 0,05$. Letras maiúsculas correspondem às comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo.

A aplicação superficial dos corretivos proporcionou maior teor de K em relação à aplicação incorporada nos primeiros 5 cm de solo após dois meses de sua aplicação (Tabela 15). Este resultado pode estar associado ao aumento das cargas negativas dependentes de pH ocasionado pela aplicação dos corretivos, e a carga livre pode ter sido ocupada por K^+ , aumentando, assim, o teor de K trocável na camada superficial do solo (CAIRES et al.,1998). A concentração de 5,9 g kg⁻¹ de K₂O na composição da EAF contribuiu para o aumento deste nutriente no solo, aos dois e 23 meses após a sua aplicação, na profundidade de 0-5 cm e 5-10 cm e aos 12 meses na profundidade de 20-40 cm. O aumento no teor de K com aplicação de escória de alto forno relatado por Carvalho-Pupatto et al. (2004) também foi atribuído à elevada concentração deste nutriente nesses resíduos.

O aumento de Ca e Mg com a aplicação superficial refletiu nos maiores valores de SB nas camadas de 0-5 cm após dois, 12 e 23 meses da aplicação dos corretivos (Tabela 16).

Tabela 15. Teor de potássio (K) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos Aplicação (A)	2 meses				12 meses				23 meses			
					Camadas (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
	K (mmol _c dm ⁻³)											
Incorporada	1,5 b	1,6 a	1,4 a	1,1 a	1,8 a	1,6 a	1,3 a	1,3 a	2,7 a	1,8 a	1,0 b	0,9 a
Superfície	2,1 a	1,7 a	1,2 a	0,9 a	2,2 a	1,7 a	1,1 b	1,0 a	3,1 a	2,3 a	1,6 a	1,1 a
F	87,4**	1,3 ^{ns}	3,8 ^{ns}	2,4 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,2 ^{ns}	34,4**	2,7 ^{ns}	0,9 ^{ns}	4,0 ^{ns}	24,9*	5,7 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	1,6 b	1,5 b	1,3 a	0,9 a	2,0 a	1,7 a	1,2 a	1,1 ab	2,9 b	1,8 bc	1,3 a	1,0 a
EA	1,7 b	1,8 b	1,6 a	1,2 a	2,0 a	1,7 a	1,3 a	1,4 ab	2,8 b	2,1 abc	1,2 a	0,9 a
EAF	2,8 a	2,6 a	1,8 a	1,1 a	2,4 a	2,0 a	1,5 a	1,5 a	4,1 a	2,9 a	1,6 a	1,2 a
EFP	1,5 b	1,3 b	1,1 a	0,9 a	1,9 a	1,6 a	1,1 a	0,9 b	2,5 b	1,4 c	1,2 a	0,9 a
W	1,5 b	1,5 b	1,2 a	1,0 a	1,8 a	1,5 a	1,4 a	1,0 ab	3,0 ab	2,6 ab	1,3 a	1,2 a
CDC	1,7 b	1,5 b	1,3 a	1,0 a	1,8 a	1,5 a	1,1 a	1,1 ab	2,9 b	1,9 bc	1,3 a	0,9 a
CD	1,5 b	1,5 b	1,2 a	0,9 a	1,8 a	1,4 a	1,0 a	1,0 ab	2,6 b	1,9 abc	1,1 a	0,9 a
T	1,8 b	1,4 b	1,1 a	0,8 a	2,1 a	1,7 a	1,2 a	1,1 ab	2,3 b	1,6 c	1,3 a	1,2 a
F	9,6**	6,4**	2,4 ^{ns}	1,1 ^{ns}	1,9 ^{ns}	1,3 ^{ns}	1,9 ^{ns}	3,1**	4,3**	5,5**	0,7 ^{ns}	1,1 ^{ns}
AxC	1,2 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,7 ^{ns}	2,1 ^{ns}	1,3 ^{ns}	1,1 ^{ns}	1,1 ^{ns}	2,3 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,2 ^{ns}	3,1 ^{ns}
CV _{parcela} (%)	14,1	25,9	32,2	41,7	73,9	54,6	13,0	58,0	56,6	51,4	34,7	42,2
CV _{subparcela} (%)	22,2	27,6	32,9	35,2	21,2	25,1	30,4	27,6	25,7	31,0	39,6	35,8

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Tabela 16. Valores de soma de bases (SB) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílicio (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

	2 meses				12 meses				23 meses			
Tratamentos	Camadas (cm)											
Aplicação (A)	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
	SB (mmol _c dm ⁻³)											
Incorporada	65	65 a	49 a	41 a	60	65	47 a	47	56	66 a	47	31 a
Superfície	80	53 a	37 a	32 a	98	62	37 a	51	118	58 b	36	33 a
F	11,3 ^{ns}	4,3 ^{ns}	7,3 ^{ns}	9,1 ^{ns}	21,0*	0,1 ^{ns}	1,6 ^{ns}	0,2 ^{ns}	16,9*	11,4*	4,8 ^{ns}	0,3 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	70	56 ab	41 ab	38 ab	83	70	45 a	51	72	62 bc	43	33 ab
EA	64	62 a	48 a	40 ab	87	64	45 a	58	165	70 bc	42	34 ab
EAF	80	68 a	47 a	35 ab	60	45	39 a	47	110	95 a	41	32 ab
EFP	94	70 a	52 ab	41 ab	96	71	46 a	54	64	53 c	43	33 ab
W	71	57 ab	39 ab	35 ab	95	88	48 a	51	102	79 ab	54	36 a
CDC	77	63 a	41 ab	36 ab	74	68	46 a	53	70	56 c	42	28 ab
CD	99	73 a	55 a	45 a	106	78	51a	55	91	73 bc	46	37 a
T	26	21 b	20 b	21 b	34	26	18 b	23	19	11 d	20	20 b
F	17,1**	6,3**	7,2**	3,3**	22,1**	23,2**	11,4**	13,6**	8,2**	29,8**	7,5**	2,5*
AxC	3,9*	0,5 ^{ns}	0,6 ^{ns}	2,0 ^{ns}	3,8**	5,1**	1,3 ^{ns}	2,4*	4,6**	2,3 ^{ns}	2,7*	0,7 ^{ns}
CV _{parcela} (%)	24,1	37,3	42,1	34,5	41,7	49,7	69,8	67,5	69,3	15,2	49,8	38,1
CV _{subparcela} (%)	21,1	31,8	26,6	30,9	17,7	18,1	20,5	17,2	48,1	20,4	23,6	29,6

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Houve interação significativa entre o modo de aplicação e corretivos para valores de SB na profundidade de 0-5 cm após dois e 23 meses da aplicação dos materiais (Tabela 17), sendo que a aplicação superficial dos corretivos proporcionou maiores valores de SB do que a aplicação incorporada.

Tabela 17. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para os valores de soma de bases (SB) na camada de 0-5 cm, após 2 e 23 meses da aplicação dos corretivos.

Corretivos*	2 meses		23 meses	
	Aplicação			
	Incorporada	Superfície	Incorporada	Superfície
	SB (mmol _c dm ⁻³)			
AG	66 Aa	73 Ac	57 Aa	87 Abc
EA	70 Aa	57 Acd	63 Ba	267 Aa
EAF	75 Aa	84 Abc	76 Ba	143 Ab
EFP	74 Ba	114 Aab	57 Aa	72 Abc
W	70 Aa	72 Ac	63 Ba	142 Ab
CDC	64 Ba	90 Aabc	49 Aa	91 Abc
CD	74 Ba	123 Aa	64 Aa	118 Ab
T	27 Ab	24 Ad	18 Aa	21 Ac

*AG: agrosilício, EA: escória de aciaria, EAF escória de alto forno, EFP: escória forno de panela, W: wollastonita, CDC: calcário dolomítico calcinado, CD: calcário dolomítico, T: testemunha. Letras maiúsculas correspondem às comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo. Letras minúsculas correspondem às comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo de aplicação pelo teste de Tukey $p > 0,05$

A capacidade de troca de cátions (CTC) foi maior no tratamento com aplicação dos corretivos em superfície na profundidade de 0-5 cm (Tabela 18), em razão do aumento de Ca, Mg e K que ocorreu nesta camada (Tabelas 11,13 e 15). O desdobramento da interação corretivo x aplicação mostrou que a aplicação superficial dos corretivos aumentou a CTC na profundidade de 0-5 cm do solo após dois meses com a EFP e CD e após 23 meses com a EA, EAF e W (Tabela 19).

A aplicação dos corretivos alterou os teores dos micronutrientes do solo (Tabelas 20, 21, 22, 23 e 24). Quando os corretivos foram aplicados sem incorporação houve aumento no teor de B na camada de 5-10 cm no período de 12 meses após aplicação dos corretivos (Tabela 20), de Fe na camada de 0-5 cm aos dois meses e na camada de 5-10 aos dois, 12 e 23 meses (Tabela 22) e para o Zn a aplicação superficial aumentou seu teor na profundidade de 0-5 cm na amostragem realizada após dois e 12 meses (Tabela 24).

Tabela 18. Valores da capacidade de troca de cátions (CTC) após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílicio (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos Aplicação (A)	2 meses				12 meses				23 meses			
	Camadas (cm)											
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
	CTC (mmol _c dm ⁻³)											
Incorporada	99 b	100 a	91 a	87 a	99	103	93 a	98 a	112	112 a	108 a	98 a
Superfície	114 a	102 a	87 a	84 a	132	107	94 a	100 a	165	122 a	113 a	101 a
F	17,9*	0,5 ^{ns}	1,9 ^{ns}	1,9 ^{ns}	65,2**	3,6 ^{ns}	0,0 ^{ns}	1,5 ^{ns}	23,2*	4,8 ^{ns}	0,5 ^{ns}	1,8 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	102	98 bc	88 abc	87 a	112	103	94 ab	99 abc	120	110 b	107 ab	101 a
EA	96	104 ab	93 ab	90 a	122	109	100 a	109 a	196	115 b	109 ab	98 a
EAF	129	122 a	101 a	90 a	116	106	98 ab	108 ab	182	165 a	120 ab	107 a
EFP	122	106 ab	94 ab	86 a	124	107	93 ab	99 abc	111	102 b	107 ab	96 a
W	97	91 bc	85 bc	80 a	120	116	89 ab	93 bc	146	114 b	113 ab	95 a
CDC	103	94 bc	81 bc	80 a	99	95	92 ab	94 abc	105	94 b	100 b	100 a
CD	125	110 ab	94 ab	91 a	134	110	98 ab	103 abc	129	113 b	105 ab	96 a
T	81	80 c	77 c	79 a	96	93	85 b	90 c	122	119 b	126 a	99 a
F	11,0**	6,7**	6,2**	2,2 ^{ns}	7,2**	3,0*	2,2*	4,0**	5,3**	6,7**	2,3*	0,8 ^{ns}
AxC	4,5**	1,1 ^{ns}	1,6 ^{ns}	1,5 ^{ns}	3,8**	2,7*	0,3 ^{ns}	1,5 ^{ns}	4,5**	0,5 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,5 ^{ns}
CV _{parcela} (%)	12,8	12,4	12,2	10,4	13,8	8,3	17,4	6,2	31,9	15,7	24,5	9,8
CV _{subparcela} (%)	13,2	13,9	10,6	11,1	11,5	12,2	10,2	9,7	29,7	19,8	14,6	12,6

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo

Tabela 19. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para capacidade de troca de cátions (CTC) na camada de 0-5 cm após 2 e 23 meses da aplicação dos corretivos.

	2 meses		23 meses	
	Aplicação			
Corretivos	Incorporada	Superfície	Incorporada	Superfície
	CTC (mmolc dm ⁻³)			
AG	95 Aab	108 Abc	104 Aa	135 Abc
EA	104 Aab	89 Ac	102 Ba	291 Aa
EAF	124 Aa	133 Aab	150 Ba	215 Aab
EFP	100 Bab	143 Aa	105 Aa	117 Ac
W	95 Aab	99 Ac	114 Ba	177 Abc
CDC	96 Aab	110 Abc	98 Aa	112 Ac
CD	100 Bab	149 Aa	97 Ba	161 Abc
T	81 Ab	81 Ac	128 Aa	116 Ac

*AG: agrosilício, EA: escória de aciaria, EAF escória de alto forno, EFP: escória forno de panela, W: wollastonita, CDC: calcário dolomítico calcinado, CD: calcário dolomítico, T: testemunha. Letras maiúsculas correspondem às comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo. Letras minúsculas correspondem às comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo de aplicação pelo teste de Tukey $p > 0,05$

Contudo, tudo indica que o aumento nos teores dos micronutrientes com o tratamento de aplicação superficial não seja um aumento e sim que os níveis se mantiveram sem alteração. Tal constatação é o aumento nos valores de pH em razão da aplicação incorporada dos corretivos, assim os teores destes micronutrientes foram reduzidos, ocasionando a diferença significativa entre o modo de aplicação. Esse fato fica evidente pelos teores dos micronutrientes do tratamento testemunha quando comparados aos valores da aplicação superficial, que foram semelhantes.

Como verificado para os macronutrientes, as escórias utilizadas neste estudo possuem alguns micronutrientes em quantidades consideráveis em sua constituição como é o caso do Fe e Mn (Tabela 2).

De acordo com Prado et al. (2001) as escórias contém em sua constituição química diversos óxidos, dentre eles o manganês e o ferro, deste modo, a concentração do ferro na composição da escória de aciaria e do manganês na escória de alto forno (Tabela 2) pode ter influenciado a liberação destes micronutrientes para o solo. Por outro lado, também verifica-se que a escória de alto forno não alterou o pH do solo (Tabela 3), desta forma, o elevado teor de manganês observado no tratamento EAF nas avaliações de dois e 12 meses também pode ser atribuídos à acidez do solo já que este micronutriente aumenta sua solubilidade em baixos valores de pH.

Tabela 20. Teor de boro (B) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos Aplicação (A)	2 meses				12 meses				23 meses			
					Camadas (cm)							
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
B (mg dm ⁻³)												
Incorporada	0,28 a	0,29 a	0,31 a	0,32 a	0,41 a	0,39 b	0,40 a	0,47 a	0,54 a	0,47 a	0,50 a	0,55 a
Superfície	0,29 a	0,31 a	0,34 a	0,35a	0,44 a	0,43 a	0,46 a	0,49 a	0,48 a	0,52 a	0,56 a	0,56 a
F	0,8 ^{ns}	1,2 ^{ns}	2,8 ^{ns}	5,1 ^{ns}	2,9 ^{ns}	58,2**	9,5 ^{ns}	0,6 ^{ns}	1,6 ^{ns}	1,6 ^{ns}	1,3 ^{ns}	0,2 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	0,33 a	0,32 a	0,35 a	0,35 a	0,42 ab	0,46 ab	0,43 ab	0,50 a	0,53 a	0,49 abc	0,53 b	0,56 ab
EA	0,31 ab	0,30 a	0,34 ab	0,32 a	0,45 ab	0,46 ab	0,47 ab	0,55 a	0,47 a	0,47 abc	0,53 ab	0,56 ab
EAF	0,31 ab	0,32 a	0,33 ab	0,34 a	0,43 ab	0,39 ab	0,43 ab	0,45 a	0,58 a	0,58 ab	0,59 a	0,56 ab
EFP	0,29 ab	0,30 a	0,32 ab	0,35 a	0,40 ab	0,37 b	0,39 ab	0,45 a	0,50 a	0,47 abc	0,49 ab	0,52 ab
W	0,24 b	0,28 a	0,30 ab	0,33 a	0,39 ab	0,36 a	0,38 b	0,47 a	0,46 a	0,44 bc	0,52 ab	0,55 ab
CDC	0,24 b	0,26 a	0,31 ab	0,30 a	0,43 ab	0,39 ab	0,42 ab	0,50 a	0,48 a	0,47 abc	0,53 ab	0,56 ab
CD	0,28 ab	0,26 a	0,27 b	0,31 a	0,35 b	0,37 b	0,41 ab	0,46 a	0,46 a	0,42 c	0,42 b	0,49 b
T	0,31 ab	0,33 a	0,37 a	0,35 a	0,52 a	0,49 a	0,51 a	0,47 a	0,58 a	0,60 a	0,63 a	0,62 a
F	3,2**	2,3 ^{ns}	3,4**	0,9 ^{ns}	2,7*	4,3**	3,3**	0,7 ^{ns}	1,6 ^{ns}	4,3**	3,2**	2,0*
AxC	1,1 ^{ns}	1,5 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,5 ^{ns}	1,1 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,4 ^{ns}
CV _{parcela} (%)	18,4	28,1	24,0	15,3	15,6	4,8	14,6	22,9	36,6	31,5	39,6	17,8
CV _{subparcela} (%)	18,8	16,5	14,4	17,7	19,5	16,5	15,2	22,8	21,2	17,5	18,3	13,2

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Tabela 21. Teor de cobre (Cu) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos Aplicação (A)	2 meses				12 meses				23 meses			
	Camadas (cm)				Camadas (cm)				Camadas (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
	Cu (mg dm ⁻³)											
Incorporada	5,0 a	5,2 a	5,2 a	5,0 a	5,4 a	5,5 a	6,2 a	6,3 a	5,9 a	5,9 a	6,7 a	6,2 a
Superfície	5,3 a	5,2 a	5,3 a	5,0 a	4,9 a	5,6 a	6,3 a	6,2 a	5,7 a	6,3 a	6,9 a	6,6 a
F	7,2 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,0 ^{ns}	10,5 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,1 ^{ns}	1,5 ^{ns}	1,2 ^{ns}	5,7 ^{ns}	2,1 ^{ns}	3,0 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	5,1 a	5,1 a	5,2 a	4,9 a	4,8 a	5,3 a	6,2 a	6,4 a	5,8 ab	6,1 ab	6,7 a	6,3 a
EA	5,1 a	5,4 a	5,4 a	5,2 a	5,3 a	5,8 a	6,2 a	6,2 a	5,2 b	6,1 ab	6,8 a	6,2 a
EAF	5,1 a	5,3 a	5,2 a	5,0 a	5,4 a	5,7 a	6,2 a	6,5 a	6,3 a	6,3 ab	7,0 a	6,6 a
EFP	5,1 a	5,2 a	5,3 a	5,3 a	4,9 a	5,3 a	6,1 a	6,2 a	5,3 b	5,8 ab	6,6 a	6,5 a
W	5,2 a	5,3 a	5,4 a	5,1 a	5,0 a	5,3 a	6,2 a	6,1 a	5,6 ab	5,6 b	6,6 a	6,7 a
CDC	5,0 a	5,2 a	5,3 a	5,2 a	5,1 a	5,4 a	6,3 a	6,0 a	5,7 ab	6,3 ab	6,9 a	6,5 a
CD	5,3 a	4,5 a	5,0 a	5,0 a	5,0 a	5,4 a	6,1 a	6,2 a	5,8 ab	6,1 ab	6,7 a	6,1 a
T	5,3 a	5,4 a	5,3 a	4,6 a	5,7 a	6,0 a	6,6 a	6,2 a	6,6 ab	6,7 a	7,1 a	6,5 a
F	0,2 ^{ns}	1,3 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,8 ^{ns}	2,3 ^{ns}	2,8 ^{ns}	1,4 ^{ns}	0,9 ^{ns}	4,8**	2,3*	1,1 ^{ns}	1,3 ^{ns}
AxC	0,7 ^{ns}	1,8 ^{ns}	1,5 ^{ns}	2,3 ^{ns}	0,3	1,2 ^{ns}	1,5 ^{ns}	0,8 ^{ns}	1,9 ^{ns}	1,4 ^{ns}	1,2 ^{ns}	1,8 ^{ns}
CV _{parcela} (%)	7,9	17,6	7,8	10,7	13,1	12,3	10,2	5,8	12,0	11,7	9,3	16,9
CV _{subparcela} (%)	12,3	14,3	7,9	9,5	11,6	8,4	6,2	7,1	10,3	9,7	6,9	8,2

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Tabela 22. Teor de ferro (Fe) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos Aplicação (A)	2 meses				12 meses				23 meses			
	Camadas (cm)				Camadas (cm)				Camadas (cm)			
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
	Fe (mg dm ⁻³)											
Incorporada	22 b	23	23 a	19 a	20 a	19 b	24 a	19 a	22 a	21 b	26 a	18 a
Superfície	38 a	31	25 a	19 a	24 a	25 a	25 a	18 a	29 a	28 a	27 a	20 a
F	19,7*	13,3*	1,0 ^{ns}	0,0 ^{ns}	5,1 ^{ns}	13,5*	0,5 ^{ns}	0,4 ^{ns}	5,8 ^{ns}	13,6*	1,1 ^{ns}	0,5 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	29 ab	27	24 ab	20 a	20 bc	20 b	24 a	18 ab	26 abc	24 b	26 a	20 a
EA	42 a	35	30 a	23 a	26 ab	25 ab	26 a	20 ab	26 abc	25 ab	26 a	18 a
EAF	30 ab	28	25 ab	19 a	26 ab	26 ab	24 a	20 ab	31 ab	27 ab	27 a	19 a
EFP	28 b	26	22 b	26 a	19 c	21 b	22 a	18 ab	23 bc	22 b	25 a	20 a
W	30 ab	25	24 ab	18 a	19 c	19 b	25 a	17 b	22 bc	23 b	25 a	21 a
CDC	28 b	24	21 b	17 a	19 c	19 b	24 a	16 b	22 c	23 b	26 a	16 a
CD	22 b	22	20 b	17 a	18 c	19 b	22 a	18 ab	23 bc	23 b	26 a	19 a
T	32 ab	30	24 ab	17 a	29 a	28 a	27 a	22 a	34 a	32 a	31 a	19 a
F	3,1*	7,1**	4,2**	1,4 ^{ns}	7,7**	8,8**	1,2 ^{ns}	3,6**	5,2**	3,7**	1,3 ^{ns}	1,0 ^{ns}
AxC	1,1 ^{ns}	2,3*	0,4 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,6 ^{ns}	1,2 ^{ns}	1,1 ^{ns}	1,3 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,7 ^{ns}	2,2 ^{ns}
CV _{parcela} (%)	48,8	32,2	32,2	52,8	36,4	28,2	26,5	16,4	44,3	30,6	24,3	50,7
CV _{subparcela} (%)	30,3	15,9	17,7	42,5	19,9	15,2	19,6	14,9	20,9	19,1	18,7	19,8

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Tabela 23. Teor de manganês (Mn) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílicio (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos Aplicação (A)	2 meses				12 meses				23 meses			
					Camadas							
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
	Mn (mg dm ⁻³)											
Incorporada	23,7 a	23,2 a	22,6 a	17,7 a	42,4 a	40,7 a	40,0 a	33,1 a	30,8 a	29,7 a	31,8 a	21,7
Superfície	26,4 a	25,6 a	23,7 a	19,0 a	46,3 a	42,0 a	40,2 a	29,6 a	33,1 a	28,9 a	33,1 a	24,2
F	4,8 ^{ns}	1,2 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,5 ^{ns}	2,4 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,0 ^{ns}	1,4 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,3 ^{ns}	1,1 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	26,4 abc	24,2 ab	23,2 a	19,6 a	42,1 abc	40,9 ab	39,6 a	31,1 a	32,6 a	28,2 a	31,4 a	25,4
EA	26,1 abc	26,5 ab	24,6 a	20,0 a	51,1 abc	47,4 a	42,7 a	34,8 a	34,3 a	30,3 a	32,2 a	19,5
EAF	31,1 a	30,6 ab	25,8 a	18,5 a	52,3 a	47,1 ab	38,4 a	30,5 a	37,5 a	32,9 a	34,8 a	21,2
EFP	24,5 abc	24,3 ab	23,2 a	21,1 a	44,8 abc	41,3 ab	40,0 a	33,8 a	30,5 a	28,5 a	31,2 a	25,0
W	23,1 abc	21,7 ab	23,2 a	19,8 a	37,6 bc	36,4 ab	38,9 a	31,5 a	30,8 a	27,6 a	31,9 a	23,0
CDC	20,6 bc	20,1 b	19,7 a	15,9 a	39,4 abc	35,4 ab	41,3 a	26,5 a	28,1 a	25,2 a	30,1 a	20,8
CD	19,6 c	19,6 b	20,5 a	16,0 a	36,6 c	34,5 b	35,2 a	28,8 a	27,2 a	25,7 a	32,2 a	26,1
T	29,0 ab	28,3 a	24,9 a	15,9 a	51,2 ab	47,9 a	44,5 a	33,7 a	34,6 a	36,0 a	35,5 a	22,6
F	4,3**	3,3**	1,2 ^{ns}	1,9 ^{ns}	4,0**	3,9**	0,9 ^{ns}	1,0 ^{ns}	1,8 ^{ns}	2,2 ^{ns}	0,4 ^{ns}	1,3 ^{ns}
AxC	1,2 ^{ns}	1,3 ^{ns}	0,8 ^{ns}	1,9 ^{ns}	1,3 ^{ns}	1,6 ^{ns}	0,7 ^{ns}	1,2 ^{ns}	2,3 ^{ns}	1,0 ^{ns}	0,3 ^{ns}	3,3**
CV _{parcela} (%)	19,3	36,4	51,6	40,2	22,7	26,7	30,0	37,6	38,1	18,2	31,4	43,4
CV _{subparcela} (%)	21,4	25,0	23,8	23,8	20,7	19,5	20,5	25,3	22,6	23,5	24,2	26,2

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Tabela 24. Teor de zinco (Zn) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos Aplicação (A)	2 meses				12 meses				23 meses			
	Camadas				Camadas				Camadas			
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
Zn (mg dm ⁻³)												
Incorporada	0,9	0,9	0,8	0,4 a	0,9 b	0,9 a	0,7 a	0,6 a	1,3 a	1,0 a	0,8 a	0,4 a
Superfície	1,3	0,9	0,7	0,4 a	1,8 a	1,1 a	0,7 a	0,7 a	1,4 a	1,0 a	0,8 a	0,5 a
F	58,3**	0,0 ^{ns}	8,4 ^{ns}	0,3 ^{ns}	21,0*	1,0 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,4 ^{ns}	1,9 ^{ns}	0,1 ^{ns}	1,1 ^{ns}	0,3 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	1,1	0,8	0,7	0,5 a	1,1 a	1,0 a	0,7 a	0,5 a	1,3 a	0,9 a	0,8 a	0,5 a
EA	1,2	1,1	1,0	0,4 a	1,2 a	0,9 a	0,9 a	0,7 a	1,6 a	1,3 a	0,8 a	0,4 a
EAF	1,3	1,0	0,9	0,4 a	1,7 a	1,2 a	0,8 a	0,6 a	1,3 a	1,1 a	0,8 a	0,5 a
EFP	1,0	0,8	0,7	0,4 a	1,1 a	1,0 a	0,7 a	0,7 a	1,0 a	0,9 a	0,8 a	0,6 a
W	1,0	0,9	0,7	0,5 a	1,7 a	0,9 a	0,8 a	0,6 a	1,1 a	0,9 a	0,7 a	0,5 a
CDC	1,0	0,8	0,7	0,3 a	1,1 a	0,8 a	0,6 a	0,5 a	1,4 a	1,0 a	0,7 a	0,3 a
CD	1,3	0,9	0,8	0,4 a	1,3 a	1,0 a	0,7 a	0,6 a	1,3 a	1,2 a	0,9 a	0,4 a
T	1,1	0,9	0,7	0,4 a	1,4 a	1,1 a	0,8 a	0,6 a	1,8 a	0,9 a	0,9 a	0,5 a
F	1,6 ^{ns}	1,6 ^{ns}	2,2 ^{ns}	0,7 ^{ns}	1,3 ^{ns}	1,1 ^{ns}	1,3 ^{ns}	1,0 ^{ns}	1,3 ^{ns}	1,3 ^{ns}	0,8 ^{ns}	1,7 ^{ns}
Interação Ax C	2,7*	2,5*	2,4*	1,8 ^{ns}	1,3 ^{ns}	0,8 ^{ns}	1,7 ^{ns}	1,7 ^{ns}	1,8 ^{ns}	2,4 ^{ns}	0,5 ^{ns}	1,6 ^{ns}
CV _{parcela} (%)	18,8	38,5	28,7	65,8	54,7	59,9	39,0	96,5	38,3	25,8	20,7	58,0
CV _{subparcela} (%)	24,4	22,1	31,4	36,9	47,9	28,0	26,8	39,3	48,8	34,1	32,1	37,3

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

O teor de Fe diminuiu com a aplicação dos corretivos de acidez do solo. A redução no teor de Fe com o AG, EA e EFP foi menor do que com o CD e CDC, o que pode ser em razão da menor alteração do pH do solo bem como a possível liberação de Fe contido na composição química destes materiais. A EA possuía $193.500 \text{ mg kg}^{-1}$ de Fe em sua composição, valor elevado em relação aos demais materiais, embora a sua aplicação não diferiu significativamente do tratamento testemunha, observa-se na amostragem de dois meses que as médias com aplicação da EA foram superiores, o que demonstra que o aumento no teor de Fe pode ter sido em razão da liberação deste micronutriente pela EA. Este resultado fica evidente pelo aumento da absorção de Fe pela soja (safra 2012/2013) no tratamento com aplicação da EA (Tabela 43).

Após dois meses da aplicação dos corretivos, na camada de 5-10 cm, houve interação significativa entre a aplicação e corretivos para o teor de Fe. Neste desdobramento (Tabela 25), verifica-se que a aplicação em superfície do AG, EA, EFP, W e CDC levou ao maior teor de Fe; a incorporação dos corretivos não proporcionou diferenças entre o material utilizado, no entanto, na aplicação em superfície destacou-se a EA.

A aplicação dos corretivos em superfície proporcionou maior teor de Zn na camada de 0-5 cm de solo aos 12 meses (Tabela 24). A interação modo de aplicação e corretivos mostrou-se significativa (Tabela 25) nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm aos dois meses após a aplicação dos corretivos. Na profundidade 0-5 cm o maior teor de Zn ocorreu quando o corretivo foi aplicado em superfície com a EAF, CDC e CD, entretanto, ao aumentar a profundidade o resultado variou com o corretivo e a interação ocorreu apenas para a EA, EAF e EFP.

Tabela 25. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para os teores de Fe na camada de 0-5 cm, Mn na camada de 20-40 cm e Zn nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

Corretivos ¹	2 meses		23 meses		0-5 cm		2 meses		10-20 cm	
	5-10 cm		20-40 cm				5-10 cm			
	Aplicação*									
	I	S	I	S	I	S	I	S	I	S
	Fe (mg dm ⁻³)		Mn (mg dm ⁻³)		Zn (mg dm ⁻³)					
AG	23 Ba	31 Ab	17,8 Ba	33,1 Aa	0,9 Aa	1,3 Aab	0,9 Aa	0,8 Aab	0,7 Aa	0,6 Aab
EA	28 Ba	42 Aa	22,6 Aa	16,4 Ab	1,1 Aa	1,3 Aab	1,1 Aa	1,0 Aab	1,2 Aa	0,8 Bab
EAF	26 Aa	30 Ab	15,8 Ba	26,6 Aab	0,8 Ba	1,7 Aa	0,8 Ba	1,2 Aa	0,7 Aa	1,0 Aa
EFP	21 Ba	31 Ab	25,7 Aa	24,3 Aab	1,1 Aa	1,0 Ab	1,0 Aa	0,6 Bb	1,0 Aa	0,4 Bb
W	19 Ba	32 Ab	22,4 Aa	23,6 Aab	0,9 Aa	1,1 Aab	0,9 Aa	0,9 Aab	0,8 Aa	0,6 Aab
CDC	19 Ba	29 Ab	17,1 Aa	24,5 Aab	0,8 Ba	1,2 Aab	0,8 Aa	0,9 Aab	0,7 Aa	0,6 Aab
CD	21 Aa	22 Ab	26,8 Aa	25,5 Aab	1,0 Ba	1,7 Aa	0,9 Aa	0,8 Aab	0,7 Aa	0,8 Aab
T	28 Aa	31 Ab	25,1 Aa	20,1 Aab	0,8 Ba	1,4 Aab	0,8 Aa	0,9 Aab	0,8 Aa	0,6 Aab

* I: incorporada; S: superficial; ¹AG: agrosilício, EA: escória de aciaria, EAF: escória de alto forno, EFP: escória forno de panela, W: wollastonita, CDC: calcário dolomítico calcinado, CD: calcário dolomítico, T: testemunha. Letras maiúsculas correspondem às comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo. Letras minúsculas correspondem às comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo de aplicação pelo teste de Tukey p> 0,05.

6.2 Metais pesados no solo e no tecido vegetal do feijoeiro, da aveia preta e da soja.

A presença de metais pesados em escórias de siderurgia é um dos problemas quanto ao seu uso que, em teores elevados, podem tornar-se tóxicos e limitar seu uso na atividade agrícola. Os resíduos siderúrgicos possuem composição química muito variável em razão dos distintos processos para sua obtenção, tornando-se importante a quantificação desses elementos no solo e nas culturas. Os teores de metais pesados tóxicos encontrados nos materiais corretivos (Tabela 3) estão abaixo dos limites máximos admitidos em corretivos de acidez, silicato de cálcio, silicato de magnésio, carbonato de cálcio e magnésio e escória silicatada (BRASIL, 2006).

No solo, os teores de Cd, Ni e Pb não apresentaram variação entre o modo de aplicação dos corretivos (Tabelas 26) enquanto que para o Cr e o Hg foram detectados apenas traços.

Tabela 26. Teores de metais pesados no solo, na camada de 0 a 20 cm de profundidade, após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílicio (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos	2 meses			12 meses			23 meses		
	Cd	Ni	Pb	Cd	Ni	Pb	Cd	Ni	Pb
Aplicação (A)	-----mg dm ⁻³ -----								
Incorporada	0,006 a	0,37 a	0,13 a	0,011 a	0,19 a	0,45 a	0,010 a	0,20 a	0,44 a
Superfície	0,006 a	0,42 a	0,17 a	0,013 a	0,22 a	0,49 a	0,010 a	0,22 a	0,44 a
F	0,02 ^{ns}	1,16 ^{ns}	5,79 ^{ns}	1,0 ^{ns}	6,4 ^{ns}	2,7 ^{ns}	1,0 ^{ns}	2,5 ^{ns}	0,2 ^{ns}
Corretivos (C)									
AG	0,006 a	0,43 a	0,16 a	0,013 a	0,22 a	0,44 c	0,011 a	0,22 a	0,45 a
EA	0,006 a	0,40 ab	0,15 a	0,011 a	0,22 a	0,48 bc	0,011 a	0,20 a	0,44 a
EAF	0,006 a	0,47 a	0,16 a	0,013 a	0,24 a	0,53 ab	0,009 a	0,21 a	0,40 a
EFP	0,006 a	0,41 ab	0,15 a	0,013 a	0,20 a	0,44 c	0,011 a	0,21 a	0,46 a
W	0,006 a	0,39 ab	0,15 a	0,014 a	0,18 a	0,42 c	0,011 a	0,20 a	0,40 a
CDC	0,005 a	0,28 b	0,14 a	0,011 a	0,18 a	0,44 c	0,009 a	0,19 a	0,45 a
CD	0,005 a	0,40 ab	0,14 a	0,010 a	0,19 a	0,45 c	0,009 a	0,18 a	0,39 a
T	0,006 a	0,41 ab	0,16 a	0,011 a	0,23 a	0,55 a	0,010 a	0,24 a	0,54 a
F	0,5 ^{ns}	2,9 [*]	2,1 ^{ns}	0,5 ^{ns}	2,3 ^{ns}	9,8 ^{**}	0,9 ^{ns}	0,7 ^{ns}	2,0 ^{ns}
AxC	1,1 ^{ns}	2,1 ^{ns}	2,9 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,7 ^{ns}	2,3 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,9 ^{ns}
CVparcela (%)	51,9	42,3	37,1	42,1	20,2	23,4	12,3	25,9	10,0
CVsubparcela (%)	35,3	22,9	10,9	37,9	20,9	9,2	36,9	33,9	22,4

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

O aumento nos valores de pH e da CTC do solo com a aplicação dos corretivos de acidez, exceto a EAF, possibilitou maior adsorção dos metais pesados catiônicos pelos colóides do solo. Observa-se que o CDC reduziu o teor de Ni do solo, também houve redução no teor de Pb com a aplicação dos corretivos, exceto para a EAF, o que é explicado pela EAF não ter modificado o pH do solo. No solo, os metais pesados podem ser adsorvidos por meio de reações específicas (quimiossorção) influenciadas pelo pH do solo ou não-específicas (SPOSITO, 2008). O pH, a CTC e a presença de cátions afetam a adsorção e a especiação iônica de metais pesados nos solos (SILVEIRA et al., 2003).

Em solos intemperizados, como o do presente estudo, a presença de colóides com cargas dependentes de pH chegam a representar mais de 70% do total de pontos de ligação de cátions. Assim, neste tipo de solo, a correção da acidez assume grande importância na adsorção dos metais pesados (CORRÊA et al., 2008c).

Amaral Sobrinho et al. (1997) observaram que após dezoito meses de incubação de um Argissolo, antigo Podzólico Vermelho-Amarelo, com resíduos siderúrgicos, a solubilidade do Zn, Mn, Pb, Ni, Cd e Cu diminuiu devido à passagem da forma trocável para as formas retidas em óxidos e residual, explicado pelo fenômeno de quimiossorção influenciado pelo pH do solo.

Os teores de metais pesados encontrados no solo (Tabela 26) estão abaixo do limite permitido pela CETESB (2014). Os resultados obtidos assemelham-se aos obtidos por Corrêa et al. (2008c), e também, corroboram aos de Sobral et al. (2011) que constataram que, a aplicação de 8 Mg ha⁻¹ e 4 Mg ha⁻¹ de escória de aciaria, respectivamente, não aumentou a disponibilidade de metais pesados do solo.

Em razão da baixa disponibilidade dos metais pesados no solo, não houve fitodisponibilidade desses elementos ao feijoeiro, e às plantas de aveia preta e soja (Tabela 27). O modo de aplicação dos corretivos alterou os teores de Pb no feijoeiro, havendo maior teor com a aplicação incorporada, para a aveia preta, no ciclo de 2013, ocorreu maior teor de Ni com aplicação em superfície.

Tabela 27. Teores de metais pesados na parte aérea do feijoeiro (verão 2011), aveia preta (inverno 2011, 2012 e 2013), soja (verão 2011/2012 e 2012/2013), em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

	Feijoeiro (2011)				Aveia (2011)			Soja (2011/2012)	Aveia (2012)		Soja (2012/2013)	Aveia (2013)		
Tratamentos ⁽¹⁾	Cr	Pb	Ni	Cd	Cr	Pb	Ni	Ni	Ni	Cr	Ni	Cd	Cr	Ni
Aplicação (A)	-----mg kg ⁻¹ -----													
Incorporada	0,88 a	0,15 a	0,85	0,04 a	1,04 a	0,90	1,29 a	5,4 a	0,75 a	0,43	2,87 a	0,06 a	0,47 a	0,76 b
Superfície	0,82 a	0,08 b	1,68	0,05 a	0,90 a	0,56	1,23 a	5,8 a	0,99 a	0,46	2,51 a	0,06 a	0,76 a	1,30 a
F	1,2 ^{ns}	14,2*	44,6*	0,2 ^{ns}	1,6 ^{ns}	8,4 ^{ns}	1,0 ^{ns}	1,2 ^{ns}	2,9 ^{ns}	0,2 ^{ns}	2,5 ^{ns}	0,5 ^{ns}	7,1 ^{ns}	20,9*
Corretivos (C)														
AG	0,93 a	0,10 a	1,29	0,03 a	0,89 a	0,68	1,08 b	5,1 a	0,71 b	0,49	1,98 cd	0,06 a	0,41 a	0,50 b
EA	0,83 a	0,10 a	1,22	0,06 a	0,77 a	0,54	1,35 ab	5,6 a	0,80 ab	0,56	2,81 bc	0,06 a	0,70 a	0,95 ab
EAF	0,83 a	0,11 a	1,93	0,06 a	1,06 a	0,72	1,32 ab	5,6 a	1,05 ab	0,52	3,42 b	0,06 a	0,33 a	0,94 ab
EFP	0,84 a	0,17 a	1,02	0,04 a	1,05 a	0,51	1,20 b	4,8 a	0,69 b	0,51	2,05 cd	0,06 a	0,89 a	2,00 a
W	0,84 a	0,12 a	1,35	0,04 a	0,93 a	1,11	1,28 ab	5,8 a	0,91 ab	0,34	2,24 bcd	0,06 a	0,66 a	0,81 ab
CDC	0,90 a	0,10 a	1,05	0,03 a	0,87 a	0,77	1,22 ab	5,0 a	0,85 ab	0,32	2,40 bcd	0,06 a	0,49 a	1,09 ab
CD	0,83 a	0,14 a	0,78	0,03 a	1,01 a	0,42	0,97 b	6,3 a	0,77 ab	0,49	1,39 d	0,07 a	0,82 a	0,79 ab
T	0,82 a	0,08 a	1,48	0,06 a	1,20 a	1,07	1,68 a	6,3 a	1,18 a	0,32	5,24 a	0,06 a	0,63 a	1,13 ab
F	1,3 ^{ns}	1,9 ^{ns}	6,3**	3,0 ^{ns}	2,1 ^{ns}	5,9**	4,1**	0,9 ^{ns}	2,8*	2,3 ^{ns}	16,0**	0,4 ^{ns}	1,0 ^{ns}	2,4*
AxC	1,1 ^{ns}	1,7 ^{ns}	6,7**	1,5 ^{ns}	0,2 ^{ns}	3,2**	0,9 ^{ns}	1,0 ^{ns}	0,7 ^{ns}	4,8**	0,4 ^{ns}	1,3 ^{ns}	1,3 ^{ns}	2,1 ^{ns}
CVparcela (%)	24,8	65,1	39,1	69,5	45,9	64,8	19,9	25,0	66,4	57,9	33,7	38,1	68,9	45,7
CVsubparcela (%)	11,9	55,2	30,6	52,4	26,6	40,3	23,0	30,6	33,2	41,4	31,3	34,1	86,2	77,8

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Analisando o desdobramento da interação corretivo x modo de aplicação (Tabela 28), verifica-se que a aplicação superficial de AG, EA, EAF, EFP, W e CDC proporcionaram teor de Ni superior à aplicação incorporada. Esse resultado pode estar relacionado ao pH do solo. Embora sem diferença estatística entre o modo de aplicação dos corretivos para os valores de pH (Tabela 25), os valores de pH foram superiores nas camadas 5-10 e 10-20 cm com a aplicação incorporada, esse pequeno aumento no pH, pode ter favorecido a adsorção de Ni com maior intensidade do que no tratamento com aplicação superficial, ocasionando a diferença significativa entre os modos de aplicação observados na Tabela 28.

Tabela 28. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para os teores de Ni nas folhas do feijoeiro, Pb na parte aérea da aveia preta (inverno 2011) e de Cr na parte aérea da aveia preta (inverno 2012).

	Feijoeiro (verão 2011)		Aveia (inverno 2011)		Aveia (inverno 2012)	
Corretivos*	Aplicação					
	Incorporada	Superfície	Incorporada	Superfície	Incorporada	Superfície
	Ni (mg kg ⁻¹)		Pb (mg kg ⁻¹)		Cr (mg kg ⁻¹)	
AG	0,74 Bbc	1,85 Aabc	0,86 Ab	0,50 Aab	0,62 Aab	0,36 Ab
EA	0,86 Bbc	1,57 Abcd	0,59 Ab	0,49 Aab	0,40 Bab	0,73 Aa
EAF	1,27 Bab	2,58 Aa	0,86 Ab	0,59 Aab	0,70 Aa	0,34 Bb
EFP	0,48 Bbc	1,56 Abcd	0,57 Ab	0,45 Aab	0,28 Bab	0,73 Aa
W	0,66 Bbc	2,04 Aab	1,70 Aa	0,53 Bab	0,37 Aab	0,32 Ab
CDC	0,37 Bc	1,74 Aabcd	1,03 Ab	0,52 Bab	0,22 Ab	0,41 Ab
CD	0,62 Abc	0,95 Ad	0,48 Ab	0,36 Ab	0,58 Aab	0,40 Ab
T	1,81 Aa	1,14 Bcd	1,10 Aab	1,04 Aa	0,29 Aab	0,36 Ab

* AG: agrosilício, EAC: escória de aciaria, EAF escória de alto forno, EFP: escória forno de panela, W: wollastonita, CDC: calcário dolomítico calcinado, CD: calcário dolomítico, T: testemunha. Letras maiúsculas correspondem às comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo. Letras minúsculas correspondem às comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo de aplicação pelo teste de Tukey p> 0,05.

Comparando os materiais corretivos houve alteração significativa nos teores de Ni no tecido foliar da aveia em 2011, 2012 e 2013 e da soja em 2012. A aplicação dos corretivos de acidez do solo tendeu a reduzir a disponibilidade desses metais pesados (Tabela 27). Como já mencionado anteriormente o aumento do pH do solo ocasionado pela adição das escórias e calcários pode ter favorecido a transformação desses elementos das formas mais solúveis para as de menor solubilidade, tornando-os indisponíveis às plantas.

Foram detectados apenas traços de Cd para as culturas de aveia preta no ciclo de 2011 e 2012 e soja no ciclo de 2011 e 2012; Cr na cultura da soja no ciclo 2011 e 2012; Pb na culturas da soja em 2011 e 2012 e aveia preta no ciclo de 2012 e 2013; para o Hg foram encontrados apenas traços para todas as culturas em sucessão.

Com base nos resultados conclui-se que não há problemas de contaminação com o uso das escórias de siderurgia, EA, EFP, EAF e AG, podendo até mesmo diminuir o teor de Cd, Ni, Pb, Cr e Hg em razão dos benefícios ocasionados sobre a correção da acidez do solo

6.3 Silício

6.3.1 Silício no solo

As escórias de siderurgia aumentaram o teor de Si no solo (Tabela 29). A incorporação do AG e EFP distribuiu as partículas destes corretivos até a camada de 10-20 cm de profundidade, possibilitando o aumento de Si nesta camada de solo, o que, também, pode ter contribuído para o maior teor de Si observado na camada de 20-40 cm em relação à aplicação superficial aos dois meses após aplicação dos corretivos (Tabela 29).

O AG, a EA e EFP foram os materiais que disponibilizaram mais rapidamente o Si para o solo, fato observado aos dois meses nas camadas de 0-5; 5-10 e 10-20 cm. Quando se tem fontes que reagem mais rapidamente no solo pode-se esperar um feito residual menor, contudo, nota-se que, após 23 meses da aplicação, estas escórias continuavam a fornecer Si para o solo (Tabela 29).

A dose para cada corretivo foi calculada para elevar a saturação por bases do solo à 70%, e pelo fato de cada material corretivo possuir distinto teor de silício total em sua composição (Tabela 2), a dose de silício fornecida com a aplicação dos corretivos variaram. O fornecimento de aproximadamente 300 e 500 kg ha⁻¹ de Si a mais com a aplicação da EFP em relação à EA e AG, respectivamente, não refletiu na diferenciação entre esses corretivos na disponibilidade de Si no solo. Além do fato de não poder afirmar que todo o Si contido no material está na forma disponível, este resultado também pode ser atribuído à solubilidade distinta entre as escórias.

Resultados semelhantes foram relatados por PEREIRA et al. (2004) que, ao estudar 10 tipos de escórias de siderurgia, aplicadas na dose de 125 kg de Si ha⁻¹ em um Neossolo Quartzarênico Órtico, verificaram variação na disponibilidade

de Si no solo e na absorção por plantas de arroz, evidenciando que os materiais possuíam solubilidade variada. De acordo com Korndörfer et al. (2003) as escórias de alto forno, normalmente possuem maiores concentrações de Si, todavia, com baixa solubilidade, as de aciaria possuem menores concentrações, porém, com maior solubilidade. Entre as escórias de aciaria, também há variação nos teores e solubilidade do Si, enquanto que as escórias do aço inox são as que apresentam o Si na forma mais solúvel.

A EAF foi aplicada em dose elevada, por ter baixo valor de PRNT e, com isso, a dose em Si também foi maior, pelo fato de esse material possuir 15% de Si total. Contudo, não houve acréscimos significativos no teor de Si no solo nas avaliações aos dois e 12 meses. Dois pontos podem ser levantados a fim de explicar esse fato: um deles seria a forma como o material se apresentava (partículas grosseiras), que pode ter dificultado a solubilização do material e a liberação do elemento; outra explicação seria que o Si não estava na forma disponível. O teor de Si total em um material não significa que este estará na forma disponível, sendo que ele pode estar na forma amorfa com alto grau de organização, cuja liberação para a solução do solo é lenta.

Todavia, o Si apareceu no tecido vegetal do feijoeiro com a aplicação da EAF, onde constatou-se também, aumento de Si no feijoeiro pela W (Tabela 31) sem que houvesse acréscimos no solo (Tabela 29). A partir desses resultados, infere-se que a metodologia utilizada para a extração de silício disponível no solo possa não estar sendo adequada para expressar o teor de Si disponível para a planta. Embora o extrator cloreto de cálcio $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ proporcione maiores correlações entre o Si extraído no solo e a quantidade de silício absorvida pela planta (PEREIRA et al., 2007), os resultados ainda não são satisfatórios. Em estudos com extratores de Si no solo, o CaCl_2 tem apresentado estreita faixa de extração de Si, (NARAYANASWAMY e PRAKASH, 2010; RODRIGUES et al., 2003).

A estreita amplitude influencia a exatidão da análise, pois pode promover erros de análises. Pereira et al. (2007) verificaram que o ácido acético extraiu os maiores teores de Si, entre 20 e 38 mg kg^{-1} , da wollastonita aplicada ao solo, enquanto o CaCl_2 foi o que apresentou a menor extração, com teores entre 1,2 e $2,3 \text{ mg kg}^{-1}$. Isto ocorre porque o cloreto de cálcio apresenta baixo coeficiente de determinação, e a menor concentração de Si na solução pode acarretar erros de leitura na determinação (KORNDÖRFER et al., 1999).

Tabela 29. Teor de silício (Si) no solo após 2, 12 e 23 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos	Camadas (cm)											
	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40	0-5	5-10	10-20	20-40
	2 meses				12 meses				23 meses			
	Si (mg kg ⁻¹)											
Aplicação (A)												
Incorporada	8,9 a	9,2 a	7,3	7,4 a	8,3 a	8,2 a	7,4 a	7,2 a	11,1 b	12,8 a	10,8 a	8,2 a
Superfície	9,5 a	8,2 a	8,3	6,6 b	10,1 a	8,2 a	6,7 a	7,0 a	13,0 a	10,9 a	10,0 a	8,6 a
F	1,8 ^{ns}	6,1 ^{ns}	5,8 ^{ns}	17,5*	6,2 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,1 ^{ns}	28,9*	5,3 ^{ns}	3,2 ^{ns}	2,9 ^{ns}
Corretivos (C)												
AG	11,1 a	10,5 a	8,6	8,0 a	11,8 ab	9,9 ab	6,7 ab	7,9 ab	13,9 ab	14,1 ab	11,4 a	8,8 a
EA	10,5 ab	10,4 a	9,4	7,3 abc	10,9 ab	9,4 abc	7,5 ab	7,5 abc	15,3 a	14,4 a	11,3 a	9,0 a
EAF	7,5 c	7,6 b	7,3	6,5 bc	6,7 cd	6,7 d	6,6 ab	6,5 bc	11,8 ab	11,3 bc	10,0 ab	8,1 a
EFP	12,2 a	10,9 a	9,3	7,6 ab	12,4 a	10,8 a	8,0 ab	8,3 a	14,6 ab	14,2 ab	11,6 a	8,8 a
W	7,9 c	8,1 b	6,9	6,1 c	9,2 bc	7,9 bcd	8,2 a	7,2 abc	10,9 bc	11,7 abc	10,8 ab	8,5 a
CDC	8,6 bc	7,5 b	7,6	7,1 abc	8,2 cd	7,3 d	7,3 ab	7,3 abc	10,8 bc	11,3 bc	9,7 ab	8,2 a
CD	8,4 bc	7,5 b	6,8	6,6 abc	8,1 cd	7,4 cd	6,3 ab	6,1 d	11,4 abc	10,2 cd	9,7 ab	8,0 a
T	7,1 c	7,1 b	7,0	6,8 abc	6,4 d	6,3 d	6,0 b	6,0 d	7,7 c	7,9 d	9,0 b	7,7 a
F	15,5**	12,5**	10,6**	3,8**	14,7**	13,1**	2,9*	5,7 ^{ns}	7,7**	11,2**	4,4**	1,6 ^{ns}
Interação Ax C	0,9 ^{ns}	2,2 ^{ns}	2,6*	1,9 ^{ns}	2,1 ^{ns}	1,6 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,7 ^{ns}	0,7 ^{ns}	1,6 ^{ns}	1,7 ^{ns}	1,2 ^{ns}
CV _{parcela} (%)	19,1	18,1	21,1	11,1	32,4	28,4	38,1	39,3	11,9	27,9	17,4	9,8
CV _{subparcela} (%)	14,7	14,6	11,9	12,8	18,3	15,4	18,7	13,9	20,9	16,2	12,2	12,3

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Após 23 meses da aplicação da EAF houve aumento do teor de Si no solo em 34% e 30% em relação ao tratamento testemunha nas camadas 0-5 e 5-10 cm, respectivamente. Este acréscimo mostra que esta escória começou a reagir e o Si liberado ao solo foi absorvido pelas plantas de aveia no ciclo de 2012 (Tabela 31).

O aumento no teor de Si aos 23 meses com o CDC em relação à testemunha, na camada de 5-10 cm, pode ser em razão ao aumento do pH do solo que promove a polimerização do Si e a formação de complexos de alumínio-silicatos que podem ter influência na solubilidade e disponibilidade de Si (PEREIRA et al., 2010b).

Houve efeito significativo da interação aplicação x corretivos sobre o teor de Si no solo na camada de 10-20 cm, aos dois meses após a aplicação dos corretivos (Tabela 30). A incorporação do AG e EFP favoreceu o aumento de Si no solo.

Tabela 30. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para o teor de silício (Si) no solo, na camada de 10-20 cm, aos dois meses após aplicação dos corretivos.

Corretivos	Aplicação	
	Incorporada	Superfície
	-----Si (mg kg ⁻¹) -----	
AG	9,8 Aab	7,5 Bab
EA	9,8 Aab	9,0 Aa
EAF	7,8 Ac	6,8 Ab
EFP	10,8 Aa	7,8 Bab
W	7,0 Abc	6,8 Ab
CDC	7,8 Abc	7,5 Aab
CD	7,0 Ac	6,5 Ab
T	7,0 Ac	7,0 Aab

*AG: agrosilício, EA: escória de aciaria, EAF escória de alto forno, EFP: escória forno de panela, W: wollastonita, CDC: calcário dolomítico calcinado, CD: calcário dolomítico, T: testemunha. Letras maiúsculas correspondem às comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo. Letras minúsculas correspondem às comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo de aplicação pelo teste de Tukey $p > 0,05$

6.3.2 Silício na planta

Houve diferença significativa entre os corretivos de acidez sobre o teor de silício no tecido vegetal do feijoeiro, da aveia preta no ciclo de 2012 e da soja no ciclo 2012/2013 (Tabela 31).

Tabela 31. Teor de silício (Si) na parte do feijoeiro, soja e aveia preta em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos	Feijoeiro		Aveia Preta		Soja	
	2011	2011	2012	2013	2011/2012	2012/2013
Aplicação (A)	-----Si (g kg ⁻¹)-----					
Incorporada	5,6 a	5,0 a	8,2 a	9,3 a	7,9 a	6,7 a
Superfície	4,9 a	4,8 a	7,9 a	8,9 a	9,0 a	6,4 a
F	1,5 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,7 ^{ns}	1,3 ^{ns}	1,5 ^{ns}	2,0 ^{ns}
Corretivos (C)						
AG	5,2 ab	5,6 a	8,1 ab	10,1a	8,5 a	6,3 ab
EA	6,2 a	5,3 a	8,3 ab	9,3 a	8,6 a	7,7 a
EAF	6,4 a	5,1 a	8,9 a	9,3 a	9,0 a	6,3 ab
EFP	5,3 ab	5,1 a	7,7 ab	9,4 a	8,5 a	7,4 a
W	6,6 a	5,1 a	7,4 ab	8,2 a	8,5 a	6,6 ab
CDC	4,2 ab	4,5 a	8,2 ab	8,9 a	8,5 a	6,8 ab
CD	3,5 b	4,3 a	7,0 b	9,0 a	7,2 a	6,1 ab
T	4,6 ab	4,4 a	8,5 ab	8,6 a	8,6 a	5,2 b
F	3,6**	2,2 ^{ns}	2,8*	1,1 ^{ns}	1,3 ^{ns}	4,3**
AxC	0,4 ^{ns}	2,0 ^{ns}	1,2 ^{ns}	0,7 ^{ns}	1,3 ^{ns}	2,2 ^{ns}
CVparcela (%)	41,8	36,3	15,6	13,2	42,1	8,9
CVsubparcela (%)	32,3	17,2	13,2	16,9	14,9	16,6

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

No feijoeiro verificou-se que a W proporcionou o maior teor de Si (6,6 g kg⁻¹), seguido por valores próximos quando utilizado a EAF e EA, no entanto, estes corretivos não diferiram do tratamento testemunha. Para a aveia preta o maior teor de Si foi obtido com a EAF, no entanto, também não se diferenciou do tratamento testemunha.

O fornecimento de P ao solo por meio da adubação de semeadura da soja pode ter favorecido a ação do P no deslocamento de Si dos sítios de adsorção na fase sólida para a solução do solo, visto que, o P ocupa os mesmos sítios de adsorção que o Si e tem maior afinidade com o colóide, podendo deslocar, o Si adsorvido (GUTIERREZ et al., 2011), consequentemente, pode ter havido maior absorção de Si pelas plantas do tratamento testemunha, ocasionando a ausência de diferença significativa entre os tratamentos que receberam aplicação de silicatos com o tratamento testemunha para o feijoeiro, para a aveia preta e para a soja no primeiro ciclo (2011/2012) (Tabela 31). Observa-se que no tratamento sem aplicação de corretivo

houve aumento de 48% de Si nas plantas de aveia preta do ciclo de 2011 para o ciclo de 2012.

Apenas a EA e a EFP promoveram incrementos significativos de Si nas plantas em relação ao tratamento testemunha, para a soja (ciclo 2012/2013). O CDC foi semelhante às escórias no fornecimento de Si para o feijoeiro, aveia-preta e soja (Tabela 31). Castro e Crusciol (2013b) também verificaram aumento no teor de Si no solo e em plantas de soja com aplicação de calcário. O aumento nos teores de Si com a aplicação do calcário 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).

6.3.3 Extratores de Si no solo

O teor de Si variou com a solução extratora utilizada, em que a resina extraiu pouco enquanto o ácido acético propiciou os maiores teores de Si, com valor extremamente alto para a EAF (Tabela 32). A correlação simples entre os teores de silício na parte aérea da soja (ciclo 2012/2013) e os teores de silício no solo extraídos por CaCl_2 , ácido acético e resina não foram significativos, apresentando valores de 0,17; -0,05 e 0,11, respectivamente. Os resultados diferem dos verificados por Barbosa Filho et al. (2001), que ao avaliarem extratores de Si em solos com e sem aplicação de silicato de cálcio concluíram que a extração com ácido acético foi a mais eficiente. Entretanto assemelham-se aos constatados por Pereira et al. (2004) que verificaram que o ácido acético superestimou o teor de Si em solos corrigidos com calcário, e em solos que receberam a aplicação de fontes ricas em alumino-silicatos como as escórias de alto-forno.

O processo de extração por CaCl_2 empregado na Austrália (BERTHELSEN et al., 2002) difere da realizada no Brasil (KORNDÖRFER et al., 2004) pelo tempo e velocidade de agitação. Embora a velocidade de agitação seja menor no método Australiano, o tempo de agitação é bem superior. A agitação por 16 horas permitiu maior tempo de contato solo/extrator, o que contribuiu para que a EAF proporcionasse o maior teor de Si, inclusive sendo superior à EFP, que de acordo com o resultado obtido no Brasil na avaliação de 23 meses (Tabela 29), havia sido a fonte mais eficiente na liberação de Si juntamente com a EA e AG.

Tabela 32. Teor de silício (Si) no solo extraído por CaCl_2 , ácido acético e resina coletados na camada de 0-20 cm após 23 meses da aplicação incorporada e em superfície dos corretivos de acidez do solo.

Tratamentos	Si (mg kg^{-1})		
Aplicação	CaCl_2	Ácido Acético	Resina
Incorporada	15,4 a	33,1 a	0,7 a
Superfície	16,1 a	37,0 a	0,9 a
F	1,0 ^{ns}	1,1 ^{ns}	3,3 ^{ns}
Corretivos			
Agrosilício	18,3 ab	35,3 b	1,0 ab
Escória de aciaria	18,3 ab	33,4 b	1,2 a
Escória de alto forno	22,6 a	111,2 a	0,6 ab
Escória forno de panela	17,4 bc	28,4 bc	0,6 ab
Calcário dolomítico calcinado	13,2 cd	16,8 bc	0,7 ab
Calcário dolomítico	11,4 d	18,7 bc	0,9 ab
Wollastonita	14,0 bcd	27,5 bc	0,7 ab
Testemunha	10,5 d	9,0 c	0,5 b
F	14,5**	51,4**	3,1*
CV parcela	16,4	35,9	59,7
CV subparcela	19,4	31,2	50,8

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Tais resultados destacam a dificuldade da escolha de um método para avaliar o Si disponível, porque, além do extrator, também é importante o tempo e velocidade de agitação, pH da solução e do solo, teor e tipo de argila, bem como o teor de M.O. (BERTHELSEN e KORNDÖRFER 2005).

Os resultados mostram a necessidade de estudos mais detalhados sobre metodologias de extração e quantificação do silício, que proporcionem melhoria nos resultados de silício disponível no solo.

6.4 Atributos físicos do solo: densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade.

A calagem, além de afetar os atributos químicos do solo, pode alterar as propriedades eletroquímicas, e conseqüentemente alterar os atributos físicos, pelo efeito na agregação das partículas e no sistema poroso do solo. Esta alteração poderá ser significativa ou não, dependendo da mineralogia do solo e da dose de corretivo aplicada Prado (2003).

Em solos tropicais, com predominância de óxidos de Fe e de Al e de caulinita no sistema coloidal, o pH é um fator importante a ser considerado, visto que as cargas positivas e negativas são dependentes do pH. O aumento do pH, aumenta as cargas negativas dos colóides, aumentando a repulsão eletrostática, conseqüentemente, a dispersão das argilas. Ocorre, também, a redução da atividade iônica do alumínio e do ferro, alterando, assim, o comportamento da dupla camada difusa, que torna-se mais espessa, mantendo, dessa maneira, os colóides afastados e dispersos. O ambiente torna-se favorável a dispersão de argila, o que, por meio da eluviação, torna possível a obstrução de poros em camadas inferiores, modificando o movimento de água no solo Prado (2003).

Contudo, a aplicação de corretivos de acidez do solo podem elevar os teores de Ca no solo, e este elemento pode atuar como ligante entre as partículas de argila, permitindo maior agregação do solo (OLIVEIRA, 2008). Além disso, os corretivos de acidez podem aumentar a produção de fitomassa das culturas, com aumento no teor de M.O que favorece a atividade microbiana, permitindo também, maior agregação do solo, uma vez que a microbiota pode excretar no solo compostos orgânicos agregantes (CASTRO FILHO et al., 1998).

Não houve alteração nos atributos físicos do solo em função do modo de aplicação dos corretivos (Tabela 33). O preparo do solo antecedendo a aplicação incorporada pode ter contribuído para alterações nas condições físicas logo no início da instalação do experimento, contudo, em razão dos 34 meses para a avaliação dos atributos físicos, provavelmente, o estabelecimento do SSD em ambos os modos de aplicação fez com que os sistemas se igualassem.

No presente estudo a densidade do solo não foi alterada pela aplicação dos corretivos, ficando em torno de $1,17 \text{ Mg m}^{-3}$ (Tabela 33). Ainda não há na literatura um consenso sobre o nível crítico da densidade do solo, sendo dependente principalmente de sua classe textural (REINERT et al., 2008). De Maria et al. (1999) consideraram crítico valores acima de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$, em Latossolo Vermelho antigo Latossolo Roxo. Argenton et al. (2005) verificaram que, em Latossolo Vermelho argiloso, a deficiência de aeração iniciou-se com densidade do solo próxima de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$. De acordo com Reichert et al. (2003), a densidade crítica para os solos argilosos está entre $1,30$ a $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$, para os franco-argilosos de $1,40$ a $1,50 \text{ Mg m}^{-3}$ e para os franco-arenosos de $1,70$ a $1,80 \text{ Mg m}^{-3}$. Enquanto que Reinert et al. (2008) verificaram, em um Argissolo Vermelho, que a densidade entre a faixa de $1,75$ e $1,85 \text{ Mg m}^{-3}$,

restringiu o crescimento radicular, com deformações na morfologia das raízes. De acordo com as citações acima os valores de densidade observados no presente estudo, para um Latossolo Vermelho textura argilosa, estão adequados.

Tabela 33. Médias de densidade do solo, porosidade total, microporosidade e macroporosidade, nas camadas de solo de 0-5 e 5-10 cm, após 34 meses da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos	Densidade do solo Mg m ⁻³		Porosidade total -----m ³ .m ³ -----		Microporosidade		Macroporosidade	
	Camadas (cm)							
Aplicação (A)	0-5	5-10	0-5	5-10	0-5	5-10	0-5	5-10
Incorporada	1,20 a	1,25 a	0,47 a	0,45 a	0,38 a	0,38 a	0,08 a	0,07 a
Superfície	1,14 a	1,20 a	0,49 a	0,48 a	0,38 a	0,38 a	0,10 a	0,09 a
F	6,7 ^{ns}	3,3 ^{ns}	1,8 ^{ns}	6,0 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,2 ^{ns}	1,7 ^{ns}	4,4 ^{ns}
Corretivos (C)								
AG	1,23 a	1,23 a	0,46 a	0,46 b	0,37 a	0,38 a	0,09 a	0,07 a
EA	1,20 a	1,25 a	0,49 a	0,46 b	0,40 a	0,37 a	0,09 a	0,09 a
EAF	1,21 a	1,25 a	0,47 a	0,46 b	0,38 a	0,39 a	0,09 a	0,08 a
EFP	1,14 a	1,19 a	0,48 a	0,46 b	0,40 a	0,38 a	0,08 a	0,08 a
W	1,10 a	1,22 a	0,50 a	0,46 b	0,39 a	0,37 a	0,11 a	0,09 a
CDC	1,23 a	1,24 a	0,43 a	0,46 b	0,35 a	0,38 a	0,08 a	0,08 a
CD	1,10 a	1,16 a	0,49 a	0,50 a	0,38 a	0,40 a	0,11 a	0,10 a
T	1,16 a	1,24 a	0,49 a	0,47 b	0,39 a	0,40 a	0,10 a	0,07 a
F	3,0 ^{ns}	1,5 ^{ns}	1,7 ^{ns}	2,6*	1,0	0,9 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,9
AxC	0,6 ^{ns}	1,0 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,7	1,2 ^{ns}	0,7 ^{ns}	1,4
CV _{parcela}	7,7	8,5	12,2	9,1	11,0	5,0	74,8	54,5
CV _{subparcela}	7,4	5,7	10,1	5,1	12,8	8,4	42,2	31,3

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) de probabilidade. ns- não significativo.

O conhecimento da densidade do solo é importante para verificar as condições que o solo se encontra e realizar relações com o crescimento da planta. O aumento da densidade leva ao aumento na compactação do solo, diminui a estruturação e porosidade total do solo. Essas alterações afetam propriedades físico-hídricas importantes, como a porosidade de aeração, a retenção de água no solo, a disponibilidade de água às plantas e a resistência do solo à penetração, com consequente restrição ao crescimento e desenvolvimento das plantas.

Quanto aos poros do solo, apenas a porosidade total foi alterada na camada de 5-10 cm com o CD (Tabela 33). Os valores de porosidade total,

microporosidade e macroporosidade estão próximo aos valores considerados adequados para o crescimento das plantas. A literatura cita como sendo o ideal valor entre 0,10 a 0,16 m^3m^{-3} para macroporosidade, de até 0,33 m^3m^{-3} para microporosidade e aproximadamente 0,50 m^3m^{-3} para porosidade total do solo (KIEHL, 1979).

O SSD pelo reduzido movimento do solo proporciona benefícios na qualidade do solo, mas, a compactação do solo continua provocando alterações nas propriedades físicas e a causa da compactação no SSD é normalmente atribuída ao tráfego de máquinas agrícolas em condições de alta umidade no solo (RICHART et al., 2005). Todavia, após alguns anos de implantação do SSD o maior aporte de M.O na camada superficial, favorece uma maior agregação do solo, melhorando a qualidade da estrutura e assim aumentando o valor da porosidade e diminuindo o valor da densidade do solo (STONE e SILVEIRA, 2001). Fato também relatado por Silveira et al. (2008) que observaram que o manejo com plantio direto contínuo provocou um aumento maior na densidade do solo, do que os sistemas em que o plantio direto estava associado ao preparo com arado, contudo, no com o passar do tempo, devido, em parte, ao aumento do teor de matéria orgânica nesse sistema a densidade do solo diminuiu com aumento na macroporosidade e microporosidade

A falta de resposta dos tratamentos nas propriedades físicas do solo pode ser atribuída ao fato dos corretivos não terem proporcionado acréscimos significativos na produção de matéria seca das plantas de aveia em relação ao tratamento testemunha (Tabelas 35 e 36), bem como nos acréscimos de M.O. no solo (Tabela 6).

A ausência de mudanças nos atributos físicos do solo com a calagem ou silicatagem observadas no presente estudo se opõe aos resultados obtidos por Correia et al. (2009b) que observaram aumento da porosidade total de um Latossolo Vermelho distrófico após 27 meses da aplicação superficial de escória de aciaria, de acordo com os autores o Ca presente na composição da escória contribuiu para o aumento da porosidade total do solo, beneficiando também a retenção de água e o aumento da agregação das partículas de solo. Efeitos positivos com o uso de calcário e silicato nas propriedades físicas do solo também foram relatados por Souza et al. (2012) que ao avaliarem níveis de densidade do solo observaram que os corretivos diminuíram os efeitos negativos ocasionados pela compactação do solo.

6.5 Diagnóstico foliar de nutrientes, componentes de produção e produtividade das culturas

6.5.1 Cultura do feijoeiro (Verão 2011)

Os teores de N, Mg (Tabela 34), Cu e Mn (Tabela 35) no tecido foliar do feijoeiro foram influenciados pela aplicação dos corretivos. A aplicação incorporada aumentou o teor de Ca, enquanto a superficial, aumentou o Mg (Tabela 34). O maior teor de Ca com a incorporação do corretivo de acidez em relação à sua aplicação na superfície também foi observada por Caíres et al. (2003), utilizando-se de calcário no cultivo da soja.

Tabela 34. Teores médios de macronutrientes foliares do feijoeiro em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S
Aplicação (A)	-----g kg ⁻¹ -----					
Incorporada	40 a	2,1 a	17 a	13 a	4,2 b	2,6 a
Superfície	39 a	2,2 a	16 a	11 b	4,9 a	2,7 a
F	0,3 ^{ns}	5,8 ^{ns}	7,9 ^{ns}	30,1*	82,9**	3,1 ^{ns}
Corretivos (C)						
AG	40 ab	2,2 a	16 a	12 a	4,4 bc	2,5 a
EA	40 ab	2,2 a	17 a	13 a	4,3 bc	2,9 a
EAF	38 ab	2,2 a	17 a	11 a	4,1 c	2,6 a
EFP	42 a	2,2 a	16 a	12 a	5,1 ab	2,5 a
W	41 ab	2,2 a	16 a	13 a	4,3 bc	2,8 a
CDC	42 a	2,1 a	18 a	12 a	5,4 a	2,5 a
CD	37 ab	2,2 a	17 a	12 a	4,8 abc	2,6 a
T	36 b	2,1 a	17 a	11 a	4,2 bc	2,8 a
F	3,6**	0,6 ^{ns}	1,1 ^{ns}	0,9 ^{ns}	4,9**	1,6 ^{ns}
AxC	0,9 ^{ns}	0,7 ^{ns}	0,7 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,8 ^{ns}
CVparcela (%)	12,4	12,4	16,6	12,2	6,4	14,2
CVsubparcela(%)	8,9	7,1	13,7	15,6	12,9	12,1

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Como observado na Tabela 34, não foram verificadas diferenças nos teores de N entre os corretivos utilizados, porém com a aplicação do CDC obteve-se o maior teor de N, diferindo significativamente do tratamento testemunha. O CDC

destacou-se com o maior teor de Mg no tecido foliar do feijoeiro, o que pode ser atribuído principalmente a sua composição química com 23,63% de MgO.

Tabela 35. Teores médios de micronutrientes foliares do feijoeiro em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamento	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Aplicação (A)	-----mg kg ⁻¹ -----				
Incorporada	43 a	10 a	118 a	105 a	26 a
Superfície	45 a	10 a	116 a	132 a	28 a
F	2,9 ^{ns}	1,3 ^{ns}	0,3 ^{ns}	1,9 ^{ns}	1,2 ^{ns}
Corretivos (C)					
AG	44 a	10 ab	112 a	112 b	25 a
EA	45 a	10 ab	109 a	121 ab	27 a
EAF	42 a	11 a	118 a	137 ab	28 a
EFP	44 a	10 ab	121 a	113 b	28 a
W	46 a	10 ab	121 a	105 b	28 a
CDC	43 a	9 b	125 a	101 b	25 a
CD	45 a	9 b	111 a	104 b	27 a
T	45 a	11 a	122 a	158 a	28 a
F	1,6 ^{ns}	2,7*	1,8 ^{ns}	4,7**	1,5 ^{ns}
AxC	1,6 ^{ns}	0,8 ^{ns}	1,7 ^{ns}	1,4 ^{ns}	0,3 ^{ns}
CVparcela (%)	14,1	22,0	15,6	66,3	17,2
CVsubparcela (%)	7,1	10,5	10,9	21,4	11,0

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Os teores de N, Ca, Mg, S, Cu, Fe e Zn estão dentro da faixa considerada adequada para o feijoeiro; os teores de P e K estão abaixo e os teores de B e Mn apresentaram-se acima da faixa considerada ótima para essa cultura (RAIJ et al., 1996). O aumento do teor de P no solo pela aplicação da EA não refletiu na absorção pelas plantas, possivelmente, em razão do elevado teor de Ca no solo, houve precipitação deste cátion com o P da solução do solo, reduzindo a absorção de P pelo feijoeiro.

Aliado a isso, o alto teor de Mn pode ter contribuído para diminuir a absorção de fósforo, pois, Veloso et al. (1995) estudando a toxidez de manganês em pimenta-do-reino em solução nutritiva, verificaram que o excesso de manganês reduziu o desenvolvimento das plantas e a absorção de P, K, Ca, Mg, Cu, Fe e Zn. Os tratamentos alteraram os teores de Mn no tecido vegetal das plantas de

feijoeiro, acompanhando os resultados obtidos no solo (Tabela 23), com as maiores médias nos tratamentos testemunha e EAF.

As diferenças resultantes da incorporação, ou não, dos corretivos sobre os componentes da produção do feijoeiro somente se manifestaram na população final de plantas, sendo maior quando os corretivos foram incorporados (Tabela 36). O efeito da desagregação do solo pelo preparo do solo e incorporação dos corretivos pode ter contribuído para o melhor contato semente/solo proporcionando o maior número de plantas neste tratamento.

Tabela 36. Componentes da produção e produtividade de grãos do feijoeiro em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos	População final de plantas	Nº de vagens por planta	Nº de grãos por vagem	Massa de 100 grãos	Produtividade
Aplicação (A)	(plantas ha ⁻¹)	(nºplanta ⁻¹)	(nºvagem ⁻¹)	(g)	(Mg ha ⁻¹)
Incorporada	118.34 a	11,1 a	4,8 a	30,16 a	2,36 a
Superfície	110.13 b	11,0 a	4,6 a	31,69 a	2,11 a
F	10,4*	0,6 ^{ns}	9,9 ^{ns}	0,2 ^{ns}	9,2 ^{ns}
Corretivos (C)					
AG	112.63 a	12,8 a	4,9 a	26,06 a	2,26 a
EA	118.25 a	11,9 ab	4,8 a	29,85 a	2,66 a
EAF	116.13 a	10,0 b	4,5 a	30,14 a	2,10 ab
EFP	114.63 a	11,2 ab	4,8 a	30,76 a	2,48 a
W	118.13 a	10,4 ab	4,9 a	29,75 a	2,35 a
CDC	112.50 a	11,4 ab	4,8 a	30,00 a	2,42 a
CD	113.63 a	11,4 ab	4,5 a	41,62 a	2,06 ab
T	108.00 a	9,4 b	4,5 a	29,20 a	1,55 b
F	0,9 ^{ns}	3,3**	1,9 ^{ns}	1,2 ^{ns}	5,6 ^{ns}
AxC	0,6 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,7 ^{ns}	1,0 ^{ns}	0,9 ^{ns}
CVparcela (%)	8,9	4,9	4,8	46,3	14,4
CVsubparcela (%)	8,7	15,5	7,6	38,4	18,1

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Para o componente nº vagens/planta e para a produtividade de grãos os aumentos foram significativos com a aplicação dos corretivos de acidez do solo. O maior nº vagens/planta foi verificado com a aplicação do agrosilício, o qual diferiu apenas da escória de alto forno e da testemunha.

Verificou-se que a aplicação dos corretivos de acidez proporcionou produtividade de grãos superior ao tratamento testemunha. A maior média de produtividade de grãos do feijoeiro foi propiciada com aplicação da EA, entretanto, não houve diferença em função dos diferentes corretivos (Tabela 36).

6.6 Cultura da aveia preta (Inverno 2011, 2012 e 2013)

A interação aplicação x corretivos foi significativa para a produção de MS da parte aérea da aveia preta no primeiro ciclo (Tabela 37). Analisando o desdobramento (Tabela 38), verifica-se que a aplicação superficial de AG, EAF e W proporcionou maior produção do que a aplicação superficial.

Os corretivos aumentaram a produção de MS (Tabelas 38, 39 e 40), contudo, somente foram superiores ao tratamento sem aplicação de corretivos no primeiro ciclo com a aplicação em superfície de AG, EAF, W e CD (Tabela 38). A produção de MS pelo tratamento que não recebeu corretivos da acidez do solo foi em média de 1,5 Mg ha⁻¹ no primeiro ciclo, chegando a uma produção de 5,0 Mg ha⁻¹ no terceiro ciclo (Tabela 40), igualando-se aos tratamentos que receberam corretivos de acidez.

Tal resultado pode ser atribuído ao fato da aveia preta ser uma planta tolerante à acidez do solo. A produção de MS semelhante com ou sem a aplicação de corretivos, também, pode ser em razão aos teores médios a altos de Ca e Mg no solo (Tabelas 11 e 13), que criam condições adequadas para o crescimento da planta (SORATTO e CRUSCIOL, 2008b). Somado a isso, as maiores precipitações pluviais observadas nos anos de 2012 e 2013 em relação ao ano de 2011 (Figura 1), e as condições adequadas de umidade, e temperatura do solo proporcionado pela cobertura da superfície com restos vegetais do feijoeiro, aveia-preta e soja ao longo dos ciclos podem ter contribuído para melhorar a absorção de nutrientes pela aveia no segundo e terceiro ciclo, inclusive no tratamento testemunha, elevando, assim a produção de MS.

Analisando as concentrações dos macronutrientes no decorrer dos ciclos (Tabelas 37, 39 e 40), houve constância nos teores de N, P e Ca.

Tabela 37. Produção de matéria seca (MS) e teores médios de nutrientes na parte aérea da aveia preta (2011), em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos	MS	N	P	K	Ca	Mg
Aplicação (A)	Mg ha ⁻¹	g kg ⁻¹				
Incorporada	2,07	14 a	0,9 a	13 a	3 a	1,4 a
Superfície	2,71	14 a	0,9 a	15 a	3 a	1,6 a
F	17,2 ^{ns}	8,8 ^{ns}	0,3 ^{ns}	5,9 ^{ns}	6,9 ^{ns}	1,3 ^{ns}
Corretivos (C)						
AG	2,97	14 a	0,8 a	14 a	3 a	1,5 bc
EA	2,10	14 a	0,9 a	14 a	3 a	1,3 c
EAF	2,18	14 a	0,9 a	15 a	3 a	1,6 ab
EFP	2,01	14 a	0,9 a	12 a	3 a	1,6 ab
W	2,83	14 a	0,9 a	14 a	3 a	1,3 c
CDC	2,49	14 a	0,9 a	14 a	3 a	1,8 a
CD	3,06	14 a	0,9 a	13 a	3 a	1,6 ab
T	1,47	14 a	0,9 a	13 a	3 a	1,3 c
F	7,4**	0,5 ^{ns}	1,5 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,4 ^{ns}	8,9**
AxC	2,8*	1,1 ^{ns}	2,7 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,0 ^{ns}	1,3 ^{ns}
CVparcela (%)	25,8	5,1	12,7	22,9	14,5	27,5
CVsubparcela (%)	23,9	12,2	10,3	18,9	22,4	11,3
Tratamento	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Aplicação (A)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹				
Incorporada	2,2 a	15 a	7 a	182 a	125 b	24 a
Superfície	2,3 a	13 a	7 a	145 b	139 a	24 a
F	1,7 ^{ns}	2,7 ^{ns}	5,9 ^{ns}	171,4**	15,2*	0,0 ^{ns}
Corretivos (C)						
AG	2,3 a	13 a	6 a	158 ab	107 b	23 a
EA	2,3 a	15 a	7 a	153 ab	134 b	23 a
EAF	2,4 a	14 a	7 a	171 ab	167 a	26 a
EFP	2,4 a	15 a	6 a	134 b	112 b	26 a
W	2,2 a	13 a	6 a	139 b	119 b	24 a
CDC	2,3 a	14 a	7 a	170 ab	123 b	24 a
CD	2,3 a	13 a	7 a	160 ab	108 b	21 a
T	2,3 a	16 a	7 a	223 a	186 a	25 a
F	0,5 ^{ns}	1,9 ^{ns}	1,8 ^{ns}	2,9*	18,1**	1,6 ^{ns}
AxC	0,7 ^{ns}	1,8 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,9 ^{ns}	1,5 ^{ns}	0,7 ^{ns}
CVparcela (%)	12,1	29,0	11,3	7,0	11,1	7,4
CVsubparcela (%)	7,6	14,6	11,0	27,8	14,8	15,5

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Tabela 38. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para a produção de MS da parte aérea da aveia preta (2011).

Corretivos	Aplicação	
	Incorporada	Superfície
	MS (Mg ha ⁻¹)	
AG	2,00 Ba	3,95 Aa
EA	2,18 Aa	2,02 Acd
EAF	1,67 Ba	2,70 Aabc
EFP	1,80 Aa	2,23 Abcd
W	2,39 Ba	3,28 Aabc
CDC	2,27 Aa	2,70 Aabcd
CD	2,74 Aa	3,40 Aab
T	1,52 Aa	1,42 Ad

*AG: agrosilício, EA: escória de aciaria, EAF: escória de alto forno, EFP: escória forno de panela, W: wollastonita, CDC: calcário dolomítico calcinado, CD: calcário dolomítico, T: testemunha. Letras maiúsculas correspondem às comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo. Letras minúsculas correspondem às comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo de aplicação pelo teste de Tukey $p > 0,05$

Para o K, houve redução de aproximadamente 10 g kg⁻¹ do primeiro ciclo para o segundo, chegando ao terceiro ciclo evidenciar sintomas visuais de deficiência de K, sendo neste caso necessária a adubação química de cobertura para fornecer este nutriente. Todavia, os teores de K no solo (Tabela 15) aumentaram no decorrer do tempo, passando de teor baixo para teor considerado médio aos 23 meses após a aplicação dos corretivos.

A redução na absorção de K por plantas de aveia-preta sem que houvesse redução do nutriente no solo também foi relatada por Soratto e Crusciol (2008b) com aplicação de calcário e gesso em SSD, e segundo os autores, houve maior absorção de Ca devido à redução na relação K/(Ca+Mg) em razão da maior disponibilidade Ca no solo. O aumento da quantidade de Ca reflete na menor absorção de K, uma vez que esses cátions competem pelo mesmo sítio de absorção na planta.

Apesar do aumento do teor de Ca no solo com o uso dos corretivos em relação ao tratamento testemunha, não houve efeito sobre os teores na planta (Tabelas 37, 39 e 40). A falta de efeito no teor de Ca na planta pode estar relacionada aos altos teores desse nutriente no solo, até mesmo no tratamento testemunha como também relatado por Soratto e Crusciol (2008b). Bem como as altas concentrações de Mn (ZANÃO JUNIOR et al., 2010). Segundo Malavolta et al. (1997) os teores de Ca, Fe e Zn são os que mais apresentam efeito negativo com o aumento da concentração de Mn no solo.

Tabela 39. Produção de matéria seca (MS) e teores médios de nutrientes na parte aérea da aveia preta (inverno 2012) em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos	MS	N	P	K	Ca	Mg
Aplicação (A)	Mg ha ⁻¹	g kg ⁻¹				
Incorporada	2,65 a	11 a	0,7 a	5 a	1 b	0,8 a
Superfície	3,14 a	11 a	0,8 a	5 a	2 a	0,8 a
F	2,2 ^{ns}	3,3 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,1 ^{ns}	14,0*	2,5 ^{ns}
Corretivos (C)						
AG	3,28 a	11 a	0,8 a	5 a	2 a	0,7 a
EA	3,06 a	11 a	0,8 a	5 a	2 a	0,9 a
EAF	3,36 a	11 a	0,7 a	5 a	2 a	0,8 a
EFP	2,61 a	12 a	0,8 a	5 a	2 a	0,9 a
W	2,63 a	12 a	0,8 a	5 a	2 a	0,8 a
CDC	2,63 a	11 a	0,7 a	5 a	2 a	0,9 a
CD	2,99 a	11 a	0,7 a	4 a	2 a	0,8 a
T	2,62 a	11 a	0,7 a	5 a	1 b	0,8 a
F	1,6 ^{ns}	0,7 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,6 ^{ns}	2,6*	2,5 ^{ns}
AxC	1,2 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,0 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,7 ^{ns}
CVparcela (%)	45,8	11,7	16,6	26,9	5,7	10,6
CVsubparcela (%)	24,2	13,2	14,0	29,0	15,1	12,9
Tratamento	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Aplicação (A)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹				
Incorporada	1,6 a	11 a	6 a	190 a	82 a	17 a
Superfície	1,6 a	10 a	6 a	197 a	79 a	19 a
F	0,1 ^{ns}	5,9 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,8 ^{ns}	2,9 ^{ns}
Corretivos (C)						
AG	1,6 a	9 a	6 a	195 a	75 bc	17 a
EA	1,6 a	11 a	6 a	213 a	76 bc	18 a
EAF	1,6 a	10 a	6 a	183 a	99 ab	20 a
EFP	1,6 a	11 a	5 a	201 a	63 c	18 a
W	1,6 a	10 a	6 a	174 a	81 abc	18 a
CDC	1,6 a	11 a	5 a	179 a	77 bc	17 a
CD	1,6 a	11 a	6 a	170 a	66 c	17 a
T	1,6 a	11 a	6 a	235 a	107 a	20 a
F	0,5 ^{ns}	1,0 ^{ns}	1,3 ^{ns}	1,3 ^{ns}	6,9**	1,3 ^{ns}
AxC	1,4 ^{ns}	0,2 ^{ns}	1,8 ^{ns}	2,1 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,7 ^{ns}
CVparcela (%)	2,6	18,0	14,9	44,3	18,3	16,1
CVsubparcela (%)	3,2	15,8	14,3	28,0	20,3	17,0

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

No primeiro ciclo da aveia preta, os corretivos de acidez do solo aumentaram o teor de Mg, exceto a EAF e a W (Tabela 37). Para os teores de Fe e Mn houve redução com aplicação de alguns corretivos (Tabela 37). Essa redução pode ser

atribuída ao decréscimo da disponibilidade de Fe e Mn no solo em razão do aumento do pH (Tabela 3).

Tabela 40. Produção de matéria seca (MS) e teores médios de nutrientes na parte aérea da aveia preta (inverno 2013) em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos	MS	N	P	K	Ca	Mg
Aplicação (A)	Mg ha ⁻¹	g kg ⁻¹				
Incorporada	5,3 a	11 a	0,8 a	8 a	2 a	1,0 a
Superfície	4,7 a	11 a	0,8 a	7 a	2 a	0,9 b
F	2,7 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,6 ^{ns}	3,2 ^{ns}	1,0 ^{ns}	12,9*
Corretivos (C)						
AG	5,0 a	12 a	0,9 ab	7 a	2 a	1,0 a
EA	5,1 a	11 a	1,0 a	7 a	2 a	0,9 a
EAF	5,0 a	11 a	0,8 ab	7 a	2 a	0,8 a
EFP	5,6 a	12 a	0,7 b	7 a	2 a	1,0 a
W	4,8 a	12 a	0,8 ab	7 a	2 a	0,9 a
CDC	4,7 a	11 a	0,8 ab	7 a	2 a	1,1 a
CD	5,0 a	11 a	0,8 ab	7 a	2 a	1,0 a
T	5,0 a	11 a	0,7 b	7 a	2 a	0,8 a
F	0,4 ^{ns}	0,7 ^{ns}	2,7*	0,3 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,8 ^{ns}
AxC	0,8 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,3 ^{ns}	0,2 ^{ns}
CVparcela (%)	30,9	35,4	30,7	35,0	12,5	8,3
CVsubparcela (%)	23,6	12,6	18,5	34,0	28,5	20,0
Tratamento	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Aplicação (A)	g kg ⁻¹	mg kg ⁻¹				
Incorporada	1,5 a	7 a	10 a	186	156 a	23 a
Superfície	1,5 a	7 a	10 a	209	139 b	23 a
F	0,3 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,0 ^{ns}	7,4 ^{ns}	192*	0,0 ^{ns}
Corretivos (C)						
AG	1,5 a	7 a	10 ab	187	129 a	25 a
EA	1,5 a	7 a	11 a	241	140 a	22 a
EAF	1,5 a	7 a	10 ab	204	174 a	22 a
EFP	1,5 a	7 a	10 ab	166	117 a	24 a
W	1,5 a	6 a	10 ab	157	152 a	24 a
CDC	1,6 a	7 a	9 b	167	161 a	25 a
CD	1,5 a	7 a	9 b	213	143 a	22 a
T	1,5 a	7 a	10 ab	247	168 a	22 a
F	0,5 ^{ns}	0,5 ^{ns}	2,3*	1,8 ^{ns}	1,6 ^{ns}	0,7 ^{ns}
AxC	0,5 ^{ns}	1,3 ^{ns}	0,8 ^{ns}	3,1**	0,6 ^{ns}	0,3 ^{ns}
CVparcela (%)	6,9	11,3	21,1	16,9	10,5	15,4
CVsubparcela (%)	5,3	20,5	13,5	36,2	29,2	17,6

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

No segundo ciclo, apenas o Mn foi alterado pela aplicação dos corretivos, houve no geral decréscimo no teor, enquanto que a EAF manteve os mesmos teores que a testemunha (Tabela 39). No terceiro ciclo o teor de Mn elevou-se em relação aos ciclos anteriores não havendo mais diferença significativa entre os corretivos empregados (Tabela 40). É provável que o processo de acidificação do solo, observado no período de 23 meses após a aplicação dos tratamentos com redução nos valores de pH do solo, contribuiu para o aumento da disponibilidade de Mn. Silva et al. (2012) também constataram elevado teor de Mn em plantas de aveia-preta após 20 meses da aplicação superficial de calcário, segundo os autores ainda havia quantidades elevadas de Mn nas camadas mais profundas do solo em razão da dificultada da correção da acidez pela calagem realizada em superfície.

O desdobramento da interação aplicação x corretivos para o teor de Fe na parte aérea da aveia preta, mostrou maiores teores com a aplicação em superfície da EA e EFP (Tabela 41). A EA foi o material corretivo que apresentou o maior teor de Fe na parte aérea da aveia preta, isto se deve á composição química da EA.

Tabela 41. Desdobramento da interação aplicação x corretivos para o teor de Fe na parte aérea da aveia preta (2013).

Corretivos	Aplicação	
	Incorporada	Superfície
	Fe (mg kg ⁻¹)	
AG	192 Aa	183 Aab
EA	148 Ba	335 Aa
EAF	224 Aa	183 Aab
EFP	109 Ba	223 Aab
W	179 Aa	136 Ab
CDC	183 Aa	152 Ab
CD	245 Aa	181 Aab
T	214 Aa	280 Aab

*AG: agrosilício, EA: escória de aciaria, EAF escória de alto forno, EFP: escória forno de panela, W: wollastonita, CDC: calcário dolomítico calcinado, CD: calcário dolomítico, T: testemunha. Letras maiúsculas correspondem às comparações entre o modo de aplicação para o mesmo corretivo de acidez do solo. Letras minúsculas correspondem às comparações entre os corretivos de acidez do solo dentro do mesmo modo de aplicação pelo teste de Tukey $p > 0,05$.

Os teores de Fe e Mn no primeiro e terceiro ciclo (Tabelas 37 e 40) de acordo com Raij et al. (1996) podem ser considerados altos para a aveia-preta. Soratto e Crusciol (2008c) também verificaram teores de Fe e Mn acima do considerado adequado para as plantas de aveia-preta após aplicação de gesso e calcário em superfície.

No terceiro ciclo, os acréscimos no teor de P do solo com o uso da EA refletiram na parte aérea da aveia preta (Tabela 40). O teor de Cu aumentou no último ciclo da aveia preta, com diferenças significativas entre os corretivos. Apesar de não ter sido realizada comparação entre as épocas de amostragem do solo, observa-se que houve aumento do teor de Cu no solo da primeira amostragem de solo para as duas últimas, e esta elevação no solo incrementou no tecido vegetal da aveia preta, observado no último ciclo.

A aplicação de corretivo da acidez do solo somente favoreceu a produtividade em relação à testemunha no primeiro ciclo, onde a EFP e W proporcionaram as maiores médias (Tabela 41), nos demais ciclos não houve diferença entre os corretivos e o tratamento testemunha (Tabelas 42 e 43).

Assim como mencionado para a produção de MS, a falta de resposta para a produtividade à aplicação dos materiais corretivos pode estar relacionada à tolerância à acidez do solo pelas plantas de aveia preta, assim como, aos teores médios a altos de Ca e Mg presentes no solo (Tabelas 11 e 13), que criaram condições adequadas para o crescimento das plantas e para a produtividade.

Em relação ao modo de aplicação dos corretivos, observou-se que no primeiro ciclo, a aplicação superficial dos corretivos aumentou a produtividade (Tabela 41), possivelmente em razão do maior teor de P, Ca e Mg no solo no tratamento com aplicação superficial (Tabelas 9, 11 e 13).

Não houve efeito dos tratamentos sobre o número de panículas por m², número de sementes por panículas e massa de 100 grãos da aveia-preta nos três ciclos da cultura. (Tabelas 41, 42 e 43).

Tabela 42. Componentes da produção e produtividade da aveia preta (2011) em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos	Número de panículas m ²	Nº de sementes por panícula	Massa de 100 grãos (g)	Produtividade (Mg ha ⁻¹)
Aplicação (A)				
Incorporada	183 a	35 a	2,22 a	1,1 b
Superfície	186 a	37 a	2,52 a	1,6 a
F	0,1 ^{ns}	1,5 ^{ns}	1,7 ^{ns}	12,9*
Corretivos (C)				
AG	199 a	33 a	2,10 a	1,4 ab
EA	165 a	39 a	2,16 a	1,2 ab
EAF	182 a	32 a	2,49 a	1,0 b
EFP	221 a	36 a	3,05 a	1,9 a
W	188 a	41 a	2,25 a	1,9 a
CDC	190 a	38 a	2,29 a	1,3 ab
CD	188 a	34 a	2,27 a	1,2 ab
T	152 a	34 a	2,36 a	0,7 b
F	1,4 ^{ns}	1,8 ^{ns}	1,1 ^{ns}	4,4**
AxC	0,3 ^{ns}	1,9 ^{ns}	1,2 ^{ns}	0,8 ^{ns}
CVparcela (%)	30,1	18,8	37,5	38,5
CVsubparcela (%)	27,1	17,5	33,5	40,8

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Tabela 43. Componentes da produção e produtividade da aveia preta (inverno 2012) em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos	Número de panículas m ²	Nº de sementes por panícula	Massa de 100 grãos (g)	Produtividade (Mg ha ⁻¹)
Aplicação (A)				
Incorporada	171 a	35 a	2,2 a	1,03 a
Superfície	180 a	35 a	1,9 a	1,13 a
F	0,4 ^{ns}	0,0 ^{ns}	2,8 ^{ns}	4,6 ^{ns}
Corretivos (C)				
AG	173 a	38 a	2,4 a	1,20 a
EA	186 a	32 a	2,0 a	1,15 a
EAF	171 a	31 a	2,2 a	1,04 a
EFP	165 a	33 a	1,8 a	0,84 a
W	171 a	37 a	2,1 a	1,13 a
CDC	181 a	35 a	1,9 a	0,98 a
CD	194 a	38 a	2,0 a	1,28 a
T	163 a	38 a	2,0 a	1,03 a
F	0,5 ^{ns}	1,6 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,9 ^{ns}
AxC	0,5 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,5 ^{ns}	0,7 ^{ns}
CVparcela (%)	34,4	21,5	33,0	17,9
CVsubparcela (%)	24,0	17,8	29,1	38,3

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo

Tabela 44. Componentes da produção e produtividade da aveia preta (2013) em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos	Número de panículas m ²	Nº de sementes por panícula	Massa de 100 grãos (g)	Produtividade (Mg ha ⁻¹)
Aplicação (A)				
Incorporada	424 a	20 a	2,3 a	1,9 a
Superfície	394 a	20 a	2,4 a	1,9 a
F	0,6 ^{ns}	0,3 ^{ns}	4,0 ^{ns}	0,0 ^{ns}
Corretivos (C)				
AG	361 a	19 a	2,4 a	1,7 a
EA	491 a	20 a	2,3 a	2,2 a
EAF	379 a	20 a	2,4 a	1,8 a
EFP	373 a	20 a	2,4 a	1,8 a
W	364 a	19 a	2,4 a	1,6 a
CDC	401 a	19 a	2,3 a	1,8 a
CD	468 a	22 a	2,3 a	2,4 a
T	436 a	20 a	2,4 a	2,3 a
F	2,6 ^{ns}	1,0 ^{ns}	0,5 ^{ns}	2,1 ^{ns}
AxC	0,7 ^{ns}	1,2 ^{ns}	1,9 ^{ns}	0,8 ^{ns}
CVparcela (%)	38,4	23,7	7,0	15,9
CVsubparcela (%)	22,1	1,0	13,3	31,0

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

6.7 Cultura da soja (Verão 2011/2012 e 2012/2013)

A calagem pode exercer efeitos benéficos sobre o processo biológico de fixação do N₂, associado à maior disponibilidade de Mo e redução da acidez do solo (CAIRES et al., 2000). Contudo, não houve alterações significativas na absorção de N pela soja com a aplicação dos corretivos (Tabela 45).

O aumento do teor de P nos primeiros cinco centímetros de solo, com a aplicação superficial dos corretivos (Tabela 9), favoreu a absorção do nutriente pela planta, havendo maior absorção de P com a aplicação superficial, no primeiro ciclo da cultura (Tabela 45).

Tabela 45. Teores médios de macronutrientes foliares da soja cultivar 5D688, safra 2011/2012 e 2012/2013, em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg	S
safra 2011/2012						
Aplicação (A)	-----g kg ⁻¹ -----					
Incorporada	53 a	2,8 b	15 a	10 a	4,0 a	2,9 a
Superfície	54 a	3,2 a	15 a	10 a	4,3 a	3,0 a
F	0,4 ^{ns}	413,8**	0,3 ^{ns}	0,2 ^{ns}	5,7 ^{ns}	6,8 ^{ns}
Corretivos (C)						
AG	54 a	3,1 a	15 a	10 a	4,0 a	2,8 a
EA	55 a	3,1 a	14 a	11 a	4,0 a	3,0 a
EAF	52 a	2,8 a	15 a	10 a	4,1 a	2,9 a
EFP	55 a	3,1 a	15 a	10 a	4,2 a	2,9 a
W	55 a	3,1 a	15 a	10 a	4,0 a	3,0 a
CDC	53 a	3,0 a	14 a	10 a	4,5 a	2,9 a
CD	55 a	3,1 a	15 a	9 a	4,3 a	2,9 a
T	52 a	2,9 a	16 a	9 a	4,0 a	2,8 a
F	2,0 ^{ns}	1,6 ^{ns}	0,8 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,2 ^{ns}	1,0 ^{ns}
AxC	0,5 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,4 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,4 ^{ns}	1,0 ^{ns}
CVparcela (%)	12,2	2,2	15,7	13,8	10,3	5,3
CVsubparcela (%)	5,0	9,6	15,8	19,7	13,0	6,3
safra 2012/2013						
Aplicação	-----g kg ⁻¹ -----					
Incorporada	51 a	2,6 a	13 a	12 a	3,4 a	2,6 a
Superfície	53 a	2,6 a	12 a	12 a	3,5 a	2,6 a
F	1,3 ^{ns}	0,8 ^{ns}	4,3 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,1 ^{ns}
Corretivos (C)						
AG	52 a	2,6 a	13 a	12 a	3,2 a	2,9 a
EA	53 a	2,6 a	12 a	12 a	3,3 a	2,7 ab
EAF	49 a	2,6 a	13 a	11 ab	3,7 a	2,5 ab
EFP	53 a	2,5 a	12 a	12 a	3,4 a	2,7 ab
W	53 a	2,6 a	12 a	12 a	3,2 a	2,7 ab
CDC	52 a	2,6 a	12 a	11 ab	3,5 a	2,5 b
CD	51 a	2,5 a	12 a	12 a	3,7 a	2,5 b
T	50 a	2,6 a	14 a	10 b	3,6 a	2,6 ab
F	3,0 ^{ns}	1,3 ^{ns}	2,3 ^{ns}	4,4**	2,0 ^{ns}	2,8*
AxC	1,3 ^{ns}	0,6 ^{ns}	1,1 ^{ns}	1,0 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,1 ^{ns}
CVparcela (%)	13,9	11,4	18,2	19,2	25,1	9,8
CVsubparcela(%)	4,8	4,0	12,4	10,0	11,8	8,6

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

O teor de Ca nas folhas da soja aumentou no segundo ciclo com o uso dos corretivos de acidez do solo, sendo que a EAF e o CDC não diferiram da testemunha. Em relação ao S, houve diferença entre os corretivos utilizados, no segundo ciclo, sendo que o teor de S elevou-se com o AG em relação à aplicação dos calcários (Tabela 45).

Nos dois ciclos da soja, a EA aumentou o teor de Fe, e os teores de Mn e Zn reduziram com a aplicação dos corretivos, exceto para a EAF (Tabela 46). A redução nos teores de Mn e Zn está relacionada com o aumento nos valores de pH proporcionados pelos correivos utilizados.

Em relação aos componentes de produção e produtividade não houve efeito significativo em função do modo de aplicação dos corretivos (Tabelas 47). No primeiro ciclo houve diferença significativa entre os corretivos sob o número de plantas, sendo maior no tratamento com EA.

A aplicação da EFP proporcionou a maior produtividade de grãos na primeira safra, contudo, não houve diferença entre os materiais corretivos utilizados. Exceto ao tratamento com a EFP, não houve diferença entre os corretivos utilizados e ao tratamento sem correção da acidez do solo na produtividade de grãos da soja na primeira safra. Ausência de resposta à calagem para produção de grãos de soja foi relatada por Caires et al. (1998); Caires et al. (2000) e Caires et al. (2008a,b) e segundo os autores, quando os teores de Ca, Mg e K estão em disponibilidade suficiente no perfil do solo mantém-se uma relação com o alumínio favorecendo a produtividade mesmo sem a calagem.

Barbosa filho et al. (2005) verificaram que a calagem superficial em SSD agiu mais como fonte de Ca e Mg do que como neutralizante da acidez, pois os autores não observaram alterações no pH do solo, contudo, obtiveram boa produtividade do feijoeiro e soja. Em solos ácidos manejados em plantio direto no sul do Brasil, as altas produtividades de soja mesmo na ausência de calcário (CAIRES et al., 1998; CAIRES et al., 2000; CAIRES et al., 2008a,b), têm sido atribuídas ao menor efeito tóxico do Al, em consequência de menor concentração de espécies tóxicas (Al^{3+} e $AlOH^{2+}$) e maior concentração de Al complexado com ligantes orgânicos (MIYAZAWA et al., 1996; SALET et al., 1999).

Tabela 46. Teores médios de micronutrientes foliares da soja cultivar 5D688, safras 2011/2012 e 2012/2013, em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosilício (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Safra 2011/2012					
Aplicação (A)	-----mg kg ⁻¹ -----				
Incorporada	70 a	13 a	103 a	107 a	51 a
Superfície	72 a	13 a	104 a	151 a	55 a
F	0,4 ^{ns}	2,8 ^{ns}	0,1 ^{ns}	6,6 ^{ns}	3,8 ^{ns}
Corretivos (C)					
AG	74 a	13 a	100 ab	98 b	51 c
EA	68 a	13 a	112 a	113 b	52 bc
EAF	70 a	13 a	99 ab	157 ab	62 a
EFP	73 a	13 a	103 ab	108 b	53 bc
W	69 a	13 a	106 ab	118 b	50 c
CDC	71 a	13 a	107 ab	129 b	50 c
CD	72 a	13 a	103 ab	100 b	49 c
T	71 a	13 a	95 b	208 a	60 ab
F	1,0 ^{ns}	0,5 ^{ns}	3,0*	7,4 ^{ns}	6,6 ^{ns}
AxC	0,9 ^{ns}	1,3 ^{ns}	1,5 ^{ns}	1,4 ^{ns}	1,0 ^{ns}
CVparcela (%)	14,4	6,8	6,5	52,9	14,3
CVsubparcela (%)	6,9	8,3	8,3	30,0	9,9
Tratamento	B	Cu	Fe	Mn	Zn
Safra 2011/2012					
Aplicação (A)	-----mg kg ⁻¹ -----				
Incorporada	43 a	15 a	128 a	92 a	57 a
Superfície	42 a	14 a	135 a	97 a	52 b
F	3,7 ^{ns}	1,1 ^{ns}	1,3 ^{ns}	0,3 ^{ns}	21,5*
Corretivos (C)					
AG	43 a	13 a	130 ab	83 b	52 b
EA	44 a	15 a	146 a	93 b	54 b
EAF	43 a	15 a	125 ab	99 b	61 a
EFP	42 a	15 a	130 ab	81 b	54 b
W	41 a	15 a	145 ab	88 b	54 b
CDC	41 a	14 a	131 ab	89 b	52 b
CD	43 a	14 a	118 b	76 b	49 b
T	42 a	16 a	124 ab	145 a	62 a
F	1,0 ^{ns}	0,8 ^{ns}	2,5*	8,3**	8,3**
AxC	0,6 ^{ns}	1,6 ^{ns}	0,9 ^{ns}	0,5 ^{ns}	1,0 ^{ns}
CVparcela (%)	7,2	36,8	18,6	39,5	8,9
CVsubparcela (%)	7,5	17,0	13,3	22,6	8,2

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Tabela 47. Componentes de produção e produtividade média de grãos de soja, cultivar 5D688, safras 2011/2012 e 2012/2013 em função da aplicação incorporada e em superfície de agrosílico (AG), escória de aciaria (EA), escória de alto forno (EAF), escória forno de panela (EFP), wollastonita (W), calcário dolomítico calcinado (CDC), calcário dolomítico (CD) e testemunha (T).

Tratamentos	Nº de plantas ha ⁻¹	Nº de vagens por planta	Nº grãos por vagem	Massa de 100 grãos (g)	Produtividade de grãos (Mg ha ⁻¹)
Aplicação (A) safra 2011/2012					
Incorporada	279.050 a	38 a	2 a	13,97 a	3,38 a
Superfície	269.444 a	40 a	2 a	14,33 a	3,53 a
F	0,8 ^{ns}	0,0 ^{ns}	2,3 ^{ns}	2,9 ^{ns}	1,5 ^{ns}
Corretivos (C)					
AG	258.333 bc	45 a	2 a	14,29 a	3,54 ab
EA	337.499 a	40 a	2 a	13,73 a	3,46 ab
EAF	310.648 ab	38 a	2 a	14,26 a	3,41 ab
EFP	279.166 abc	38 a	2 a	14,34 a	3,90 a
W	261.111 abc	39 a	2 a	14,58 a	3,60 ab
CDC	208.333 c	37 a	2 a	14,18 a	3,23 ab
CD	279.166 abc	34 a	2 a	13,96 a	3,58 ab
T	263.888 abc	41 a	2 a	13,89 a	2,91 b
F	5,1**	0,6 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,5 ^{ns}	2,6*
AxC	0,9 ^{ns}	0,6 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,4 ^{ns}	0,3 ^{ns}
CV parcela (%)	15,3	67,5	13,3	5,9	13,2
CV subparcela (%)	17,5	26,8	15,7	7,9	14,9
Aplicação (A) safra 2012/2013					
Incorporada	322.395 a	39 a	2 a	10,7 a	2,55 a
Superfície	318.055 a	39 a	2 a	10,5 a	2,74 a
F	0,1 ^{ns}	0,1 ^{ns}	0,2 ^{ns}	0,0 ^{ns}	0,5 ^{ns}
Corretivos (C)					
AG	322.916 a	43 a	2 a	12,5 a	2,87 a
EA	311.805 a	42 a	2 a	10,9 ab	2,99 a
EAF	333.333 a	36 a	2 a	9,0 b	2,27 bc
EFP	342.360 a	37 a	2 a	11,2 ab	2,84 a
W	315.277 a	38 a	2 a	11,0 ab	2,69 ab
CDC	335.416 a	37 a	2 a	10,7 ab	2,61 abc
CD	302.777 a	40 a	2 a	10,4 ab	2,84 a
T	297.916 a	39 a	2 a	9,3 b	2,08 c
F	0,9 ^{ns}	1,2 ^{ns}	0,4 ^{ns}	4,6**	6,5**
AxC	0,7 ^{ns}	2,5 ^{ns}	2,8 ^{ns}	1,7 ^{ns}	1,9 ^{ns}
CV parcela (%)	17,8	27,6	4,8	41,4	41,8
CV subparcela (%)	15,1	16,3	12,6	13,3	13,3

Médias seguidas por letras distintas dentro das colunas diferem entre si, pelo teste Tukey ao nível de 5% (*) e 1% (**) de probabilidade. ns- não significativo.

Na segunda safra (Tabela 47) o AG incrementou a massa de 100 grãos em relação à testemunha e à EAF. O acréscimo na produtividade de grãos foi verificado com a aplicação de AG, EA, EFP, W, CDC e CD em relação à testemunha e à EAF.

8. CONCLUSÕES

- As escórias forno de panela (EFP), do aço inox (AG) e de aciaria (EA) podem ser aplicadas em SSD, com eficiência semelhante aos calcários na neutralização da acidez do solo.
- A aplicação incorporada ou superficial dos corretivos é indiferente na correção da acidez do solo no primeiro e segundo ano após a implantação do SSD.
- A maior solubilidade do silicato em relação ao carbonato não torna as escórias de siderurgia mais eficiente que os calcários, nem proporcionam correção da acidez do solo mais rápida na fase de implantação do SSD.
- A calagem e a silicatagem superficial ou incorporada pouco modificam a nutrição mineral do feijoeiro, aveia-preta e soja em sucessão.
- A produtividade do feijoeiro aumenta com o uso de corretivos da acidez do solo em SSD, enquanto a produtividade da aveia preta apresenta pouca resposta.
- O uso dos corretivos de acidez do solo AG, EA, EFP, W, CDC e CD, proporciona acréscimos semelhantes na produtividade da soja em SSD.

- O modo de aplicação, incorporado ou em superfície, dos corretivos da acidez do solo em SSD é indiferente sobre a produtividade das culturas do feijoeiro, aveia preta e soja em sucessão, na fase de implantação do sistema.
- As escórias de aciaria (EA), do aço inox (Agrosilício® - AG), forno de panela (EFP) e alto forno (EAF) aplicadas para corrigir a acidez do solo não traz problemas com contaminação de metais pesados.
- As diferenças entre os extratores estudados de Si no solo e a pouca correlação com os teores de silício absorvido pelas plantas evidencia a necessidade de mais estudos sobre o assunto.

9. REFERÊNCIAS

AGARIE, S.; UCHIDA, H.; AGATA, W.; KUBOTA, F.; KAUFMAN, P.T. Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in Rice plants (*Oryza sativa* L.). **Plant Production Science**, v.1, p.89-95, 1998.

ALCARDE, J.C. **Corretivos da acidez do solo: Características e interpretações técnicas**. ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS E CORRETIVOS (ANDA), São Paulo - SP, 1992, 62p. (Boletim Técnico 6).

ALCARDE, J. C. **Metodologia oficial de análise de corretivos de acidez**. Porto Alegre-RS, 2009, 58p.

ALCARDE, J.A.; RODELLA, A.A. Qualidade e legislação de fertilizantes e corretivos. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A. S.; ALVARES V., V.H. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.291-334, 2003.

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

ALTMANN, N. **Plantio Direto no Cerrado: 25 anos acreditando no sistema**. Aldeia Norte Editora, Passo Fundo, 2010, 568p.

ALTMANN, N.; PAVINATO, A. **Experiências da SLC agrícola no manejo da fertilidade do solo no cerrado**. Informações Agronômicas. POTAFOS, Piracicaba. n° 94, 2001. 4p.

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

AMARAL SOBRINHO, N.M.B.; VELLOSO, A.C.X.; OLIVEIRA, C. Solubilidade de metais pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p.9-16, 1997.

ANDO, J.; OWA, N.; ASANO, M. Studies on structure, solubility and agronomic response of industrial slag. Effects of aluminium on solubility and agronomic response of slags. **Soil Science Plant Nutrition**, v. 59, p. 27-32, 1998.

ANDREOTTI, M.; ARALDI, M.A.; GUIMARÃES, V.F.; FURLANI JUNIOR, E.; BUZETTI, S. Produtividade do milho safrinha e modificações químicas de um Latossolo em sistema plantio direto em função de espécies de cobertura após calagem superficial. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, p. 109-115, 2008.

ARAÚJO, S.R.; DEMATTÊ, J.A.M.; GARBUIO, F.J. Aplicação de calcário com diferentes graus de reatividade: Alterações químicas no solo cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p.1755-1764, 2009.

ARGENTON J.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; WILDNER, L.P. 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**, v. 29, p.425-435, 2005.

AVALHÃES, C.C. **Escória de siderurgia na cultura da cana-planta: efeitos no solo, na nutrição e na produtividade**. Jaboticabal, 2010. 98f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista.

BARBOSA FILHO, M.P.; FAGERIA, N.K.; ZIMMERMANN, F.J.P. Atributos de fertilidade do solo e produtividade do feijoeiro e da soja influenciados pela calagem em superfície e incorporada. **Ciência e agrotecnologia**, v. 29, p. 507-514, 2005.

BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G.H.; ELLIOTT, C.L.; DATNOFF, L.E. Evaluation of soil test procedures for determining rice-available silicon. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.32, n.11-12, p.1779-1792, 2001.

BERTHELSEN, S.; KORNDÖRFER, G.H. Methods for Si analysis in plant, soil and fertilizers. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 3., 2005, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia: UFU.

BERTHELSEN, S.; NOBLE, A.; KINGSTON, G.; HURNEY, A.; RUDD, A. Effect of Ca-silicate amendments on soil chemical properties under a sugarcane cropping system. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 2., 2002, Tsuruoka, Japão. **Anais...** Tsuruoka: Japanese Society of Soil Science and Plant Nutrition, 2002, p. 57.

BLEVINS, R.L.; THOMAS, G.W.; SMITH, M.S.; FRYE, W.W. CORNELIUS, P.L. Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. **Soil Till. Res.**, v. 3, p.135-146, 1983.

Brasil (2006) Ministério da Agricultura. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. Portaria Nº 110, DE 09 DE JUNHO DE 2006. Diário Oficial, Brasília, 09 de junho de 2006. seção 1, p.15-16.

BRASSIOLI, F.B.; PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Avaliação agronômica da escória de siderurgia na cana-de-açúcar durante cinco ciclos de produção. **Bragantia**, Campinas, v.68, p.381-387, 2009.

CAIRES, E.F. Calagem no sistema plantio direto para correção da acidez e suprimento de Ca e Mg como nutrientes. In: **Simpósio sobre Informações Recentes para Otimização da Produção Agrícola**. International Plant Nutritions Institute. Piracicaba IPNI. 28p. 2007

CAIRES, E.F. Correção da acidez do solo em sistema plantio direto. Informações Agronomicas, **International Plant Nutrition Institute**: Piracicaba IPNI. n.141, 13p. 2013.

CAIRES, E.F.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J.; CHURKA, S. Soil acidity, liming and soybean performance under no-till. **Scientia Agricola**, v.65, p.532-540, 2008(a).

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

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

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

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

CAIRES, E.F.; GARBUIO, F.J.; CHURKA, S.; BARTH, G.; CORREA, J.C.L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, v. 28, p.57-64, 2008(b)

CAIRES, E.F.; PEREIRA FILHO, P.R.S.; ZARDO FILHO, R.; FELDHAUS, I.C. Soil acidity and aluminium toxicity as affected by surface liming and cover oat residues under a no-till system. **Soil Use and Management**, v.24, p.302-309, 2008(c).

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**, v.39, p.1213-1218, 2004.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados do solo em função de sistema de plantio, rotações de culturas, preparo da amostra e teor de matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.527-538, 1998.

CASTRO, G.S.A.; CANOLEGO, J.C.; CRUSCIOL, C.A.C. Propriedades físicas do solo em sistemas de rotação de culturas conforme o uso de corretivos da acidez. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, 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** , v.195–196, p.234-242, 2013(a).

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, 2013(b).

CIOTTA, M.N.; BAYER C.; ERNANI, P.R.; FONTOURA, S.M.V, ALBUQUERQUE, J.A.; WOBETO, C. Acidificação de um Latossolo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 1055-1064, 2002.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Referente ao Relatório à Diretoria nº 001/2014/E/C/I, de 14.02.2014. Dispõe sobre a aprovação dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo – 2014, em substituição aos Valores Orientadores de 2005 e dá outras providências. São Paulo, 2014, 4p.

CORRÊA, J.C.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; FERNANDES, D. M.; PERES, M.G.M. Aplicação superficial de diferentes fontes de corretivos no crescimento radicular e produtividade da aveia preta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.1583-1590, 2008(a).

CORRÊA, J.C.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; MARCELINO, R.; MAUAD, M. Correção da acidez e mobilidade de íons em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.1307-1317, 2007.

CORRÊA, J.C.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MORAES, M.H. Alteração de atributos físicos em latossolo com aplicação superficial de escória de aciaria, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p.263-272, 2009(b).

CORRÊA, J.C.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C, TECCHIO, M. C. Aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário na cultura da soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.1209-1219, 2008 (b).

CORRÊA, J.C.; BÜLL, L.T.; PAGANINI, W.S.; GUERRINI, I.A. Disponibilidade de metais pesados em Latossolo com aplicação superficial de escória, lama cal, lodos de esgoto e calcário. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira** v.43, p.411-419, 2008 (c).

CORRÊA, J.C.; FREITAG, E.E.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; FERNANDES, D. M.; MARCELINO, R. Aplicação superficial de calcário e diferentes resíduos em soja cultivada no sistema plantio direto. **Bragantia**, v.68, p.1059-1068, 2009 (a).

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**, v.23, p.703-709, 1999.

DEREN, C.W.; DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; MARTIN, F.G. Silicon concentration, disease response, and yield components of rice genotypes grown on flooded organic histosols. **Crop Science**., v. 34, p.733-37, 1994.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa/CNPSO, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Brasília, 2013. 353p.

ERNANI, P.R.; STECKLING, C.; BAYER, C. Características químicas de solo e rendimento de massa seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 939-946, 2001.

FARIA, L.A., LUZ, P.H.C.; RODRIGUES, R.C.; HERLING, V.R.; MACEDO, F.B. Efeito residual da silicatagem no solo e na produtividade do capim-marandu sob pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1209-1216, 2008.

FLOWER, K.C.; CRABTREE, W.L. Soil pH change after surface application of lime related to the levels of soil disturbance caused by no-tillage seeding machinery. **Field Crops Research**, v. 121, p.75–87, 2011.

FONSECA, I. M.; PRADO, R. M.; VIDAL, A. A.; NOGUEIRA, T. A. R. Efeito da escória de siderurgia e do calcário na disponibilidade de silício no solo. In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO SOBRE SILÍCIO NA AGRICULTURA, 4., 2007, Botucatu. **Resumos Expandidos...** Botucatu: Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, 2007. p.26-28.

FRANCHINI, J.C.; MALAVOLTA, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. Alterações químicas em solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.533-542, 1999.

FRANCHINI, J.C.; MEDA, A.R.; CASSIOLATO, M.E.; MIYAZAWA, M. & PAVAN, M.A. Potencial de extratos de resíduos vegetais na mobilização do calcário no solo por métodos biológicos. **Scientia Agrícola**, v.58, p.357-360, 2001.

GONÇALVES, J.R.P; MOREIRA A.; BÜLL, L.T.; CRUSCIOL, C.A.C.; BOAS, R.L.V. Granulometria e doses de calcário em diferentes sistemas de manejo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 33, p. 369-375, 2011

GUTIERREZ, R.S.; INOCENCIO, M.F.; NOVELINO, J.O. Extração de silício em solos fertilizados com fosfato e silicato. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, p.1-7, 2011.

HAYSOM M.B.C.; CHAPMAN L.S. Some aspects of the calcium silicate trials at Mackay. **Proc. Austr. Sugar Cane Technol.** v. 42, p.117–122, 1975.

KAMINSKI, J.; SANTOS, D.R.; GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G.; SILVA, L.S. Eficiência da calagem superficial e incorporada precedendo o sistema plantio direto em um Argissolo sob pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.573-580, 2005.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 262 p.

KLEIN, V.A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2008. 212p.

KORNDÖRFER, G. H.; COELHO, N. M.; SNYDER, G. H.; MIZUTANI, C. T. Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 101-106, 1999.

KORNDÖRFER, G. H., PEREIRA, H. S., CAMARGO, M. S. de. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. Uberlândia: GPSi, 2003. 15p. (Boletim Técnico nº 1).

KORNDÖRFER, G. H., PEREIRA, H. S., NOLLA, A. **Análise de silício no solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: GPSi, 2004. 50p. (Boletim Técnico nº 02).

LEAL, A.J.F.; LAZARINI, E.; RODRIGUES, L.R.; MURAISHI, C.T.; BUZETTI, S.; MASCARENHAS, H.A.A. Aplicação de calcário e culturas de cobertura na implantação do sistema plantio direto em cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2771-2777, 2008.

LIANG, Y., SUN, W., ZHU, Y-G, CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environmental Pollution**, Barking, v. 147, n. 2, p. 422-428, 2007.

LOPES, A.S.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L.R.G.; SILVA, C.A. **Sistema plantio direto: Bases para o manejo da fertilidade do solo**. São Paulo, ANDA, 2004. 110p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2.ed. ver. e atual. Piracicaba: Potafos, 1997. p.319.

MARAFON, A. C.; ENDRES, L. Adubação silicatada em cana-de-açúcar. Aracaju, SE 2011 : **Embrapa Tabuleiros Costeiros**, 2011. 46 p. (Documentos / Embrapa

Tabuleiros Costeiros, ISSN 1517-1329; 165). Disponível em:
http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2011/doc_165.pdf Acesso em: 12 jun. 2012.

MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. 4 ed. Porto Alegre: Evangraf, 2012. 275p.

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

MIYAZAWA, M., PAVAN, M.A., FRACHINI, C.F. **Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais**. Potafos, Encarte Técnico, Informações agronômicas, n° 92. dezembro de 2000.15p.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; SANTOS, J.C.F. Effects of addition of crop residues on the leaching of Ca and Mg in Oxisols. In: International symposium on plant soil interactions at low pH, 4., Belo Horizonte, 1996. **Abstracts**. Belo Horizonte, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/ EMBRAPA-CPAC, 1996. p.8.

NARAYANASWAMY C.; PRAKASH, N.B. Evaluation of selected extractants for plant-available silicon in rice soils of southern India. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.41, p.977-989, 2010.

NOLLA, A.; ANGHINONI, I. Critérios de calagem para a soja no sistema plantio direto consolidado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p.475-483, 2006.

OLIVEIRA, J.B. **Pedologia Aplicada**. 3 ed. Piracicaba: FEALQ, 2008. 592p.

PAVAN, M.A. Movimentação de calcário no solo através de técnicas de manejo da cobertura vegetal em pomares de macieira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.16, p.86-91, 1994.

- PAVINATO, P.S.; ROSOLEM, C.A. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 911-920, 2008.
- PEREIRA, H.S.; ASSIS, M.H.; KORNDÖRFER, G.H. Métodos para análise de solos e fertilizantes para silício. In: Silício na Agricultura. **Anais do V Simpósio Brasileiro sobre Silício na Agricultura**. Viçosa: UFV, DFP, 2010b. 385p.
- PEREIRA, H.S.; BARBOSA, N.C.; CARNEIRO, M.A.C.; KORNDÖRFER, G.H. Avaliação de fontes e de extratores de silício no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, p.239-247, 2007.
- PEREIRA, H.S.; GAMA, A. J. M.; CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H. Reatividade de escórias silicatadas da indústria siderúrgica. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, p. 382-390, 2010a.
- PEREIRA, H. S.; KORNDÖRFER, G.H.; VIDAL, A.A.; CAMARGO, M.S. Fontes de silício para a cultura do arroz. **Scientia Agrícola**, v. 16, p. 522–528, 2004.
- PIAU, W. C. **Efeitos de escórias de siderurgia em atributos químicos de solos e na cultura do milho (*Zea mays* L.)**. 1995. 124 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade do Estado de São Paulo. Piracicaba, 1995.
- PRADO, R.M. A calagem e as propriedades físicas de solos tropicais: revisão de literatura. **Revista Biociência**, v.9, p.7-16, 2003.
- PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vasos. **Scientia Agrícola**, v.57, p. 739-744, 2000.

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**, v.36, p.1199-1204, 2001.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M.; NATALE, W. **Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil** – Estudos na cultura da cana-de-açúcar. Jaboticabal, Funep, 2001. 68p.

PRADO, R.M.; NATALE, W. Efeitos da aplicação da escória de siderurgia ferrocromo no solo, no estado nutricional e na produção de matéria seca de mudas de maracujazeiro. **Revista Brasileira Fruticultura**, v. 26, p.140-144, 2004.

PRADO, R.M.; NATALE, W. Efeito da aplicação de silicato de cálcio no crescimento, no estado nutricional e na produção de matéria seca de mudas de maracujazeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, p.185-190, 2005.

PREZOTTI, L. C.; MARTINS, A. G. Efeito da escória de siderurgia na química do solo e na absorção de nutrientes e metais pesados pela cana-de-açúcar. **Revista Ceres**, v.59, p.530-536, 2012.

PULZ, A.L.; CRUSCIOL, C.A.C.; LEMOS, L.B.; SORATTO, R.P. Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade de batata sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1651 - 1659, 2008.

QUAGGIO, J.A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2000. 111p.

RAIJ, B.van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba, POTAFOS, 1983. 142 p.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônômico, 2001. 285p.

RAIJ, B. van; SILVA, N. M.; BATAGLIA, O. C.; QUAGGIO, J. A.; HIROCE, R.; CANTARELLA, H.; BELLINAZZI JR., R.; DECHEN, A. R.; TRANI, P. E. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996. 285p. (Boletim técnico, 100).

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

REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C.; ANDRADA, M.M.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em argissolo vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.1805-1816, 2008.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.151-160, 2001.

RHEINHEIMER, D.S., SANTOS, E.J.S., KAMINSK, J., BORTOLUZZI, E.C., GATIBONI, L.C. Alterações de atributos do solo pela calagem superficial e incorporada a partir de pastagem natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p.794-805, 2000.

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

RODRIGUES, L.L.; DAROUB, S.H.; RICE, R.W.; SNYDER, G.H. Comparison of three soil test methods for estimating plant-available silicon. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.34, p.2059-2071, 2003.

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

SILVA, M.G. **Avaliação de sistemas de produção e aplicação superficial de corretivos em plantio direto**. Ilha Solteira, 2009. 146f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista.

SILVA, V.; MOTTA, A.C.V.; MELO, V.F.; LIMA, V.C. Variáveis de acidez em função da mineralogia da fração argila do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 551-559, 2008.

SILVA, T.R.B.; LEMOS, L.B.; CRUSCIOL, C.A.C. Desempenho agrônômico e diagnose foliar da aveia preta em função da calagem superficial em plantio direto. **Journal of Agronomic Sciences**, v.1, p.24-33, 2012.

SILVEIRA, M.L.A.; ALLEONI, L.R.F.; GUILHERME, L.R.G. Biosolids and heavy metals in soils. **Scientia Agrícola**, v.60, p. 793-806, 2003.

SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F.; JUNIOR ALVES, J.; SILVA, J.G. Efeitos do manejo do solo sob plantio direto e de culturas na densidade e porosidade de um Latossolo. **Bioscience Journal**, v.24, p. 53-59, 2008.

SNYDER, G. H. **Development of a silicon soil test for Histosol-grown rice**. Belle Grade: University of Florida, 1991. (EREC Res. Rep. EV-1991-2).

SOBRAL, M. F.; NASCIMENTO, C.W.A.; CUNHA, K.P.V; FERREIRA, H.A.; SILVA, A.J.; SILVA, F.B.V. Escória de siderurgia e seus efeitos nos teores de

nutrientes e metais pesados em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, p.867-872, 2011.

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

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

SORATTO, R. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Produção de fitomassa e acúmulo de nutrientes pela aveia-preta em função da aplicação de calcário e gesso em superfície na implantação do sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v. 38, p. 928-935, 2008(b).

SOUZA, M. A.S.; FAQUIN, V. GUELF, D.R.; OLIVEIRA, G.C.; BASTOS, C.E.A. Acúmulo de macronutrientes na soja influenciado pelo cultivo prévio do capim-marandu, correção e compactação do solo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 611-622, 2012.

SOUZA, R.T.X.; KORNDÖRFER, G.H. Slag efficacy as a lime and silicon source for rice crops through the biological method. **Journal of Plant Nutrition**, v. 33, p. 1103–1111, 2010.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York, Oxford University Press, 2008. 329p.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p. 395-401, 2001.

TAVAKKOLI, E.; ENGLISH, P.; GUPPY, C.N. Interaction of silicon and phosphorus mitigate manganese toxicity in rice in a highly weathered soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v.42, p. 503-513, 2011.

TISSI, J.A.; CAIRES, E.F.; PAULETTI, V. Efeitos da calagem em semedura direta de milho. **Bragantia**, v.63, p. 405-413, 2004.

VELOSO, C. A. C.; MURAOKA, T.; MALAVOLTA, E.; CARVALHO, J.G. Influência do manganês sobre a nutrição mineral e crescimento da pimenteira-do-reino. **Scientia Agrícola**, v. 52, p. 376-383, 1995.

ZANÃO JUNIOR, L.A.; FONTES, R.L.F.; ÁVILA, V.T.; KORNDÖRFER, G.H. Absorção de cálcio e ferro por arroz cultivado em solução nutritiva com doses de silício e manganês. **Scientia Agraria** v.11, p.263-269, 2010.