

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, NUTRIÇÃO E
PRODUTIVIDADE DA CANA-PLANTA EM FUNÇÃO DA
APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO E DE ESCÓRIA DE
SIDERURGIA**

Ivana Machado Fonseca

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: Prof. Dr. Wanderley José de Melo

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Janeiro de 2011

Fonseca, Ivana Machado
F676a Atributos químicos do solo, nutrição e produtividade da cana-planta em função da aplicação de nitrogênio e de escória de siderurgia / Ivana Machado Fonseca. -- Jaboticabal, 2011
xv, 82 f. : il. ; 28 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2011

Orientador: Renato de Mello Prado

Banca examinadora: Edson Luiz Mendes Coutinho, Francisco Maximino Fernandes, José Lavres Junior, Miguel Ângelo Mutton

Bibliografia

1. Solo-calagem. 2. Solo-silicatos de cálcio e magnésio. 3. Fertilizante-adubação nitrogenada. 4. Nutrição de plantas-cana-de-açúcar. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.452:633.61

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

CAMPUS DE JABOTICABAL

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

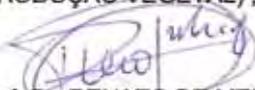
TÍTULO: ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, NUTRIÇÃO E PRODUTIVIDADE DA CANA-PLANTA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO E DE ESCÓRIA DE SIDERURGIA

AUTORA: IVANA MACHADO FONSECA

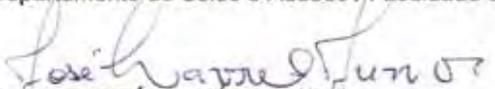
ORIENTADOR: Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO

Co-Orientador: Prof. Dr. Wanderley José de Melo

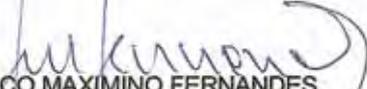
Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA (PRODUÇÃO VEGETAL), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO

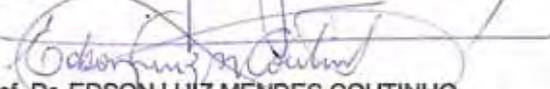
Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. JOSÉ LAVRES JUNIOR

Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas / Usp/ Cena - Centro de Energia Nuclear Na Agricultura / Piracicaba/SP


Prof. Dr. FRANCISCO MAXIMINO FERNANDES

Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira


Prof. Dr. EDSON LUIZ MENDES COUTINHO

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal


Prof. Dr. MIGUEL ANGELO MUTTON

Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

Data da realização: 11 de janeiro de 2011.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

IVANA MACHADO FONSECA, nascida em Montes Claros – MG no dia 22 de dezembro de 1980, possui graduações em Ciências Biológicas pela Universidade Estadual de Montes Claros (2002) e em Engenharia Agrônoma pela Universidade Federal de Minas Gerais (2004). cursou mestrado em Agronomia "Ciência do Solo" pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (FCAV/Unesp), Câmpus de Jaboticabal (2006-2007), onde desenvolveu pesquisas na área de Fertilidade do Solo e Qualidade Ambiental, atuando na linha de estudo: Nutrição e Adubação de Plantas Forrageiras. Em julho de 2007, iniciou o curso de doutorado pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia "Produção Vegetal" nesta mesma universidade. Foi bolsista da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), realizando trabalhos nas linhas de pesquisa: Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, Manejo da Cana-de-açúcar, Gestão de Resíduos (escória de siderurgia) e Química Ambiental (metais pesados). Realizou doutorado sandwich (2009-2010) no departamento de Plant Pathology & Crop Physiology pertencente à Louisiana State University situada em Baton Rouge, LA, USA, onde desenvolveu pesquisas relacionadas à doença da ferrugem e nutrição da cana-de-açúcar. É autora/coautora de mais de 80 publicações, incluindo 15 artigos em periódicos (nacionais e internacionais) e dois capítulos de livros. Participou também de 32 eventos científicos, divulgando cerca de 21 trabalhos. Desde 2002, vem participando de vários projetos de pesquisa subvencionados por diversos órgãos de fomento (CNPq/FAPESP/FUNDUNESP/FAPEMIG). Coorientou alunos de graduação do curso de Agronomia da FCAV/Unesp. Com a tese intitulada "Atributos químicos do solo, nutrição e produtividade da cana-planta em função da aplicação de nitrogênio e de escória de siderurgia", obteve seu título de Doutora em Agronomia "Produção Vegetal" em janeiro de 2011.

Aos meus amados pais, Raimundo José da Fonseca e Nelma Machado Fonseca, pelos ensinamentos, dedicação, apoio e, principalmente, pelo exemplo de vida.

Aos meus queridos irmãos, Leandro e Fernanda, pelo amor, confiança e apoio.

Aos meus cunhados Fabiane e Juliano pelos incentivos, e aos meus sobrinhos André e Sara, que alegam tanto minha vida.

OFERTEÇO

Ao Thiago pelo amor e por estar sempre presente em minha vida.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, saúde e presença eterna ao meu lado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia “Produção Vegetal” da FCAV/Unesp, Câmpus de Jaboticabal, pela oportunidade e contribuição científica.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pela concessão da bolsa de estudo.

À FAPESP e ao CNPq pelo suporte financeiro concedido o qual viabilizou parte expressiva da execução desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Renato de Mello Prado, um agradecimento especial por sua excelente orientação, sempre muito eficiente e construtiva, além dos seus ensinamentos que muito contribuíram não só neste trabalho, mas em minha vida profissional. Agradeço também, a oportunidade de trabalharmos por cinco anos (mestrado e doutorado) e por ter confiado nas nossas idéias e metas traçadas ao longo dessa caminhada. Meus sinceros agradecimentos!

Ao Prof. Dr. Wanderley José de Melo pela coorientação sempre precisa, por suas valiosas sugestões e ensinamentos, além de todo apoio e incentivo ao longo do curso.

Ao Prof. Dr. Arthur Bernardes Cecílio Filho, coordenador do curso de Pós-Graduação em Agronomia “Produção Vegetal” da FCAV/Unesp, pela acessibilidade e atenção sempre quando necessário.

Ao Prof. Dr. José Carlos Barbosa e ao Eng. Agr. Walter Maldonado Júnior pela disponibilidade e ensinamentos estatísticos que muito contribuíram neste trabalho.

Aos membros das bancas examinadoras de qualificação e defesa pelas sugestões.

Aos professores e funcionários da FCAV/Unesp, em especial, aqueles do Departamento de Solos e Adubos (Laboratório de Análise de Solo e de Tecido Vegetal) e do Departamento de Tecnologia (Laboratório de Biogeoquímica), pelo apoio científico e na realização de diferentes etapas deste trabalho.

Aos funcionários da Fazenda Ensino, Pesquisa e Produção da FCAV/Unesp e à Usina São Martinho pelo auxílio nas atividades de campo.

Às “irmãs” de república Kelly, Mirelle, Déborah e Josi, companheiras de longas horas de estudo e bons momentos de descontração, além do apoio, incentivo e compreensão, meu eterno carinho!

Aos amigos de Pós-Graduação e do grupo GENPLANT: Adriana, Anarlete, Aline, Cíntia, Ancélio, Diego, André, Everton, Fernando, Marcus, Matheus, Paulo, Silvio (em especial), Thais e Thiago pela ajuda na condução do experimento e nas análises laboratoriais.

Aos professores do Departamento de Plant Pathology & Crop Physiology da Louisiana State University (LSU), Baton Rouge, USA, em especial, ao Prof. Dr. Jeffrey Hoy e ao Prof. Dr. Lawrence Datnoff, pela contribuição científica, acessibilidade e atenção durante todo o doutorado sandwich.

Aos pesquisadores Dr. Richard Johnson e Dr. Michael Grisham do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA/ARS/SSRC Sugarcane Unit, Houma, LA), pelos auxílios científicos prestados.

Aos amigos da LSU e de Baton Rouge: Afshin, Alejandro, Alessandro, Ashok e Mala, Carolyn, Druva, Eliane e Mário, Everlyne, Flávia, Freddy e sua família, Harsha, Rebecca, Márcia e André, Moara, Natália, Paulo, Ruoxi, Wilmer, Yenjit, pelos maravilhosos momentos de convívio, aprendizado e incentivo.

A minha família que tanto me apóia e me coloca em suas orações e ao meu namorado, pelo amor e confiança.

Enfim, a todos que participaram direta ou indiretamente deste trabalho, seja torcendo, trabalhando junto ou orando por mim, embora não mencionados, meus sinceros agradecimentos.

Muito Obrigada!!!

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMO.....	xiv
SUMMARY.....	xv
I. INTRODUÇÃO	1
II. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Cultura da cana-de-açúcar: aspectos econômicos vs. produtividade	3
2.2. Resposta da cana-planta à aplicação de nitrogênio.....	4
2.3. Importância do silício no sistema solo-planta.....	7
2.4. Relação silício e nitrogênio	8
2.5. Escória de siderurgia como fonte de silício	9
III. MATERIAL E MÉTODOS	11
3.1. Local do experimento, tipo de solo e planta	11
3.2. Tratamentos e delineamento estatístico	13
3.3. Plantio e condução do experimento	15
3.4. Amostragem e análise química do solo	18
3.5. Avaliações de desenvolvimento, amostragem e análise química da planta.....	19
3.6. Análise estatística	24
IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1. Efeitos dos tratamentos no solo	25
4.1.1. Atributos químicos do solo após 99 dias da aplicação da escória de siderurgia e do calcário.....	25
4.1.2. Atributos químicos do solo após seis meses do plantio da cana-de-açúcar	27

4.1.3. Atributos químicos do solo após quinze meses do plantio da cana-de-açúcar	41
4.2. Efeitos dos tratamentos na planta.....	47
4.2.1. Efeitos no desenvolvimento, na produção de massa seca e na produtividade da cana-planta	47
4.2.2. Efeitos na nutrição da cana-planta.....	53
4.2.4. Efeitos na qualidade tecnológica da cana-planta.....	62
V. CONCLUSÕES.....	65
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Atributos químicos do solo antes da instalação do experimento.	12
Tabela 2. Atributos químicos do solo (0-20 cm de profundidade) após o período de 99 dias da aplicação do calcário e da escória de siderurgia.	26
Tabela 3. Atributos químicos do solo em função das doses de N e da aplicação de escória de siderurgia e calcário, em quatro profundidades, aos seis meses após o plantio da cana-de-açúcar.	28
Tabela 4. Micronutrientes, alumínio, silício e nitrogênio (total e inorgânico - amônio, nitrato) em função das doses de N e da aplicação de escória de siderurgia e calcário, em quatro profundidades, aos seis meses após o plantio da cana-de-açúcar.	29
Tabela 5. Atributos químicos do solo em função das doses de N e da aplicação de escória de siderurgia e de calcário, em quatro profundidades, aos quinze meses após o plantio da cana-de-açúcar.	42
Tabela 6. Micronutrientes, Si e N (total e inorgânico - amônio, nitrato) em função das doses de N e da aplicação de escória de siderurgia e calcário, em quatro profundidades, aos quinze meses após o plantio da cana-de-açúcar.	44
Tabela 7. Efeitos dos tratamentos na altura das plantas, no número e no diâmetro do colmo da cana-de-açúcar aos 133, 278 e 447 DAP.	48
Tabela 8. Produtividade de colmos e produção de massa seca (MS) das partes da cana-planta (variedade RB855156) com e sem adição de Si aos 447 DAP.	51
Tabela 9. Estado nutricional da cana-planta (folha +1) em função dos tratamentos estudados.	54
Tabela 10. Acúmulo de nutrientes e de silício em diferentes partes da cana-planta em função dos tratamentos estudados.	56
Tabela 11. Estudos de regressão polinomial sobre o efeito de doses de N no acúmulo de nutrientes nas folhas e no colmo da cana-planta (variedade RB855156).	57

Tabela 12. Estudos de regressão polinomial sobre o efeito das doses de N associadas à aplicação de calcário e de escória de siderurgia no acúmulo de nutrientes no palmito e no colmo da cana-planta (variedade RB855156).	57
Tabela 13. Variáveis tecnológicas da cana-planta (variedade RB855156) em função das doses de N associada à aplicação de calcário e escória de siderurgia.....	63
Tabela 14. Estudos de regressão polinomial sobre o efeito de doses de N nas variáveis de qualidade tecnológica da cana-planta (variedade RB855156).	64

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Representação da ação da escória de siderurgia na neutralização da acidez do solo.....	10
Figura 2. Precipitação pluvial e temperatura média mensais de novembro de 2007 à abril de 2009 referente ao período da realização do experimento.	11
Figura 3. Operação de preparo do solo com gradagem na área experimental antes da instalação do experimento.....	13
Figura 4. Croqui da área experimental com os tratamentos (C = calcário, E = escória de siderurgia, D ₁ = 0 kg ha ⁻¹ de N, D ₂ = 30 kg ha ⁻¹ de N, D ₃ = 60 kg ha ⁻¹ de N, D ₄ = 90 kg ha ⁻¹ de N, D ₅ = 120 kg ha ⁻¹ de N), ilustrando as áreas útil (18 m ²) e total do experimento (36 m ²).....	14
Figura 5. Aplicação do herbicida glifosato [®] em área total do experimento.....	15
Figura 6. Sulco de plantio e distribuição das gemas da cana-de-açúcar durante a fase de plantio na área experimental.	16
Figura 7. Fotos do recipiente contendo vespas endoparasitóides (<i>Cotesia flavipes</i>) liberadas na área experimental.	17
Figura 8. Amostragem de solo após seis meses do plantio da cana-de-açúcar.....	18
Figura 9. Análise de desenvolvimento da cana-planta quanto à altura das plantas (a), número de colmo (b) e diâmetro do colmo (c) aos 278 DAP.....	20
Figura 10. Foto ilustrando a colheita manual do experimento realizada com apoio da equipe de trabalhadores da Usina São Martinho.	21
Figura 11. Fotos ilustrando a pesagem dos colmos na unidade experimental para determinação da produtividade por área utilizando célula de carga acoplada em trator.	21
Figura 12. Fotos ilustrando a coleta de plantas de cana-de-açúcar em 1,5 m da parcela, a separação em partes (folhas, palmito e colmo), a pesagem, a trituração e o acondicionamento das amostras em sacos plásticos.....	22

Figura 13. Fotos ilustrando a coleta de dez colmos contíguos para avaliação da qualidade tecnológica da cana-planta.....	23
Figura 14. Valor de pH (a) e concentração de Cu (b) no solo (10-20 cm de profundidade) em função das doses de N após seis meses do plantio da cana-de-açúcar. **, * – Significativo a 1 e 5% de probabilidade.....	30
Figura 15. Concentração de P no solo (0-10 cm de profundidade) em função das doses de N após seis meses do plantio da cana-de-açúcar. ** – Significativo a 1% de probabilidade.....	31
Figura 16. Superfícies de resposta das concentrações de K (a,b), Ca (c,d) e Mg (e,f) no solo em função de doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário e escória de siderurgia após seis meses do plantio. ** – Significativo a 1% de probabilidade.....	33
Figura 17. Superfícies de resposta dos atributos químicos SB (a,b), CTC (c,d) e V (e,f) no solo em função de doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário e escória de siderurgia após seis meses do plantio. ** – Significativo a 1% de probabilidade.....	34
Figura 18. Superfícies de resposta da concentração de H+Al no solo em função de doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário após seis meses do plantio. ** – Significativo a 1% de probabilidade.	35
Figura 19. Superfícies de resposta da concentração de Al (a, b) no solo em função das doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário e escória de siderurgia após seis meses do plantio. ** – Significativo a 1% de probabilidade.	35
Figura 20. Superfícies de resposta das concentrações de Fe (a,b), Mn (c,d), Zn (e,f) no solo em função de doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário e escória de siderurgia após seis meses do plantio. ** – Significativo a 1% de probabilidade.....	37
Figura 21. Superfícies de resposta da concentração de Si (a,b) no solo em função de doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário e escória de siderurgia após seis meses do plantio. ** – Significativo a 1% de probabilidade.	39

- Figura 22. Superfícies de resposta das concentrações de N-total (a,b), NH_4^+ (b, c) e NO_3^- (c, d) no solo em função de doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário e escória de siderurgia após seis meses do plantio. ** – Significativo a 1% de probabilidade.....40
- Figura 23. Concentrações de Mg (a), H+Al (b) e Fe (c) no solo em função das doses de N após quinze meses do plantio da cana-de-açúcar. **, *, ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não-significativo, respectivamente.43
- Figura 24. Concentração de Si no solo em função das doses de N após quinze meses do plantio da cana-de-açúcar em diferentes profundidades. **, *, ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não-significativo, respectivamente.45
- Figura 25. Superfícies de resposta das concentrações de NH_4^+ (a,b) e NO_3^- (c,d) no solo em função de doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário e escória de siderurgia após quinze meses do plantio. **, * – Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.....46
- Figura 26. Concentração de N-total no solo em função das doses de N após quinze meses do plantio da cana-de-açúcar. ** – Significativo a 1% de probabilidade.47
- Figura 27. Efeito da adubação nitrogenada na altura das plantas (a) e sua interação com o calcário e a escória no número de colmos (b) da cana-de-açúcar aos 133 DAP. **, * – Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.49
- Figura 28. Efeito da adubação nitrogenada e sua interação com o calcário e a escória no número de colmos da cana-de-açúcar aos 278 DAP. **, * – Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.....50
- Figura 29. Repartição dos macronutrientes N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) na cana-planta em função das doses de N associadas à aplicação de calcário (CAL) e de escória de siderurgia (ES).....59
- Figura 30. Repartição dos micronutrientes B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d), Zn (e) e de Si (f) na cana-planta em função das doses de N associadas à aplicação de calcário (CAL) e de escória de siderurgia (ES).....60

ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO, NUTRIÇÃO E PRODUTIVIDADE DA CANA-PLANTA EM FUNÇÃO DA APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO E DE ESCÓRIA DE SIDERURGIA

RESUMO – Os tecidos vegetais tendem a ficar mais tenros em sistemas de produção onde maior fertilização com nitrogênio (N) é exigida, favorecendo o auto-sombreamento das plantas; entretanto, com aplicação de silício (Si), há melhoria na arquitetura foliar, reduzindo tal fenômeno. Objetivou-se, com este estudo, avaliar os efeitos da adubação nitrogenada e sua interação com a adição de Si na forma de escória de siderurgia nos atributos químicos do solo, na nutrição e na produtividade da cana-planta. O experimento foi instalado em condições de campo no município de Jaboticabal, SP, Brasil. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 5x2, sendo cinco doses de N (0, 30, 60, 90 e 120 kg ha⁻¹) com Si (escória de siderurgia) e sem adição de Si (calcário), em delineamento em blocos ao acaso, com quatro repetições. Os atributos químicos do solo não diferiram com a aplicação de calcário ou de escória após 99 dias da aplicação dos materiais corretivos tampouco não houve mobilidade das bases no perfil do solo. A adubação nitrogenada com ou sem adição de Si não afetou as variáveis de desenvolvimento da cana-planta. Os maiores acúmulos de N, P, K, Mg, S, Cu e Zn ocorreram no colmo, ao passo que os maiores acúmulos de Ca, B, Fe, Mn e Si apresentaram-se nas folhas. Os elementos mais extraídos pela cana-planta (variedade RB855156) foram Si, K e N. Houve efeito da adubação nitrogenada na produtividade da cana-planta quando associada à adição de Si na forma de escória, ocorrendo aumento de 15 t ha⁻¹ na produção de colmos industrializáveis. O uso da adubação nitrogenada incrementou o teor de sacarose e fibra de forma linear, entretanto, não houve efeito da escória nas variáveis tecnológicas da cana-planta. De modo geral, a adubação nitrogenada associada à adição de Si na forma de escória mostra-se adequada ao cultivo da cana-planta.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., adubação nitrogenada, calcário, silicato de cálcio, resíduo siderúrgico

SOIL CHEMICAL ATTRIBUTES, NUTRITION AND CANE PLANT YIELD AS A FUNCTION OF NITROGEN AND SLAG APPLIED

SUMMARY – In cases where more N fertilization is applied, plant tissues are tender and self-shading of the plants may result. Moreover, Si is important because it promotes improved leaf architecture and reduces self-shading. The objective of this study was to evaluate the effect of nitrogen with addition of Si as slag in soil chemical properties, nutrition and cane plant yield. The experiment was carried out in Jaboticabal, Sao Paulo State, Brazil with five N rates: 0, 30, 60, 90, and 120 kg ha⁻¹ with Si (slag) and without Si (lime), in a randomized block with four replications. The soil chemical properties did not differ with the application of lime or slag in 99 days after application neither any mobility of bases in the soil profile was verified. Nitrogen fertilization with or without addition of Si did not affect the growth parameters of the cane plant. Accumulation of N, P, K, Mg, S, Cu and Zn mostly occurred in the stalk, while the highest Ca, B, Fe, Mn and Si accumulation were found in the leaves. Si, K and N were the most elements extracted by the cane plant (variety RB855156). No significant effects of N fertilization on cane plant yield; however, when associated with Si as slag, there was an increase of 15 t ha⁻¹ of stalks. Nitrogen fertilizer increased the sucrose content and fiber linearly, however, no effect of adding slag in the technological variables of the cane plant. In general, nitrogen associated with Si added in the form of slag proved to be adequate for the cultivation of cane plant.

Keywords: *Saccharum* spp., nitrogen fertilization, calcium silicate, lime, siderurgical residue

I. INTRODUÇÃO

A atividade canavieira no Brasil vem apresentando um crescimento acelerado na produção e na área plantada de cana-de-açúcar em decorrência do aumento da demanda por açúcar e álcool. Por sua vez, maior exigência de questões a serem respondidas frente à cultura são evidenciadas; dentre elas, a prática de adubação nitrogenada a ser empregada ou não na cana-planta.

É conhecida a importância do nitrogênio (N) no maior vigor da cana-de-açúcar, nos incrementos da produção e sobretudo na longevidade do canavial. Entretanto, na cana-planta, alguns estudos têm apresentado resultados muito variáveis e até mesmo contraditórios quanto à aplicação de nitrogênio. Foi verificado que a resposta da cana-planta ao N foi menor e menos frequente que a observada em cana-soca (ZAMBELLO JÚNIOR & AZEREDO, 1983; CANTARELLA & RAIJ, 1985; PRADO & PANCELLI, 2008). Contudo, outros trabalhos evidenciaram resposta da cana-planta à adubação nitrogenada (KORNDÖRFER et al., 1997; TRIVELIN et al., 2002; BOLOGNA-CAMPBELL, 2007), especialmente, quando a análise conjunta de experimentos foi realizada (ALBUQUERQUE & MARINHO, 1983; CANTARELLA et al., 2007).

Além de aumentar a produtividade de colmos de cana-de-açúcar, a adubação nitrogenada pode gerar efeito sinérgico na absorção de outros nutrientes. Contudo, há informações que o incremento da adubação nitrogenada promove redução nos teores de outros elementos como o silício (Si) (WALLACE, 1989).

O Si tem recebido pouca atenção dos pesquisadores, provavelmente, por não ser considerado elemento essencial às plantas. No entanto, os efeitos benéficos desse elemento têm sido demonstrados em várias espécies vegetais, especialmente, quando estas plantas são submetidas a algum tipo de estresse, seja de caráter biótico ou abiótico (DATNOFF et al., 2001; FARIA, 2000; KORNDÖRFER et al., 2002a).

No caso do N, em sistemas de produção intensiva, em que maior fertilização nitrogenada é exigida, há relatos de que os tecidos das plantas ficam tenros, suscetíveis à penetração de agentes externos como pragas e patógenos, além do maior

auto-sombreamento das plantas no campo, com diminuição da taxa fotossintética (MALAVOLTA, 2006), favorecendo o acamamento das plantas e dificultando a colheita.

Dessa forma, incluir a adubação silicatada na cultura da cana-de-açúcar pode ser uma alternativa interessante, uma vez que, após ser absorvido, o Si é depositado nas paredes das células, contribuindo substancialmente para fortalecer a estrutura da planta e aumentar a resistência ao acamamento (EPSTEIN, 1999). Além disso, são verificados aumentos no crescimento e na produção de biomassa de um grande número de plantas, principalmente as monocotiledôneas (RAID et al., 1992; EPSTEIN, 1994), e redução da taxa de senescência foliar de forma que as folhas ficam fotossinteticamente ativas por mais tempo (PRADO & FERNANDES, 2000).

A extração de Si na cultura da cana-de-açúcar é muito elevada, com níveis próximos a extração de N (MANECHINI & DONZELLI, 1984), podendo variar de 0,14% em folhas jovens até 6,7% nos colmos e folhas velhas (KORNDÖRFER et al., 2002b). ROSS et al. (1974) citam uma exportação de até 408 kg ha⁻¹ de Si para uma produtividade de 74 t ha⁻¹ de cana-de-açúcar. Em função disso, tem-se verificado aumentos entre 10 e 35% na produtividade desta cultura com a aplicação de silicato no solo (KIDDER & GASCHO, 1977; SILVEIRA JÚNIOR et al., 2003).

Em geral, a fonte de Si mais utilizada para a agricultura é a escória de siderurgia, resíduo siderúrgico composto de silicato de cálcio e de magnésio, que lhe confere propriedade corretiva da acidez do solo semelhante à do calcário (PRADO et al., 2001). Alguns estudos foram realizados no Brasil e verificaram a viabilidade das escórias na cana-de-açúcar como corretivo da acidez do solo (PRADO & FERNANDES, 2001; PRADO et al., 2003) e como fonte de Si (KORNDÖRFER et al., 2002a), porém, inexistem pesquisas da relação do Si com outros nutrientes na cana-de-açúcar.

Nestas circunstâncias, espera-se com o presente estudo, que a aplicação de escória siderúrgica como fonte de Si promova a máxima expressão do N, sustentando o alto potencial produtivo das plantas de cana-de-açúcar.

Diante disso, objetivou-se avaliar os efeitos da adubação nitrogenada e sua interação com a adição de Si na forma de escória de siderurgia nos atributos químicos do solo, na nutrição e na produtividade da cana-planta.

II. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cultura da cana-de-açúcar: aspectos econômicos vs. produtividade

Atualmente, o Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, participando com cerca de 33% da produção mundial, seguido pela Índia (22%) e China (7%). A produção brasileira concentra-se nas Regiões Sudeste (67%), Nordeste (12%) e Centro Oeste (11%). Calcula-se que a produção brasileira de cana-de-açúcar para safra de 2010/11 atinja cerca de 8,9 milhões de hectares, dos quais 7 milhões se destinarão à produção de açúcar e álcool. O Centro Sul e o Estado de São Paulo são responsáveis por 85 e 60%, respectivamente, desta produção de cana-de-açúcar (AGRIANUAL, 2011).

A cadeia produtiva da cana-de-açúcar tem grande importância no cenário sócio-econômico brasileiro, uma vez que é responsável por uma parte expressiva do produto interno bruto (PIB), cerca de 2,4%, o que corresponde a 7 bilhões de dólares por ano (BRASIL, 2007), além de permitir o uso de uma fonte de energia renovável e gerar divisas com a exportação de açúcar e álcool, bem como a criação de empregos.

Para a manutenção da competitividade desta cadeia, é importante que as áreas agrícola, industrial e administrativa apresentem ganhos de produtividade. Por sua vez, estes ganhos podem ser obtidos por meio do aumento da produção de colmos por unidade de área, do aumento do teor de açúcar nos colmos e pela maior longevidade do canavial. Dessa forma, deve-se adequar os fatores relativos ao sistema solo-planta-atmosfera às práticas culturais, bem como incrementar o entendimento da interação entre esses fatores, a fim de aumentar esses rendimentos.

Um dos aspectos conhecidos e responsáveis pela alta produção da cana-de-açúcar é a adequada nutrição da cultura, tendo em vista a baixa fertilidade dos solos brasileiros. A cultura canvieira, instalada em uma vasta área (9 milhões de hectares), consome cerca de 0,43 tonelada de fertilizantes por hectare, caracterizando a cana-de-açúcar como a cultura em que se aplica mais adubo por unidade de área (ÚNICA, 2009), com destaque ao N que é um dos nutrientes mais extraídos do solo pela cana,

além de ser o componente dos fertilizantes mais presente no sistema agrícola (MAE, 1997; TRIVELIN, 2000).

2.2. Resposta da cana-planta à aplicação de nitrogênio

A adubação nitrogenada destaca-se como uma das práticas culturais de maior demanda de pesquisas para as culturas de maneira geral. Entretanto, para a cultura da cana-de-açúcar é preciso atenção especial, pois, estudos sobre N apresentam resultados muito variáveis e até mesmo contraditórios.

Uma questão não esclarecida na cultura da cana-de-açúcar é a baixa resposta da cana-planta à adubação nitrogenada. Observa-se na literatura que a resposta em produtividade da cultura às doses de N em experimentos individualizados com cana-planta é pouco expressiva, não havendo efeito deste elemento na maioria dos casos.

ESPIRONELO (1987) cita trabalhos em que não se encontrou resposta da cana-planta à adubação nitrogenada, sendo que a menor necessidade de N foi encontrada em solos que já haviam sido cultivados com esta cultura. Da mesma forma, outros autores também verificaram baixa resposta da cana-planta ao N (ALBUQUERQUE & MARINHO, 1983; ZAMBELLO JÚNIOR & AZEREDO, 1983; CANTARELLA & RAIJ, 1985; AZEREDO et al., 1986; PRADO & PANCELLI, 2008).

A falta de resposta da cana-planta à adubação nitrogenada tem sido atribuída à fixação biológica do N-atmosférico; às perdas por lixiviação do N-fertilizante; ao vigor do sistema radicular da cana-planta comparada ao de soqueiras; às condições climáticas como temperatura e pluviosidade; à melhoria da fertilidade do solo após a reforma dos canaviais, ao preparo mecânico associada à prática da calagem e à incorporação de restos da cultura anterior (AZEREDO et al., 1986; CARNAÚBA, 1990; ORLANDO FILHO et al., 1999; URQUIAGA et al., 1992). CARNEIRO et al. (1995) procuraram demonstrar que o conteúdo de N do tolete de plantio também pode contribuir para a nutrição nitrogenada da cana-de-açúcar e, juntamente com os demais fatores que disponibilizam o N à cultura, justificaria em parte, a falta de resposta da cana-planta à fertilização nitrogenada.

Outros fatores, tais como variedades responsivas ao N e atendimento aos limites críticos de disponibilidade de nutrientes no solo também podem ser citados como justificativas à reduzida resposta da cana-planta à adubação nitrogenada (BOLOGNA-CAMPBELL, 2007).

Contudo, outros trabalhos evidenciaram resposta da cana-planta à adubação nitrogenada (SILVEIRA & CROCOMO, 1990; KORNDÖRFER et al., 1997; ORLANDO FILHO et al., 1999; TRIVELIN et al., 2002; BOLOGNA-CAMPBELL, 2007), especialmente, quando a análise conjunta de experimentos foi realizada (ALBUQUERQUE & MARINHO, 1983; CANTARELLA et al., 2007). Segundo ESPIRONELO (1989), o nitrogênio promoveu aumentos lineares na produção de colmos (20 e 37 t ha⁻¹) e no teor de açúcar (2,2 e 7,4 kg t⁻¹ de cana) da cana-planta.

Além disso, PENATTI et al. (1997) e ORLANDO FILHO et al. (1999) afirmaram que a resposta da cana-planta ao N se refletiu no maior vigor das soqueiras, aumentando a produção nos cortes subsequentes, entre a cana-de-açúcar com adubação e sem adubação nitrogenada. Segundo esses autores, o manejo inadequado de um canavial, especialmente na adubação nitrogenada, pode resultar tanto em redução da produtividade da cultura quanto na sua longevidade, reduzindo, por conseguinte, o número de colheitas ou cortes entre as reformas.

Outro aspecto a ser considerado refere-se à quantidade de N fornecida no cultivo da cana-de-açúcar. CARNAÚBA (1990) fez um levantamento em mais de 20 trabalhos e observou que as doses de N responsáveis pela maior produtividade da cana-de-açúcar variaram de 25 a 400 kg ha⁻¹.

No Estado de São Paulo, a recomendação do Instituto Agrônomo de Campinas para esta cultura é de 30 kg ha⁻¹ de N a serem aplicados no sulco de plantio, e de 30 a 60 kg ha⁻¹ em cobertura, 30 a 60 dias após o plantio em função da meta de produtividade desejada (SPIRONELLO et al., 1997).

MORELLI et al. (1997) recomendaram a dose de 40 kg ha⁻¹ de N exclusivamente no sulco de plantio, mesmo não obtendo muitas respostas à adubação nitrogenada pela cana-planta, em solos distróficos e de textura arenosa. KORNDÖRFER et al. (1997) obtiveram resposta da cana-planta às doses de 30, 60 e 120 kg ha⁻¹ de N em solos

distróficos de textura média no Triângulo Mineiro. ORLANDO FILHO et al. (1999) observaram respostas da cana-planta às doses de 60 e 120 kg ha⁻¹ em solo eutrófico no Estado de São Paulo, e PENATTI et al. (1997), que realizaram experimentos em vários tipos de solo, recomendaram com base na margem de contribuição agroindustrial (R\$ ha⁻¹) a dose de 50 kg ha⁻¹ de N.

Nesse sentido observam-se divergências quanto à quantidade de N a ser aplicada no plantio da cana-de-açúcar, indicando a importância de pesquisas científicas em torno da dose adequada de N e das respostas às aplicações deste elemento.

Paralelo a este contexto, ainda surgem dúvidas sobre a possibilidade de impacto ambiental negativo com elevadas doses de N, em virtude do potencial de perda de N por lixiviação na forma de N-NO₃⁻ e, por conseguinte, a contaminação do lençol freático, especialmente, em condições de clima tropical (MELLO, 1987). Segundo esse autor, este fato pode ser agravado, principalmente, com uso intensivo de calcário, que acelera a degradação do material orgânico e estimula a nitrificação.

O NO₃⁻ no solo provém, principalmente, do fertilizante nitrogenado aplicado ou da mineralização da matéria orgânica. Quando o NO₃⁻ na solução do solo não é absorvido pelas plantas ou imobilizado pela microbiota do solo pode ser facilmente lixiviado, pois, apresenta carga negativa e não é adsorvido pelos colóides do solo que apresentam predominantemente cargas negativas (PRIMAVESI et al., 2006).

VITTI et al. (2007), em experimento objetivando avaliar as perdas do N em aplicações em faixa e em área total na cultura da cana-de-açúcar, constataram perdas de 46 e 37% do N-adubo, respectivamente. Conforme os autores, a maior perda pode relacionar-se à concentração do fertilizante em uma menor área, fazendo com que a urease da palha e/ou do solo atue por mais tempo na hidrólise da uréia.

Assim, estudos envolvendo a adubação nitrogenada na cultura da cana-de-açúcar, fazem-se oportuno, também, o acompanhamento da dinâmica do N no solo, para contribuir na discussão dos resultados sobre a resposta da cana-de-açúcar à aplicação desse nutriente.

2.3. Importância do silício no sistema solo-planta

O Si é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre, ocorrendo, principalmente, no mineral inerte das areias, o quartzo (SiO_2), bem como na caulinita e outros minerais de argila. Os solos do cerrado brasileiro, em geral, bastante intemperizados e lixiviados, com acentuada dessilicatização e deficientes em bases, conferem uma fração argilosa essencialmente constituída de caulinita e sesquióxidos, com baixa relação molecular $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (relação Ki), algumas vezes inferior a 0,5 (EMBRAPA, 1982).

Do ponto de vista agrônômico, uma das principais formas de Si no solo, a forma absorvível pelas plantas, é o ácido monossilícico (H_4SiO_4) (McKEAGUE & CLINE, 1963) que se encontra em maior parte na forma não dissociada ($\text{pK}_1 = 9,6$) (RAVEN, 1983).

RAIJ & CAMARGO (1973) verificaram em solos, de diferentes textura e idade do Estado de São Paulo, que os menores valores de Si solúvel ocorreram no Latossolo textura média e os maiores valores num Argissolo. Esses autores encontraram teores de Si extraível com CaCl_2 $0,0025 \text{ mol L}^{-1}$ variando de 1 a 43 mg dm^{-3} .

Segundo KORNDÖRFER et al. (2002c), em geral, há necessidade de adubação com Si quando a concentração no solo é inferior a 20 mg dm^{-3} . Esses mesmos autores reconhecem que a calibração da análise do solo para o Si depende da cultura, pois, há plantas que apresentam maior capacidade de acumulação de Si como o arroz, a cana-de-açúcar, o trigo, o sorgo e as gramíneas em geral, tendo melhor resposta à aplicação de silicatos. Salienta-se ainda, que cultivos sucessivos também podem reduzir o nível desse elemento no solo.

O contato íon-Si e raízes no solo ocorre por fluxo de massa até atingir a superfície das raízes, e sua absorção pela planta ocorre com baixo gasto energético pelas gramíneas (RAVEN, 1983). As plantas dicotiledôneas, por outro lado, apresentam mecanismos que evitam a absorção de quantidades elevadas de Si (RAIJ, 1991).

O teor de Si na massa seca permite dividir as plantas superiores em três grupos: acumuladoras, intermediárias e não acumuladoras (MIYAKE, 1992). As acumuladoras apresentam teor de SiO_2 entre 100 a 150 g kg^{-1} , as intermediárias, 10 a 50 g kg^{-1} e, as

não acumuladoras, teores menores que 5 g kg^{-1} . As gramíneas são acumuladoras típicas, nas quais os teores de Si atingem de 10 a 20 vezes mais do que em dicotiledôneas.

O incremento na produção das culturas com aplicação do Si pode ser explicado pelo benefício desse elemento em diversos processos fisiológicos das plantas (TAKAHASHI, 1995). O Si incrementa o crescimento e a produção de biomassa de grande número de plantas (a maioria monocotiledôneas), por prover rigidez nas estruturas celulares dos vegetais (EPSTEIN, 1994). Pode também reduzir a toxicidade por metais pesados, aliviar desbalanços entre nutrientes e aumentar a resistência ao estresse por salinidade (HODSON & EVANS, 1995), além de produzir efeitos benéficos contra a toxidez por alumínio (TISDALE et al., 1993).

A aplicação de Si na cana-de-açúcar promove incrementos na sua produção (RAID et al., 1992), além de reduzir a taxa de senescência foliar de forma que as folhas ficam fotossinteticamente ativas por mais tempo (PRADO & FERNANDES, 2000).

2.4. Relação silício e nitrogênio

Em sistemas de produção intensiva que atingem mais de duas colheitas por ano, maior fertilização é requerida, especialmente com N, nutriente altamente exigido pela maioria das culturas.

Existem relatos de que, com a maior aplicação de N, os tecidos das plantas ficam tenros, suscetíveis à penetração de agentes externos como pragas e patógenos, além do maior auto-sobreamento das plantas no campo, com queda na taxa de fotossíntese (MALAVOLTA, 2006).

MALAVOLTA & FORNASIERI FILHO (1983), BARBOSA FILHO (1987) e MAUAD et al. (2003) constataram que o uso de altas doses de N na cultura do arroz estimulou o perfilhamento e a formação de novas folhas, causando acamamento e, conseqüentemente, queda na produtividade da cultura.

Os benefícios do Si na fisiologia das plantas podem ser incrementados com níveis de N. Assim, o efeito do Si tende a ser mais intenso em cultivos com elevadas doses de N (TAKAHASHI, 1995).

Nestas circunstâncias, a aplicação de Si pode garantir a máxima expressão do N, sustentando o potencial das plantas de cana-de-açúcar em sistemas altamente produtivos. Um dos primeiros trabalhos que observaram efeito positivo entre Si e N foi relatado por OTA (1964) no Japão, em solo submetido à aplicação de Si utilizando como fonte a escória de siderurgia.

FONSECA et al. (2009 e 2011) também verificaram efeitos benéficos da interação Si x N em gramíneas, constatando que o aumento da absorção de Si promoveu incrementos na absorção dos macronutrientes pela *Brachiaria brizantha*, em especial para o N, aumentando conseqüentemente a produção de massa seca desta forrageira.

2.5. Escória de siderurgia como fonte de silício

Em geral, os materiais utilizados como fonte de Si para as plantas são: escórias de siderurgia, wollastonita, subprodutos da produção de fósforo elementar em fornos elétricos, metassilicato de cálcio, metassilicato de sódio, cimento, termofosfato, silicato de magnésio (serpentinóis) e silicato de cálcio (KORNDÖRFER et al., 2002c).

Entretanto, as escórias siderúrgicas consistem nas fontes de Si mais abundantes e de baixo custo para uso na agricultura (KORNDÖRFER et al., 2002c). Trata-se de um material com composição química e granulométrica bastante variável em função do tipo de processo, do minério de ferro e do sistema de forno utilizado.

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 presente no minério de ferro, constituída basicamente por silicatos de cálcio e de magnésio (PRADO et al., 2001). O material fundido é resfriado ao ar ou na água, depois é secado e moído. Para cada 4 t de ferro-gusa produzidas, gera-se, em média, 1 t de escória de alto forno (COELHO, 1998).

De acordo com ALCARDE (1992), a escória de siderurgia (CaSiO_3 ; MgSiO_3) também apresenta potencial para neutralizar a acidez do solo devido à liberação da base SiO_3^{-2} durante o processo de dissolução no solo (Figura 1).

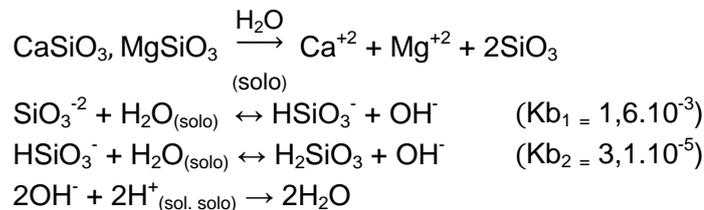


Figura 1. Representação da ação da escória de siderurgia na neutralização da acidez do solo.

O silicato presente nas escórias quando aplicado no solo pode ainda apresentar certa mobilidade superior ao carbonato dos calcários, com reflexos na lixiviação de bases no perfil, o que, conseqüentemente, favorecerá o desenvolvimento do sistema radicular das plantas em profundidade, especialmente em sistemas de produção agrícola com mínima ou nenhuma movimentação do solo, que visam sua conservação.

Segundo PLUCKNETT (1972), a aplicação da escória na cana-de-açúcar promoveu maior perfilhamento e número de colmos industrializáveis devido à absorção do Si pela planta. Estudando a aplicação da escória em dois locais da região de Everglades (Flórida, USA), ANDERSON (1991) verificou que a escória elevou o teor de Si foliar e incrementou a produção da cana-de-açúcar e de açúcar.

ELAWAD et al. (1982a) estudaram diferentes silicatos aplicados na cultura da cana-de-açúcar e observaram, independentemente da fonte, maior crescimento (altura, diâmetro do colmo, número de colmos) e maior produção da cana-de-açúcar no primeiro e segundo cortes. Os autores notaram, no mesmo experimento, um aumento no teor foliar de Si, além de um incremento no teor de clorofila e de macros e micronutrientes nas folhas dessa gramínea (ELAWAD et al., 1982b).

Os estudos no Brasil envolvendo a resposta da cana-de-açúcar à aplicação de Si na forma de escória de siderurgia em condições de campo são incipientes, principalmente, em razão do Si não ser elemento essencial às plantas.

III. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local do experimento, tipo de solo e planta

O experimento foi realizado em condições de campo na Fazenda Ensino, Pesquisa e Produção da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Unesp, Câmpus de Jaboticabal, SP, Brasil (21°14'05" S e 48°17'09" W), cujo clima caracteriza-se como megatérmico seco no inverno (Aw) segundo Köppen, com precipitação média de 2391 mm no período de novembro/2007 à abril/2009 (dados obtidos da Estação Agroclimatológica da FCAV/Unesp) (Figura 2).

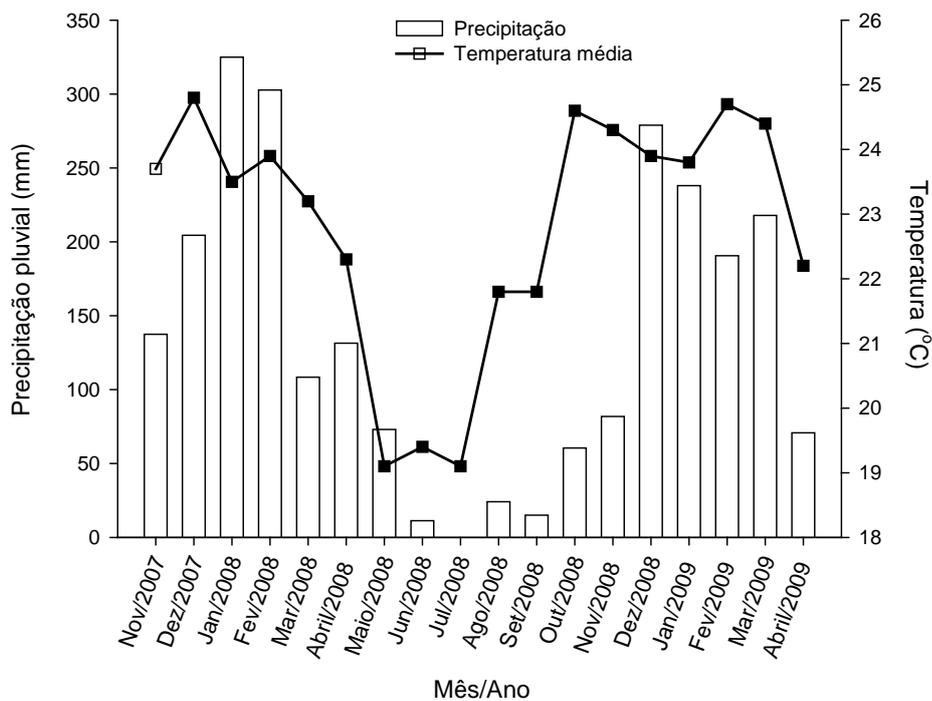


Figura 2. Precipitação pluvial e temperatura média mensais de novembro de 2007 à abril de 2009 referente ao período da realização do experimento.

O solo da área experimental, caracterizado pelos professores doutores Itamar Andrioli e José Frederico Centurion do Departamento de Solos e Adubos da

FCAV/Unesp, refere-se a um Latossolo Vermelho distrófico típico, textura média de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos descrito pela EMBRAPA (2006). Antes da implantação do experimento, foram coletadas 20 amostras simples de terra para compor uma amostra composta, nas camadas de 0-20; 0-10; 10-20; 20-40 e 40-60 cm de profundidade para fins de avaliação de fertilidade, nitrogênio total e de silício, conforme tabela 1.

Realizou-se ainda a determinação das concentrações de micronutrientes e de alumínio na camada de 0-20 cm, obtendo os seguintes valores: 0,18 mg dm⁻³ de B (boro¹⁰); 0,7 mg dm⁻³ de Cu (cobre¹¹); 19 mg dm⁻³ de Fe (ferro¹¹); 13,5 mg dm⁻³ de Mn (manganês¹¹); 0,5 mg dm⁻³ de Zn (zinco¹¹) e 6,0 mmol_c dm⁻³ de Al (alumínio¹²). Também foi analisado o teor de argila na camada de 0-40 cm de profundidade, obtendo-se 24,5% de argila (EMBRAPA, 1997).

Tabela 1. Atributos químicos do solo antes da instalação do experimento.

Camada	pH ¹	N ²	MO ³	P ⁴	K ⁴	Ca ⁴	Mg ⁴	H+Al ⁵	SB ⁶	CTC ⁷	V ⁸	Si ⁹
cm	CaCl ₂	g kg ⁻¹	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	mmol _c dm ⁻³						%	mg dm ⁻³
0-20	4,5	0,95	17	15	1,9	7	3	40	12,4	52,4	24	3,9
0-10	4,4	0,98	17	14	1,8	7	3	42	11,8	53,8	22	4,0
10-20	4,6	0,91	17	16	2,0	8	3	38	13,0	51,0	25	3,7
20-40	4,4	0,84	14	8	0,8	8	3	38	11,8	49,8	24	4,3
40-60	4,6	0,49	14	5	0,6	8	3	31	11,6	42,6	27	4,7

1. pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (QUAGGIO & RAIJ, 2001).

2. N-kjeldahl extraído por digestão com H₂SO₄ concentrado (TEDESCO et al., 1985).

3. MO: Matéria orgânica obtida pelo método colorimétrico - 0,667 mol L⁻¹ K₂Cr₂O₇ e 5 mol L⁻¹ H₂SO₄ (CANTARELLA et al., 2001a).

4. P, K, Ca, Mg extraídos pelo método da resina (RAIJ & QUAGGIO, 2001).

5. H+Al: Acidez potencial determinada em solução tampão SMP (Shoemaker-McLean-Pratt) (QUAGGIO & RAIJ, 2001).

6. SB: Soma de bases = Ca + Mg + K.

7. CTC: Capacidade de troca de cátions total a pH 7,0 = SB + (H+Al).

8. V: Porcentagem de saturação por bases = SB / CTC * 100.

9. Si: Silício solúvel em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (KORNDÖRFER et al., 2004).

10. Boro extraído em água quente (CIBa₂) (ABREU et al., 2001).

11. Extração por solução DTPA (LINDSAY & NORVELL, 1978).

12. Extração de Al em solução KCl 1 mol L⁻¹ (CANTARELLA et al., 2001b).

Em seguida, foi feito o preparo do solo com operação de aração e gradagem na área experimental para posterior instalação do experimento (Figura 3).



Figura 3. Operação de preparo do solo com gradagem na área experimental antes da instalação do experimento.

Utilizou-se como planta teste a cana-de-açúcar, variedade RB855156. Essa variedade foi obtida pela equipe do PMGCA/UFSCar (Universidade Federal de São Carlos) sendo classificada como precoce, com corte preconizado entre os meses de abril e maio, sendo geralmente, após 12 a 13 meses do plantio, apresentando boa produtividade – próximo de 107 toneladas de colmo por hectare no primeiro corte. Trata-se de uma variedade recomendada para solos de média fertilidade, com excelente capacidade de brotação em soqueiras, porte médio e adaptável à colheita mecanizada (PMGCA, 2008).

3.2. Tratamentos e delineamento estatístico

Os tratamentos foram constituídos por cinco doses de N ($D_1 = 0$; $D_2 = 30$; $D_3 = 60$; $D_4 = 90$; $D_5 = 120 \text{ kg ha}^{-1}$) determinadas a partir da dose de 90 kg ha^{-1} indicada para a cana-planta no Estado de São Paulo, objetivando alta produtividade ($> 150 \text{ t ha}^{-1}$) conforme SPIRONELLO et al. (1997), com e sem adição de silício. O delineamento

estatístico adotado foi em blocos casualizados em esquema fatorial 5x2, com quatro repetições, totalizando 40 unidades experimentais.

Cada unidade experimental correspondeu a uma parcela com quatro linhas de cana-de-açúcar de 6 m de comprimento espaçadas 1,5 m entre si, totalizando uma área de 36 m². Para todas as avaliações feitas no experimento, considerou-se uma área útil de 18 m² correspondente às duas linhas centrais de plantio, sendo as demais denominadas de bordaduras. As parcelas foram separadas por corredores de 1,5 m (Figura 4).

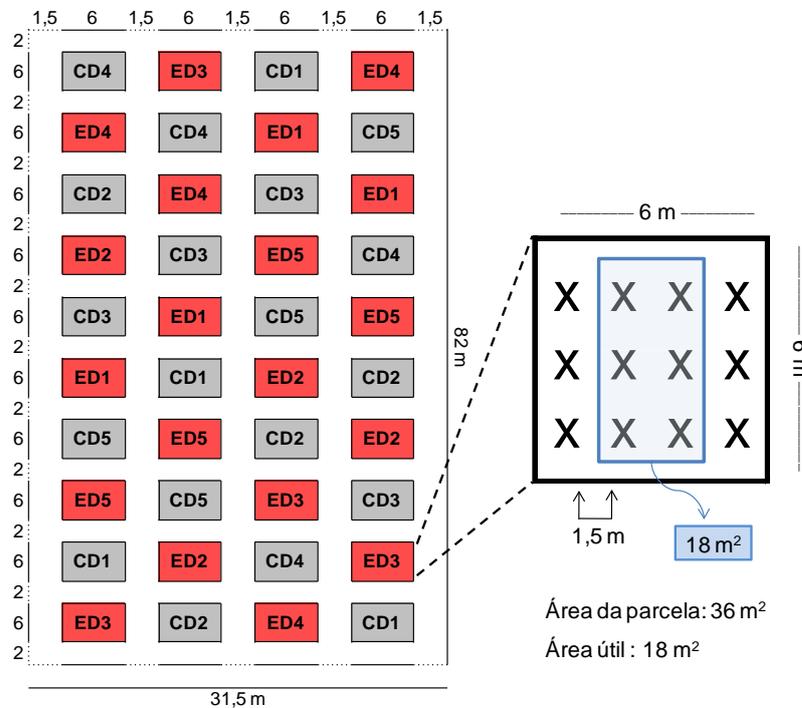


Figura 4. Croqui da área experimental com os tratamentos (C = calcário, E = escória de siderurgia, D₁ = 0 kg ha⁻¹ de N, D₂ = 30 kg ha⁻¹ de N, D₃ = 60 kg ha⁻¹ de N, D₄ = 90 kg ha⁻¹ de N, D₅ = 120 kg ha⁻¹ de N), ilustrando as áreas útil (18 m²) e total do experimento (36 m²).

Nos tratamentos com silício, utilizou-se a escória de siderurgia da empresa Recmix, denominada agrosilício[®] (PRNT = 72,3%, CaO = 42,1%, MgO = 12,4%, Si total

em HFconc = 8,1%, Si solúvel em $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3$ = 6,0%, Mn = 0,52%), e nos tratamentos sem adição deste elemento, utilizou-se o calcário (PRNT = 86,2%, CaO = 41,4% e MgO = 10,6%). Por apresentarem propriedade corretiva da acidez do solo, a quantidade de calcário e de escória utilizada seguiu a recomendação para elevar a saturação por bases a 60% (SPIRONELLO et al., 1997), aplicando-se 2,19 e 2,61 t ha⁻¹, correspondendo a 0 e 157 kg ha⁻¹ de Si solúvel para o calcário e escória de siderurgia, respectivamente. Efetuou-se a distribuição dos materiais corretivos manualmente em novembro de 2007. Em seguida, realizou-se a incorporação mecanizada com emprego inicial da enxada rotativa e, posteriormente, com arado de disco reversível (26"x3/16") regulado para operar a 20 cm de profundidade.

3.3. Plantio e condução do experimento

Para controle das plantas daninhas, anterior ao plantio (15-01-2008), efetuou-se a aplicação do herbicida glifosato[®] (2 L ha⁻¹ do produto comercial) em área total (Figura 5).



Figura 5. Aplicação do herbicida glifosato[®] em área total do experimento.

O plantio da cana-de-açúcar foi realizado em janeiro de 2008 (Figura 6). Foram colocadas 15 a 20 gemas viáveis da variedade RB855156 por metro no sulco de plantio, com propósito de avaliar a cultura no ano agrícola de 2008/2009 (cana-planta).



Figura 6. Sulco de plantio e distribuição das gemas da cana-de-açúcar durante a fase de plantio na área experimental.

No momento do plantio, empregaram-se os tratamentos com N sendo aplicados inicialmente 30 kg ha^{-1} e o restante aplicado em cobertura após 42 dias do plantio (DAP), conforme cada tratamento. Como fonte de N, utilizou-se a uréia (44% de N).

Para os demais nutrientes, P e K, aplicaram-se 140 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 120 kg ha^{-1} de K_2O na forma de superfosfato simples (18% P_2O_5) e cloreto de potássio (60% K_2O), respectivamente; distribuídos juntos com a adubação nitrogenada e de forma uniforme em todos os tratamentos. As doses foram baseadas na análise química do solo, seguindo a recomendação de adubação proposta por SPIRONELLO et al. (1997). Também foram aplicados no plantio $13,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de Mn na forma de sulfato de manganês, pulverizados em área total dos tratamentos com calcário a fim de suplementar este micronutriente conforme o encontrado na composição química da escória de siderurgia.

No momento do plantio, realizou-se também a aplicação do inseticida fipronil® (100 g ha⁻¹) em pulverização com bomba costal no sulco de plantio da cana para prevenção de pragas do solo.

Para controle de plantas daninhas de folhas largas e estreitas após o plantio, foram aplicados por pulverização mecanizada os herbicidas pós-emergentes 2,4 D (1,2 L ha⁻¹) e MSMA (2,4 L ha⁻¹), respectivamente, em área total com vazão de calda de 300 L ha⁻¹ no dia 25-02-2008. Posteriormente, foi feita a quebra do lombo, seguida da pulverização do herbicida pré-emergente Velpar (2,5 kg ha⁻¹) quando as plantas atingiram próximo a 1 m de altura.

Aos dez meses após o plantio (26-11-2008), foi feito o controle biológico (Biocontrol®) da broca da cana (*Diatraea saccharalis*), com a liberação da vespa endoparasitóide *Cotesia flavipes* em 4 pontos por hectare, cerca de 6000 parasitóides (Figura 7).



Figura 7. Fotos do recipiente contendo vespas endoparasitóides (*Cotesia flavipes*) liberadas na área experimental.

3.4. Amostragem e análise química do solo

A amostragem do solo foi realizada ao longo do período experimental, sendo aos 99 dias após a aplicação dos materiais corretivos (26-02-2008) na camada de 0-20 cm, coletando-se seis amostras simples na entrelinha da cultura (PRADO et al., 2001), e aos seis e quinze meses após o plantio da cana-de-açúcar (30-07-2008 e 24-04-2009, respectivamente) nas camadas de 0-10; 10-20; 20-40 e 40-60 cm de profundidade, coletando-se seis amostras simples por área útil na linha de plantio (Figura 8).



Figura 8. Amostragem de solo após seis meses do plantio da cana-de-açúcar.

Posteriormente, as amostras de terra foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com 2 mm de abertura de malha e encaminhadas ao laboratório para determinações analíticas para fins de fertilidade, conforme os métodos descritos

por RAIJ et al. (2001), concentração de silício “disponível” segundo a metodologia de extração proposta por KORNDÖRFER et al. (2004), e N-kjeldahl segundo método descrito por TEDESCO et al. (1985).

Aos seis e quinze meses após o plantio, imediatamente após a coleta da terra, parte das amostras também foi acondicionada em caixa térmica contendo gelo e encaminhada ao laboratório para a extração e determinação de N-inorgânico (amônio e nitrato) conforme método descrito por CANTARELLA & TRIVELIN (2001).

3.5. Avaliações de desenvolvimento, amostragem e análise química da planta

Para as análises de desenvolvimento, foram consideradas as variáveis altura das plantas, número de colmos e diâmetro médio do colmo aos 133, 278 e 447 DAP. A altura foi obtida a partir de 8 plantas por área útil medida na base do colmo até a inserção da folha +1 (primeira folha com a região da inserção da bainha visível). O número de colmos foi obtido em 1,5 m na linha de plantio e o diâmetro médio do colmo foi medido na base do primeiro entrenó, cerca de 8 cm do solo, em 8 plantas por área útil (Figura 9).

Aos 278 DAP, fase de maior desenvolvimento vegetativo da cana-de-açúcar, também foram realizadas amostragens de folhas (10 folhas por parcela na área útil), coletando-se os 20 cm centrais da folha +1 (folha mais alta com colarinho visível TVD – “Top Visible Dewlap”) e excluindo a nervura central para avaliação do estado nutricional da cana-planta (RAIJ & CANTARELLA, 1997).

Após a coleta das folhas, o material vegetal foi lavado em solução de detergente biodegradável neutro (1 mL L^{-1}), água corrente, solução de ácido clorídrico (HCl) $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e duas vezes em água deionizada. Após a lavagem, o material vegetal foi acondicionado em sacos de papel e colocado em estufa a 65°C para secagem durante o período de cinco dias. Depois de seco, foi moído em moinho tipo Willey, dotado de peneira de 40 mesh, acondicionado em sacos de papel, devidamente identificados, até o momento das análises.

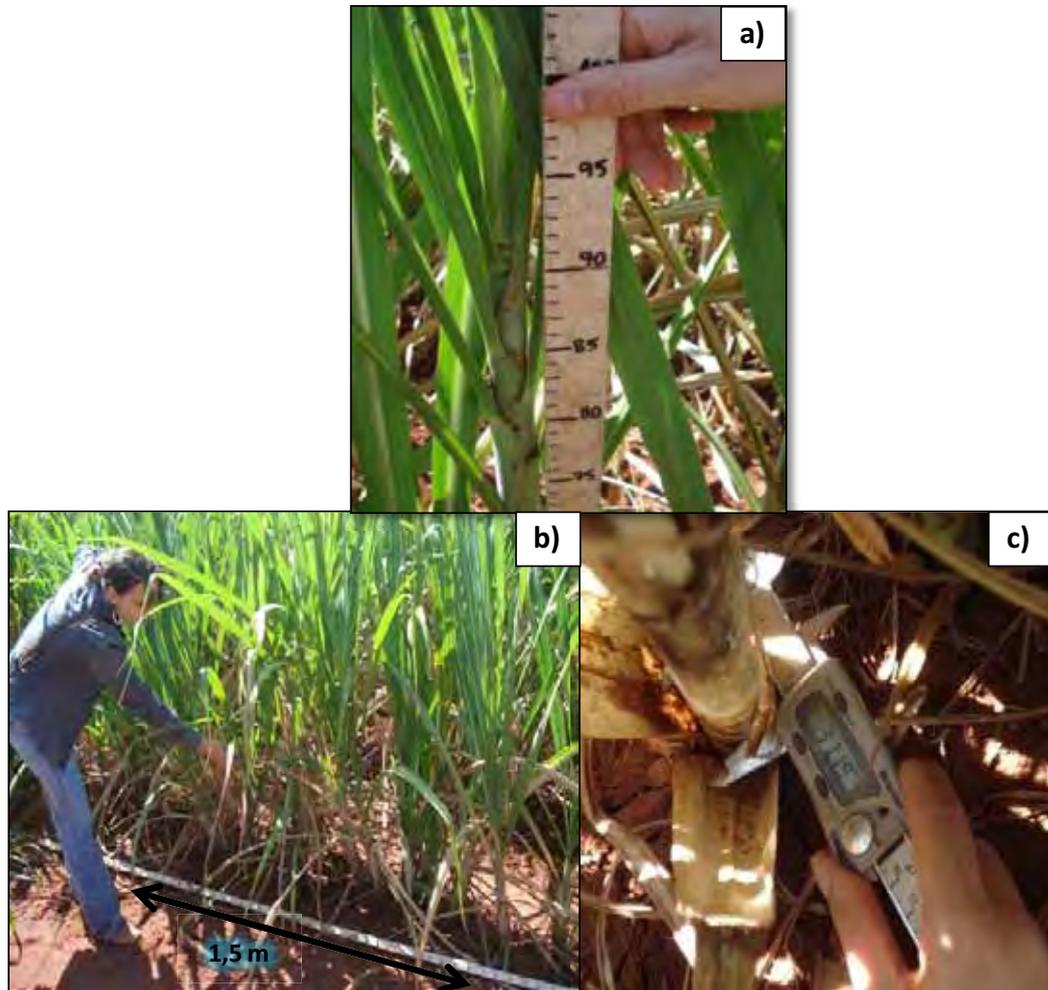


Figura 9. Análise de desenvolvimento da cana-planta quanto à altura das plantas (a), número de colmo (b) e diâmetro do colmo (c) aos 278 DAP.

Aos 447 DAP, realizou-se a colheita da cana-planta sem despalha a fogo (Figura 10). Avaliou-se a produção de colmos a partir da coleta dos colmos na área útil, e os valores foram expressos em $t\ ha^{-1}$ (Figura 11).



Figura 10. Foto ilustrando a colheita manual do experimento realizada com apoio da equipe de trabalhadores da Usina São Martinho.



Figura 11. Fotos ilustrando a pesagem dos colmos na unidade experimental para determinação da produtividade por área utilizando célula de carga acoplada em trator.

No momento da colheita, também foram coletadas amostras de plantas em 1,5 m das parcelas e separadas em folhas, palmito e colmo, pesando-se cada parte para determinação da massa úmida (Figura 12), seguindo-se da trituração dos tecidos vegetais em desintegrador do tipo forrageiro. Após homogeneização, subamostras de aproximadamente 100 g de folhas, de palmitos e de colmos foram secas em estufa de circulação forçada de ar a 65°C por dez dias, pesadas, moídas em moinho tipo Willey, e submetidas à determinação dos teores de nutrientes e de Si.



Figura 12. Fotos ilustrando a coleta de plantas de cana-de-açúcar em 1,5 m da parcela, a separação em partes (folhas, palmito e colmo), a pesagem, a trituração e o acondicionamento das amostras em sacos plásticos.

Os teores de nutrientes e de Si na folha +1, nas folhas, no palmito e no colmo, foram determinados conforme metodologias descritas por BATAGLIA et al. (1983) e KORNDÖRFER et al. (2004), respectivamente. O acúmulo dos nutrientes e de Si nas plantas foi calculado com base na produção de massa seca de cada parte da planta por área ($t\ ha^{-1}$) e no teor de cada elemento por kg de massa seca produzido.

Na ocasião da colheita, também foi realizada amostragem de dez colmos contíguos da linha central de cada parcela para a avaliação da qualidade tecnológica da cana-planta, realizada na Usina São Martinho (Figura 13). Na análise tecnológica foram determinados: teor de sacarose (Pol% cana), fibra, pureza e concentração de sólidos solúveis determinados segundo o método descrito pela CONSECANA-SP (2006).



Figura 13. Fotos ilustrando a coleta de dez colmos contíguos para avaliação da qualidade tecnológica da cana-planta.

3.6. Análise estatística

Aos resultados, foram realizadas análises de variância seguindo-se da aplicação do teste Tukey a 5% de probabilidade para comparação das médias das fontes de material corretivo, nos casos em que o teste F foi significativo (PIMENTEL-GOMES & GARCIA, 2002), e análises de regressão polinomial para estudo das doses de nitrogênio sobre as variáveis estudadas, utilizando o software AGROESTAT (BARBOSA & MALDONADO JR, s.a.).

Para as variáveis de solo após seis e quinze meses do plantio, realizou-se análise estatística em parcelas subdivididas, sendo os tratamentos principais compostos do fatorial 5x2 [cinco doses de N com adição de Si (escória) e sem adição de Si (calcário)] e, os tratamentos secundários formados pelas quatro profundidades do solo avaliadas. A partir desta, os dados foram ajustados ao modelo de superfície de resposta de segunda ordem quando as interações doses de N e profundidades do solo foram significativas (SAS, 2002). Nos casos em que o fator profundidade do solo não foi significativo na análise em parcelas subdivididas, foi feita a análise do fatorial isoladamente para cada profundidade e os dados apresentados em formas de figura quando ocorrido a significância dos tratamentos.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Efeitos dos tratamentos no solo

4.1.1. Atributos químicos do solo após 99 dias da aplicação da escória de siderurgia e do calcário

Verificou-se um incremento nos atributos P, Ca, Mg, SB, CTC e V, e uma redução na acidez potencial (H+Al) do solo (Tabela 2) quando comparado à caracterização química do solo antes da instalação do experimento (Tabela 1), evidenciado uma melhoria inicial na fertilidade do solo no momento do plantio.

O uso de escória ou de calcário apresentou efeitos semelhantes em todos os atributos químicos do solo após 99 dias da aplicação. Resultados semelhantes foram obtidos em outros trabalhos com uso de silicatos em experimentos de vasos (PRADO & FERNANDES, 2000) e também em experimentos de campo com escória de siderurgia (PRADO et al., 2003).

O efeito da escória na reação do solo ocorreu pela presença da base silicato (SiO_3^{2-}) gerada pela reação das escórias no solo (ALCARDE, 1992). Entretanto, observou que, neste período, não se atingiu o V% igual a 60 como desejado, independentemente do material corretivo utilizado. Provavelmente, isto ocorreu devido ao tempo relativamente curto para reação máxima dos corretivos, já que, na literatura, esse efeito no campo ocorre próximo aos 12-16 meses após a aplicação (PRADO, 2000), ou devido à granulometria dos corretivos. Segundo NATALE & COUTINHO (1994), as reatividades das frações granulométricas atribuídas ao calcário pela legislação só foram obtidas cerca de 18 meses após a aplicação do corretivo ao solo.

Pôde-se verificar também que não houve diferença entre a escória e o calcário para as concentrações de micronutrientes no solo. Porém, tendo em vista que a escória de siderurgia apresenta reação lenta, ou seja, maior efeito residual no solo (PRADO & FERNANDES, 2000), possivelmente, com maior tempo de incorporação assim como a saturação por bases, pode haver maior reação desse resíduo e, conseqüentemente,

maior liberação de micronutrientes (principalmente, o Cu e o Zn), e isso consiste em vantagem em relação ao calcário, pois segundo VALADARES et al. (1974) que analisaram duas escórias em comparação com dezesseis calcários de diferentes naturezas, as escórias apresentaram em sua composição quantidades significativas de micronutrientes.

PRADO et al. (2002a) também concluíram que a escória, além de ser considerada como material corretivo da acidez do solo, comportou-se como fonte de micronutrientes quando avaliaram a liberação de micronutrientes de uma escória aplicada em Argissolo Vermelho-amarelo cultivado com mudas de goiabeira.

Tabela 2. Atributos químicos do solo (0-20 cm de profundidade) após o período de 99 dias da aplicação do calcário e da escória de siderurgia.

Atributos químicos	Calcário	Escória de siderurgia	Teste F	CV (%)
pH (CaCl ₂)	4,8	4,8	0,62 ^{NS}	3,3
MO (mg dm ⁻³)	16	16	0,10 ^{NS}	6,8
P resina (mg dm ⁻³)	23	21	3,38 ^{NS}	13,0
K (mmol _c dm ⁻³)	1,7	1,6	1,52 ^{NS}	20,2
Ca (mmol _c dm ⁻³)	16	16	1,02 ^{NS}	11,9
Mg (mmol _c dm ⁻³)	6	6	0,00 ^{NS}	18,3
H+Al (mmol _c dm ⁻³)	34	35	1,65 ^{NS}	10,0
SB (mmol _c dm ⁻³)	24,1	23,3	0,79 ^{NS}	11,4
CTC (mmol _c dm ⁻³)	57,8	58,5	0,39 ^{NS}	5,3
V (%)	42	40	1,99 ^{NS}	11,1
B (mg dm ⁻³)	0,19	0,20	2,30 ^{NS}	8,2
Cu (mg dm ⁻³)	0,7	0,7	1,34 ^{NS}	10,6
Fe (mg dm ⁻³)	14	13	1,22 ^{NS}	15,3
Mn (mg dm ⁻³)	15,2	16,5	2,40 ^{NS}	15,0
Zn (mg dm ⁻³)	0,5	0,5	0,54 ^{NS}	24,5
Al (mmol _c dm ⁻³)	1,3	1,7	3,05 ^{NS}	42,3
Si (mg dm ⁻³)	4,0	5,4	147,31 ^{**}	6,9

** e ^{NS} - Significativo a 1% de probabilidade e não-significativo, respectivamente.

Em relação à concentração de Fe e de Al no solo, houve uma redução desses com a aplicação dos materiais corretivos. Isto pode ter ocorrido devido ao início da reação de neutralização da acidez do solo causada pelos corretivos que proporcionaram aumento no valor de pH, conseqüentemente, neutralizando o Fe e o Al através do processo de precipitação destes elementos no solo.

Quanto à concentração de Si “disponível” no solo, observou-se que houve um incremento de 38% (de 3,9 para 5,4 mg dm⁻³) em relação à concentração inicial quando se utilizou a escória de siderurgia (Tabela 2). Da mesma forma que os demais nutrientes, este incremento pode ser maior com o aumento no tempo de incorporação da escória no solo. KHALID et al. (1978) aplicaram silicato em diferentes condições de acidez do solo (pH 5,5; 6,0 e 6,5) em sistema de rotação de culturas (cana-de-açúcar, milho e capim-desmodium) e constataram que houve efeito residual do silicato, aumentando os teores de Si no solo.

4.1.2. Atributos químicos do solo após seis meses do plantio da cana-de-açúcar

Após seis meses do plantio da cana-de-açúcar, observou-se que a interação não foi significativa entre os tratamentos principais [fatorial: cinco doses de N com adição de Si (escória) e sem adição de Si (calcário)] e as profundidades do solo (tratamentos secundários) para o valor de pH, MO, P e Cu (Tabelas 3 e 4).

Com adição do calcário, os valores de pH, MO, P e Cu foram mais altos quando comparados aos valores obtidos com a escória de siderurgia. Em relação ao efeito da adubação nitrogenada para estes mesmos atributos químicos do solo, notou-se que o aumento das doses de N no plantio promoveu decréscimo linear no valor do pH e incrementou a concentração de Cu na camada de 10-20 cm de profundidade, independentemente do material corretivo utilizado (Figuras 14a, b).

Tabela 3. Atributos químicos do solo em função das doses de N e da aplicação de escória de siderurgia e calcário, em quatro profundidades, aos seis meses após o plantio da cana-de-açúcar.

Tratamentos	pH	MO g dm ⁻³	P-resina mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V	mmolc dm ⁻³	
											CaCl ₂	%
Material corretivo (MC)												
Calcário	4,4	17	31,8	1,7	12,4	5,2	37,6	19,3	56,9	34,1		
Escória	4,1	13	19,4	1,2	11,5	3,0	41,3	15,7	57,0 ^{NS}	27,6		
Teste F (MC)	**	**	**	**	*	**	**	**	NS	**		**
Doses de nitrogênio (N)												
0 kg ha ⁻¹	4,4	15	33,7	1,4	14,4	4,3	37,8	20,1	57,9	34,7		
30 kg ha ⁻¹	4,2	15	26,9	1,4	12,1	4,5	42,8	17,9	60,7	29,4		
60 kg ha ⁻¹	4,3	15	26,6	1,5	11,5	4,0	36,5	17,1	53,6	32,1		
90 kg ha ⁻¹	4,2	14	23,3	1,5	11,7	3,6	41,3	16,8	58,0	29,0		
120 kg ha ⁻¹	4,2	15	17,5	1,5	10,2	4,1	38,9	15,8	54,7	29,0		
Teste F (N)	**	NS	*	*	NS	**	**	**	**	**		**
Teste F (MC) X (N)	NS	**	**	**	NS	*	*	NS	NS	NS		NS
Profundidades (P)												
0-10 cm	4,2	15	24,0	1,5 a	11,2 b	4,0	39,1	16,6 b	55,7	29,9 b		
10-20 cm	4,2	15	28,5	1,5 a	11,7 b	4,2	40,3	17,3 b	57,6	30,1 b		
20-40 cm	4,3	15	25,8	1,3 b	13,1 a	4,3	39,1	18,8 a	57,8	32,5 a		
40-60 cm	4,2	15	24,2	1,6 a	11,9 ab	4,0	39,3	17,4 ab	56,7	30,9 ab		
Teste F (P)	NS	NS	NS	**	**	NS	NS	**	NS	NS		*
Tratamentos (TP) x (TS)												
Tratamentos (TP) x (TS)	NS	NS	*	**	**	**	**	**	**	**		**
Teste F (MC) x (P)	NS	NS	NS	**	NS	NS	*	NS	*	*		*
Teste F (N) x (P)	*	NS	NS	**	**	**	**	**	**	**		**
CV _{TP} (%)	4,1	7,7	73,3	14,1	20,9	18,0	8,6	16,2	8,0	11,5		
CV _{TS} (%)	4,2	6,6	54,2	13,1	15,4	19,7	8,8	12,3	6,5	11,7		

***, * e NS - Significativo a 1% e 5% de probabilidade e não-significativo, respectivamente.

Tabela 4. Micronutrientes, alumínio, silício e nitrogênio (total e inorgânico - amônio, nitrato) em função das doses de N e da aplicação de escória de siderurgia e calcário, em quatro profundidades, aos seis meses após o plantio da cana-de-açúcar.

Tratamentos	mg dm ⁻³				mmolc dm ⁻³				mg kg ⁻¹			
	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Al	Si	N-total	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻		
Material corretivo (MC)												
Calcário	0,32	0,83	14,8	25,3	0,49	1,9	5,7	1,2	14,9	24,1		
Escória	0,33 ^{NS}	0,71 ^{**}	12,3 ^{**}	13,2 ^{**}	0,15 ^{**}	3,7 ^{**}	7,3 ^{**}	0,9 ^{**}	14,9 ^{NS}	15,1 ^{**}		
Teste F (MC)												
Doses de nitrogênio (N)												
0 kg ha ⁻¹	0,33	0,74	13,0	19,5	0,33	2,2	5,6	1,1	12,5	20,0		
30 kg ha ⁻¹	0,34	0,74	13,8	20,3	0,34	2,9	6,2	1,1	14,3	18,9		
60 kg ha ⁻¹	0,32	0,78	13,4	18,7	0,35	2,5	6,5	1,0	14,5	19,4		
90 kg ha ⁻¹	0,31	0,80	13,9	18,8	0,29	3,3	6,7	1,0	15,5	18,5		
120 kg ha ⁻¹	0,33 ^{**}	0,79 ^{NS}	13,4 ^{NS}	19,0 ^{NS}	0,29 ^{NS}	3,1 ^{**}	7,4 ^{**}	1,0 ^{**}	17,8 ^{**}	21,3 ^{NS}		
Teste F (N)												
Teste F (MC) X (N)												
Profundidades (P)												
0-10 cm	0,34 a	0,77	13,2	18,6	0,31 ab	3,1	6,1 b	1,1	13,9 b	19,1 a		
10-20 cm	0,33 ab	0,77	13,6	19,5	0,33 ab	2,8	6,6 a	1,1	16,9 a	23,6 a		
20-40 cm	0,31 b	0,76	13,3	19,4	0,29 b	2,6	6,6 a	1,0	15,6 ab	19,6 a		
40-60 cm	0,32 ab ^{**}	0,78 ^{NS}	14,0 ^{NS}	19,5 ^{NS}	0,35 a ^{**}	2,7 ^{NS}	6,5 a ^{**}	1,1 ^{NS}	13,4 b ^{**}	16,1 b ^{**}		
Teste F (P)												
Tratamentos (TP) x (TS)												
Teste F (MC) x (P)												
Teste F (N) x (P)												
CV _{TP} (%)	10,0	13,7	11,5	16,4	38,4	31,9	10,0	12,2	31,9	25,7		
CV _{TS} (%)	9,1	14,6	11,6	19,3	22,5	39,6	9,2	9,0	25,3	25,0		

** * e ^{NS} - Significativo a 1% e 5% de probabilidade e não-significativo, respectivamente.

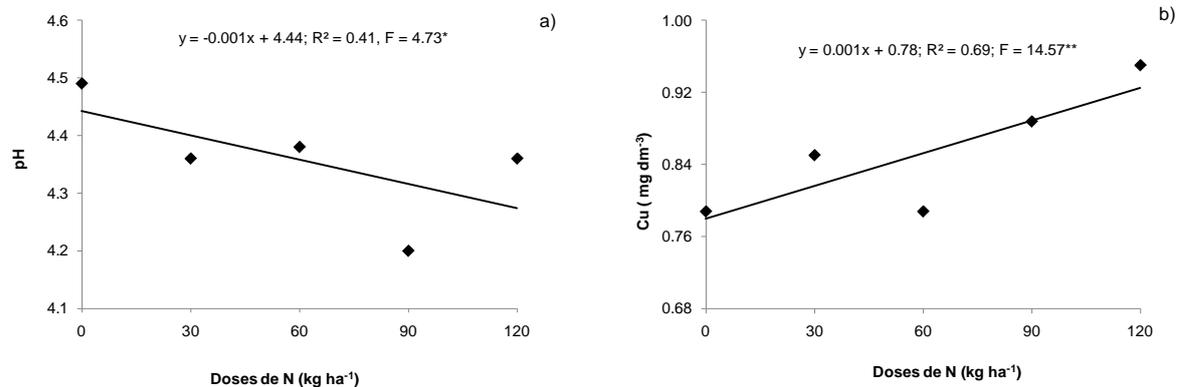


Figura 14. Valor de pH (a) e concentração de Cu (b) no solo (10-20 cm de profundidade) em função das doses de N após seis meses do plantio da cana-de-açúcar. **, * – Significativo a 1 e 5% de probabilidade.

A diminuição do pH com a aplicação de N, possivelmente, deve-se ao processo de nitrificação em que ocorre a conversão do íon amônio para o íon nitrato com liberação de íons de hidrogênio, acidificando o meio (TISDALE et al., 1985). Além disso, durante o processo de decomposição da matéria orgânica do solo, o amônio também é o primeiro composto nitrogenado a ser formado o que, conseqüentemente, promove a acidificação do solo no processo de formação de nitrato (RAIJ, 1991).

É possível que nesta profundidade também tenha ocorrido maior concentração de raízes devido às plantas serem ainda muito jovens, favorecendo a diminuição do valor do pH em função da extrusão de H⁺ pelo sistema radicular das plantas ao absorverem nutrientes da solução do solo em forma de cátions.

VITTI et al. (2002), em experimento com cana-de-açúcar e trabalhando com aplicação de mistura de sulfato de amônio e uréia em vaso, observaram diminuição do pH com a aplicação desses fertilizantes.

O aumento da concentração de Cu no solo em função do aumento das doses de N pode está relacionado à diminuição do pH ocorrida no solo. Muitos trabalhos relacionam o aumento do pH decorrente da calagem com a deficiência de

micronutrientes metálicos por diminuir sua solubilidade na solução do solo, tornando-os menos disponíveis para as plantas (RHOTON, 2000).

Sabe-se que, em condição de pH mais elevado, a concentração de micronutrientes catiônicos na solução do solo é reduzida com a formação de compostos de baixa solubilidade (BARBER, 1995). BRUN et al. (1998) observaram ajuste linear negativo entre o pH e a concentração do Cu extraída com CaCl_2 . As concentrações de Cu aumentaram quando o pH do solo diminuiu devido à dissolução de compostos insolúveis de Cu em $\text{pH} < 5$. CAMARGO et al. (1982) também encontraram correlação negativa entre o pH e a concentração de Cu extraída pelo DTPA em solos do Estado de São Paulo, sugerindo a diminuição da disponibilidade de Cu com o aumento do pH.

Quanto às concentrações de P, ocorreu aumento linear da concentração desse elemento na camada de 0-10 cm de profundidade do solo com adição de calcário e um efeito quadrático negativo com o uso da escória de siderurgia (Figura 15).

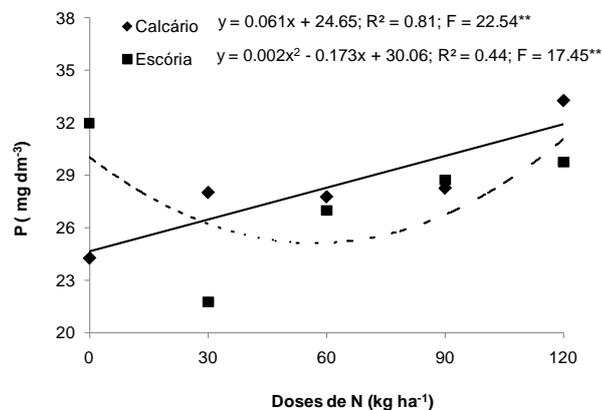


Figura 15. Concentração de P no solo (0-10 cm de profundidade) em função das doses de N após seis meses do plantio da cana-de-açúcar. ** – Significativo a 1% de probabilidade.

Na literatura, tem-se observado aumento da disponibilidade de P no solo com aplicação de escória no solo (PRADO et al., 2002b; PULZ, 2007), alcançando valores até três vezes superior quando comparado ao calcário (FONSECA, 2007). Este

incremento pode ser explicado pela competição do P com o ânion SiO_4^- presente na escória pelos mesmos sítios de adsorção no solo, implicando na liberação de P para a solução do solo.

Para os demais atributos químicos do solo, incluindo os micronutrientes e as formas de N no solo, também se verificou maior eficiência do calcário quando comparado à escória de siderurgia (Tabelas 3 e 4), à exceção da concentração de Si.

Pôde-se notar que, a interação dos tratamentos principais (fatorial: doses de N com aplicação de escória ou de calcário) e os tratamentos secundários (profundidades do solo) foi significativa à $p < 0,01$, ajustando-se as demais variáveis do solo ao modelo de superfície de resposta (Figuras 16, 17, 18 e 19).

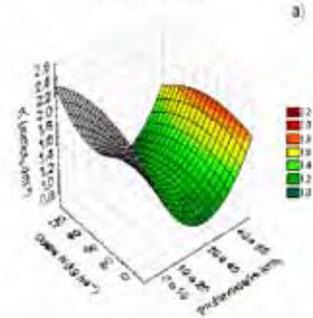
Observou-se que as maiores concentrações de K ($2,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e Mg ($10,6 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foram encontradas nas camadas mais profundas do solo (20-40 e 40-60 cm) com adição de calcário (Figuras 16a, e; Tabela 5), ao passo que com aplicação da escória de siderurgia estes nutrientes permaneceram nas profundidades mais superficiais, 0-10 e 10-20 cm, sendo os maiores teores obtidos de 2,1 e $6,1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de K e Mg, respectivamente (Figuras 16b, f).

Para a concentração de Ca no solo, os maiores valores foram obtidos nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, independentemente do material corretivo utilizado, atingindo valores máximos de 14,7 e $12,6 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o calcário e escória de siderurgia, respectivamente (Figuras 16c, d). Desta mesma forma, constatou-se valores maiores da SB e de V% também nas camadas mais superficiais, sendo estes de 21,6 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e 41% com o uso do calcário e 20,4 $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e 34% com a aplicação da escória. Percebeu-se ainda que não foi possível atingir a saturação por bases ora recomendada para a cultura da cana-de-açúcar (60%) para ambos os corretivos. Pode-se atribuir este fato em função do tempo relativamente curto para reação máxima dos corretivos, como já foi discutido anteriormente.

Calcário

$$K = 2.312 + 0.055x + 0.005y + 0.001x^2 + 2.820E-05xy + 0.496E-04y^2$$

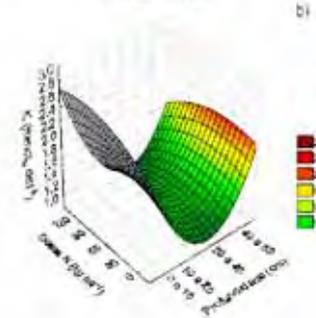
$$F = 15.57^{**}, R^2 = 0.57$$



Escória de siderurgia

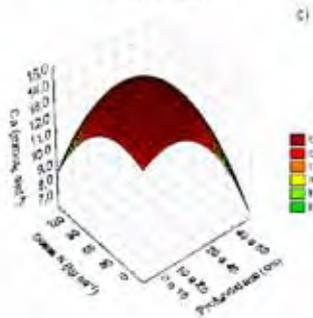
$$K = 2.465 + 0.026x + 0.007y + 0.001x^2 + 6.290E-05xy + 3.555E-04y^2$$

$$F = 22.54^{**}, R^2 = 0.63$$



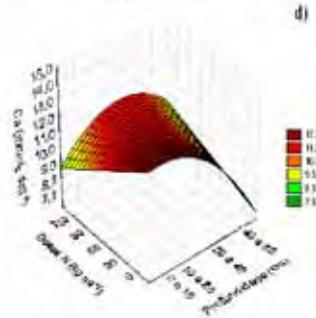
$$Ca = 13.415 + 0.894x + 0.212y + 0.003x^2 + 0.001xy + 0.004y^2$$

$$F = 5.48^{**}, R^2 = 0.19$$



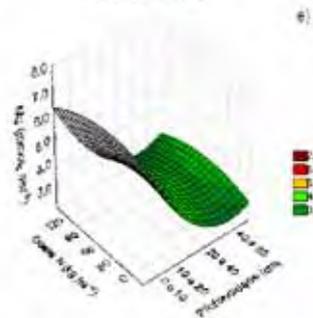
$$Ca = 12.375 + 0.030x + 0.027y + 0.002x^2 + 0.001xy + 1.650E-04y^2$$

$$F = 4.24^{**}, R^2 = 0.22$$



$$Mg = 7.015 + 0.153x + 0.000y + 0.001x^2 + 6.179E-05xy + 7.606E-04y^2$$

$$F = 21.40^{**}, R^2 = 0.59$$



$$Mg = 7.196 + 0.117x + 0.002y + 0.001x^2 + 0.0003xy + 0.280E-04y^2$$

$$F = 22.51^{**}, R^2 = 0.51$$

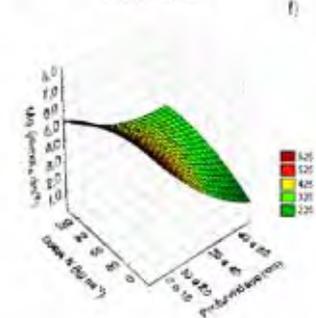


Figura 16. Superfícies de resposta das concentrações de K (a,b), Ca (c,d) e Mg (e,f) no solo em função de doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário e escória de siderurgia após seis meses do plantio. ** – Significativo a 1% de probabilidade.

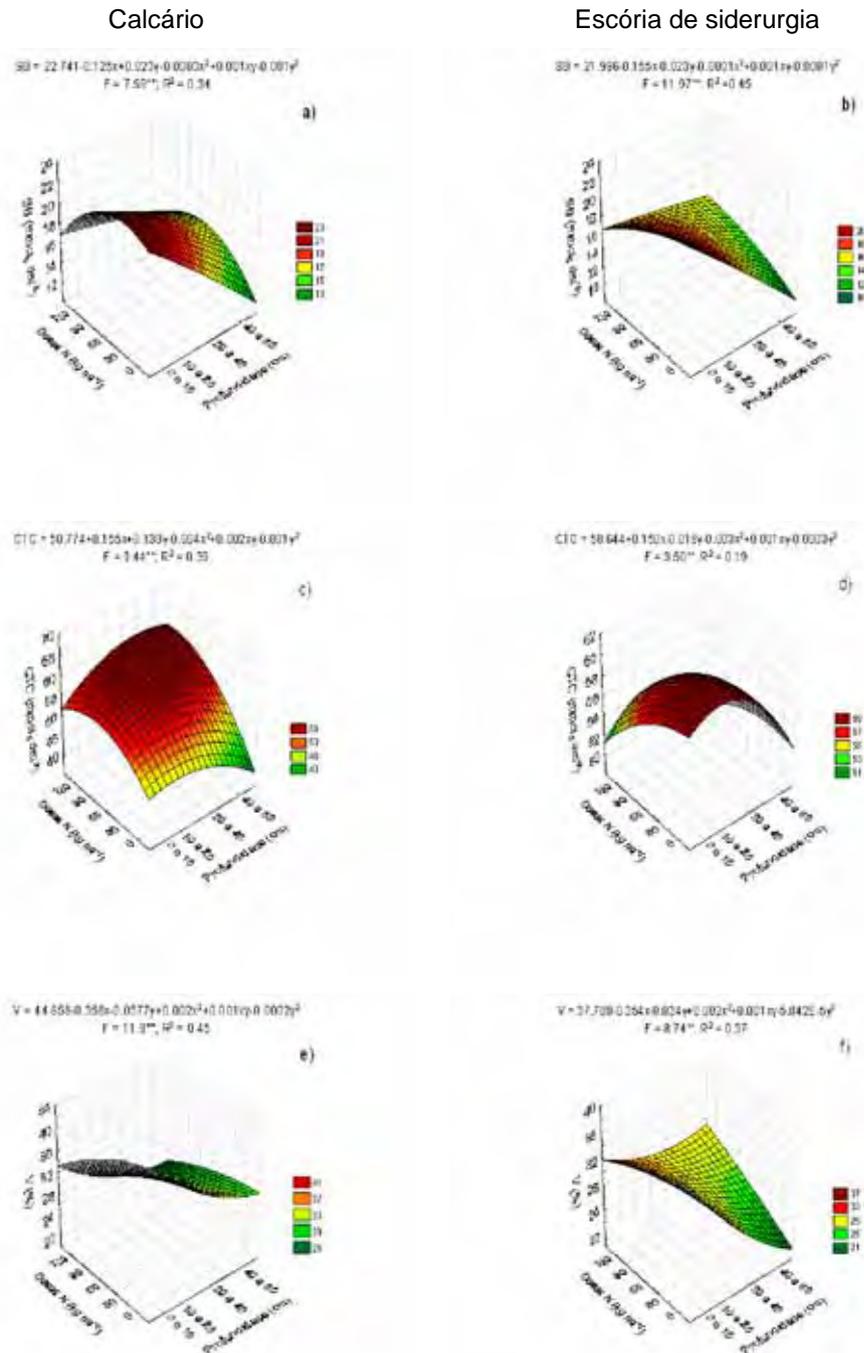


Figura 17. Superfícies de resposta dos atributos químicos SB (a,b), CTC (c,d) e V (e,f) no solo em função de doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário e escória de siderurgia após seis meses do plantio. ** – Significativo a 1% de probabilidade.

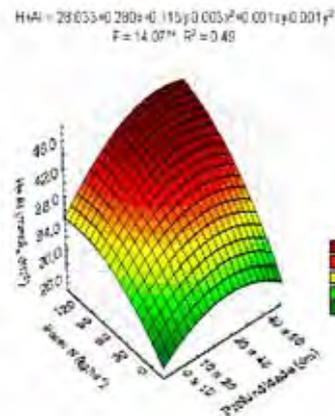


Figura 18. Superfícies de resposta da concentração de H+Al no solo em função de doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário após seis meses do plantio. ** – Significativo a 1% de probabilidade.

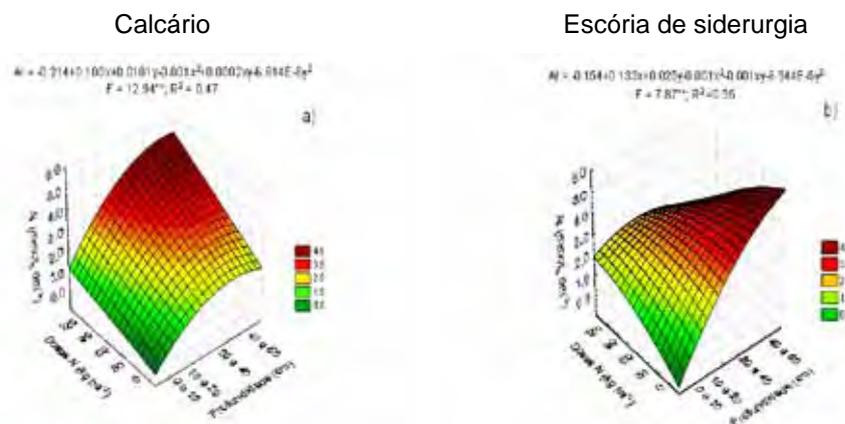


Figura 19. Superfícies de resposta da concentração de Al (a, b) no solo em função das doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário e escória de siderurgia após seis meses do plantio. ** – Significativo a 1% de probabilidade.

Para a CTC, observou-se maiores valores nas camadas de 20-40 e 40-60 cm do solo na presença de calcário e altas doses de N (90 e 120 kg ha⁻¹), sendo valor máximo obtido de 62 mmol_c dm⁻³; contudo, na presença de escória, estes valores foram mais acentuados em baixas doses de N (30 e 60 kg ha⁻¹), alcançando a máxima CTC de 60 mmol_c dm⁻³ (Figuras 17c, d).

Não houve alteração no valor de pH e tampouco deslocamento significativo das bases ao longo do perfil do solo como se esperava, sobretudo, com a aplicação de silicatos que são compostos mais solúveis que os carbonatos contidos no calcário, permitindo que os produtos da reação de dissociação apresentem maior mobilidade no solo (ALCARDE, 1992; QUAGGIO, 2000).

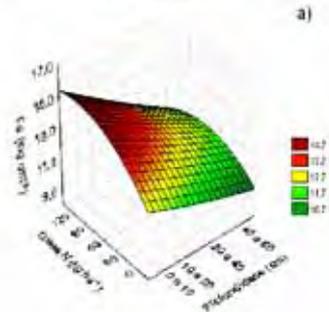
Em relação à acidez potencial (Figura 18), houve maior concentração de H+Al nas camadas mais profundas (20-40 e 40-60 cm) na presença de altas doses de N com o uso de calcário. Fato este também ocorrido com a concentração de Al no solo (Figuras 19a, b). Com o uso da escória de siderurgia, não houve ajuste ao modelo de superfície de resposta para H+Al e, para a concentração de Al não se observou associação às altas doses de N.

Quanto às concentrações de Fe, Mn e Zn (Figuras 20 a, b, c, d, e, f), em geral, ao aumentarem as doses de N, independentemente do material corretivo utilizado, verificou-se maiores concentrações destes nutrientes nas camadas mais superficiais do solo. Pôde-se constatar valores máximos de 14,9; 28,5 e 0,6 mg dm⁻³ para Fe, Mn e Zn, respectivamente, com o uso de calcário e valores de 16,4; 29,2 e 0,6 mg dm⁻³ com a aplicação de escória de siderurgia. Observou-se um pequeno incremento nas concentrações dos micronutrientes com o uso da escória superior ao uso do calcário, mas ainda não sendo conclusivo para caracterizá-la como fonte potencial de micronutrientes.

Calcário

$$\text{Fe} = 12,251 - 0,046x + 0,043y + 0,0023x^2 - 0,0022y^2 - 0,0029xy$$

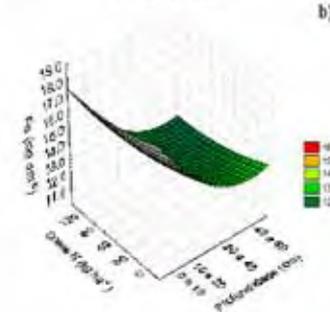
$$F = 6,53^{**}, R^2 = 0,38$$



Escória de siderurgia

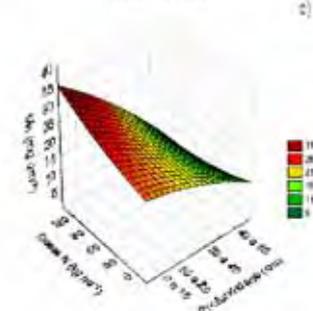
$$\text{Fe} = 17,385 - 0,177x + 0,012y + 0,0027x^2 - 0,4378xy - 6,4488y^2$$

$$F = 7,55^{**}, R^2 = 0,34$$



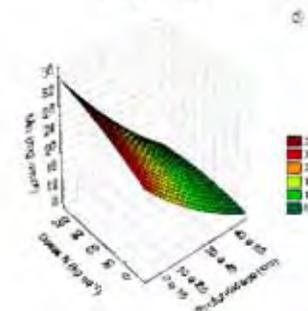
$$\text{Mn} = 23,952 - 0,102x + 0,044y + 0,0027x^2 - 0,0022y^2 - 0,0029xy$$

$$F = 27,07^{**}, R^2 = 0,80$$



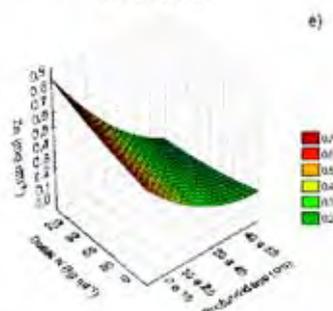
$$\text{Mn} = 27,187 - 0,377x + 0,063y + 0,0018x^2 - 0,0071y^2 - 0,0007xy$$

$$F = 33,14^{**}, R^2 = 0,73$$



$$\text{Zn} = 0,294 - 0,014x + 0,007y + 5,204E-5x^2 - 3,376E-5y^2 + 3,803E-6xy$$

$$F = 48,1^{**}, R^2 = 0,77$$



$$\text{Zn} = 0,644 - 0,073x + 0,007y + 6,993E-5x^2 - 2,122E-5y^2 + 1,637E-6xy$$

$$F = 30,15^{**}, R^2 = 0,67$$

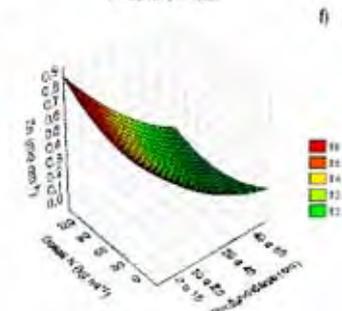


Figura 20. Superfícies de resposta das concentrações de Fe (a,b), Mn (c,d), Zn (e,f) no solo em função de doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário e escória de siderurgia após seis meses do plantio. ** – Significativo a 1% de probabilidade.

O maior incremento da concentração de Si no solo ocorreu quando se utilizou a escória de siderurgia, o que era esperado em função da escória ser constituída basicamente de silicatos de cálcio e de magnésio. Os aumentos foram na ordem de 53; 70; 53 e 77% nas camadas de 0-10; 10-20; 20-40 e 40-60 cm, respectivamente, em relação à concentração de Si inicial, ao passo que, com a aplicação do calcário, este aumento foi de 25; 41; 47 e 70%.

O aumento da concentração de Si “disponível” (ácido-monossilícico) no solo devido à aplicação do calcário, pode ter ocorrido devido ao aumento do pH rizosférico que proporcionou a liberação do Si existente no solo, uma vez que, a forma química do Si disponível depende do pH do solo; ou seja, quanto mais alcalino, maior o grau de ionização do H_4SiO_4 (ILER, 1979).

OLIVEIRA et al. (2007) verificaram que o aumento do pH rizosférico do arroz promoveu maior disponibilidade do Si no solo. Segundo esses autores, as gramíneas apresentam a capacidade de aumentarem o pH da rizosfera quando submetidas a nutrição com o $N-NO_3^-$, devido ao consumo de H^+ com conseqüente formação de OH^- , e decrescerem o pH rizosférico quando supridas com N na forma de NH_4^+ .

À medida que se aumentou a profundidade associada a altas doses de N, independentemente do material corretivo utilizado, a concentração de Si tornou-se maior em 74 e 35% na camada de 40-60 cm em relação à camada mais superficial de 0-10 cm, para o calcário e escória, respectivamente. Valores máximos de 8,7 e 8,1 $mg\ dm^{-3}$ de Si foram observados na camada de 40-60 cm de profundidade do solo para calcário e escória de siderurgia, nesta ordem (Figuras 21a, b).

É possível que esta alta concentração de Si nas camadas mais profundas (40-60 cm) tenha sido em função do pouco desenvolvimento do sistema radicular das plantas nesse período, impossibilitando maior aproveitamento do Si pela cultura. Outra hipótese para o aumento da concentração de Si em profundidade seria a perda deste elemento pelo processo de lixiviação devido ao fenômeno da dessilicatação ocorrido mais intensamente nas camadas superficiais.

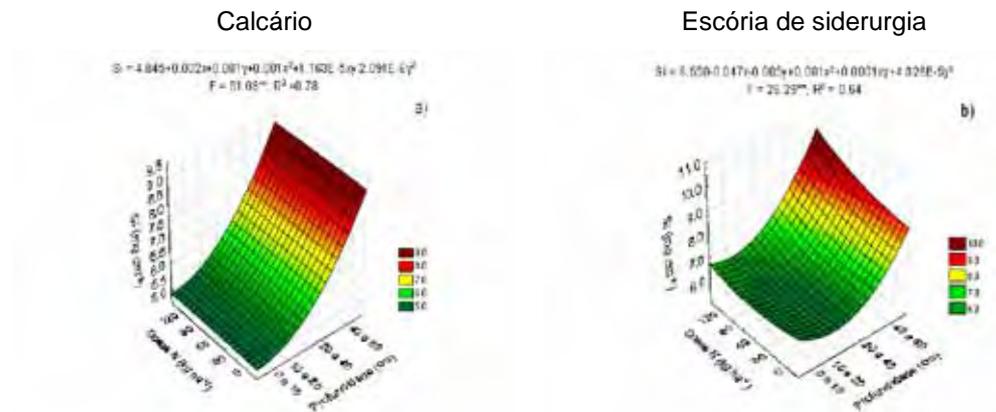


Figura 21. Superfícies de resposta da concentração de Si (a,b) no solo em função de doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário e escória de siderurgia após seis meses do plantio. ** – Significativo a 1% de probabilidade.

Quantos às formas de N no solo (Tabela 4), verificou-se que doses elevadas de N promoveram o incremento na concentração de N-total, amônio e nitrato no solo, independentemente do material corretivo utilizado, bem como efeito significativo das profundidades do solo. Houve um aumento médio de N-total na ordem de 22% em relação ao teor inicial antes da instalação do experimento.

Os maiores valores de N-total e de nitrato foram obtidos nas camadas superficiais, sendo $1,5 \text{ g kg}^{-1}$ de N-total e $32,8 \text{ mg kg}^{-1}$ de NO_3^- na presença de calcário, e $1,4 \text{ g kg}^{-1}$ de N-total e $30,3 \text{ mg kg}^{-1}$ de NO_3^- na presença de escória. Em relação à concentração de amônio, os maiores valores foram observados na camada de 40-60 cm de profundidade, obtendo-se teores de $19,8$ e $21,9 \text{ mg kg}^{-1}$ com adição de calcário e escória de siderurgia, respectivamente (Figuras 22c, d, e, f, g, h), o que discorda de PRIMAVESI et al. (2005) que não observaram diferenças nas concentrações de NH_4^+ no solo em profundidades (0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm), todavia, observaram aumento de $1,5$ para $16,3 \text{ mg dm}^{-3}$ nas concentrações de NO_3^- no solo com a aplicação das doses de N.

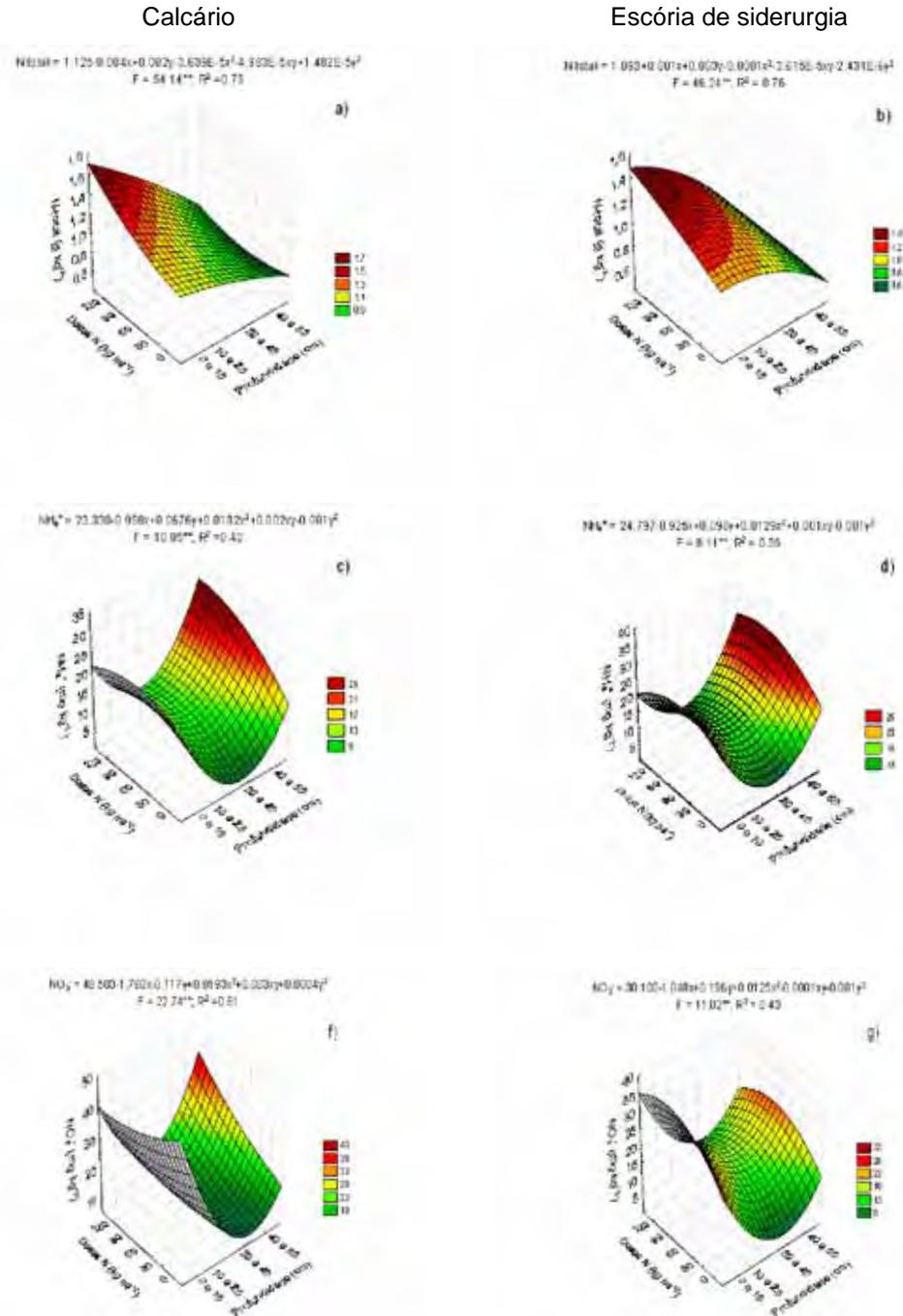


Figura 22. Superfícies de resposta das concentrações de N-total (a,b), NH_4^+ (b, c) e NO_3^- (c, d) no solo em função de doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário e escória de siderurgia após seis meses do plantio. ** – Significativo a 1% de probabilidade.

Segundo MARSCHNER (1995), a diminuição do amônio com o aumento da profundidade no solo pode ocorrer devido ao menor pH encontrado nestas camadas, entretanto, isto não foi verificado no presente trabalho.

Em geral, a concentração de NO_3^- no solo foi maior do que a concentração de NH_4^+ em todas as camadas analisadas. ROSOLEM et al. (2003), avaliando o efeito da aplicação de N no solo coberto com palha, também observaram maior concentração de NO_3^- no solo. Segundo esses autores, com a aplicação de N na ausência da calagem, aumentaram-se as concentrações de N-amoniaco no solo, todavia, com a aplicação de calcário incorporado, exceto nas camadas superficiais, encontrou-se maior concentração de NO_3^- no perfil do solo, onde prevaleceu o efeito da nitrificação.

Observou-se, também, que a maior dose de N aplicada (120 kg ha^{-1}) não foi necessariamente a que proporcionou maiores concentrações de NH_4^+ e NO_3^- no solo, possivelmente, devido a maior perda por volatilização de NH_3 durante o processo de nitrificação.

4.1.3. Atributos químicos do solo após quinze meses do plantio da cana-de-açúcar

Verificou-se uma pequena diferença no valor de pH, Ca e H+Al entre os materiais corretivos analisados, sendo o calcário superior à escória de siderurgia neste período de avaliação (Tabela 5). Houve efeitos das doses de N no valor de pH e na concentração de Ca, SB, CTC e V no solo, entretanto, estatisticamente não houve ajuste aos modelos de regressão polinomial. Já em relação às profundidades do solo, pôde-se notar que tanto os valores de pH como os de Ca, Mg e, conseqüentemente, da SB, CTC e V foram maiores na camada de 0 a 10 cm, enquanto a concentração de P predominou na camada 10 a 20 cm.

As doses de N na presença de calcário promoveram diminuição e aumento linear na concentração de Mg e H+Al no solo, respectivamente, ao passo que, com a aplicação de escória de siderurgia, não houve efeito da adubação nitrogenada para os valores desses atributos (Figuras 23a, b).

Tabela 5. Atributos químicos do solo em função das doses de N e da aplicação de escória de siderurgia e de calcário, em quatro profundidades, aos quinze meses após o plantio da cana-de-açúcar.

Tratamentos	pH	MO g dm ⁻³	Presina mg dm ⁻³	K	Ca	Mg	H+Al	SB	CTC	V	mmolc dm ⁻³		%
											CaCl ₂		
Material corretivo (MC)													
Calcário	4,4	14	31,5	1,5	13,2	4,0	41,0	18,7	59,8	31			
Escória	4,3	14	25,8	1,7	12,0	4,3	43,0	18,0	61,0	29			
Teste F (MC)	**	NS	NS	NS	*	NS	*	NS	*	NS			
Doses de nitrogênio (N)													
0 kg ha ⁻¹	4,4	14	29,7	1,6	12,7	4,5	42,1	18,8	61,0	31			
30 kg ha ⁻¹	4,4	13	28,5	1,5	12,2	4,1	41,6	17,8	59,3	28			
60 kg ha ⁻¹	4,5	14	29,2	1,6	14,8	4,9	39,5	21,4	60,8	35			
90 kg ha ⁻¹	4,3	14	26,7	1,7	11,1	3,4	45,0	16,2	61,2	26			
120 kg ha ⁻¹	4,3	14	28,9	1,6	12,2	3,9	41,8	17,7	59,5	30			
Teste F (N)	**	NS	NS	NS	**	**	**	**	NS	**			
Teste F (MC) X (N)	NS	NS	NS	NS	NS	*	*	NS	NS	NS			
Profundidades (P)													
0-10 cm	4,5 a	14	21,4 bc	2,5	15,2 a	6,2 a	41,1	23,9 a	65,0 a	37 a			
10-20 cm	4,4 b	15	49,1 a	1,4	13,0 b	4,5 b	42,2	19,0 b	61,2 b	31 b			
20-40 cm	4,3 b	13	35,5 b	1,0	11,3 bc	2,7 c	42,5	15,1 c	57,6 c	26 c			
40-60 cm	4,3 b	12	8,9 c	1,5	10,9 c	3,2 c	42,1	15,6 c	57,7 c	27 c			
Teste F (P)	**	NS	**	NS	*	*	NS	**	**	**			
Tratamentos (TP) x (TS)													
Tratamentos (TP) x (TS)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS			
Teste F (MC) x (P)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS			
Teste F (N) x (P)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS			
CV _{TP} (%)	4,0	11,3	75,2	24,7	24,4	27,0	11,3	21,8	6,0	20,8			
CV _{TS} (%)	8,0	57,4	147,1	63,9	48,7	35,1	17,4	42,3	10,3	37,4			

***, * e NS - Significativo a 1% e 5% de probabilidade e não-significativo, respectivamente.

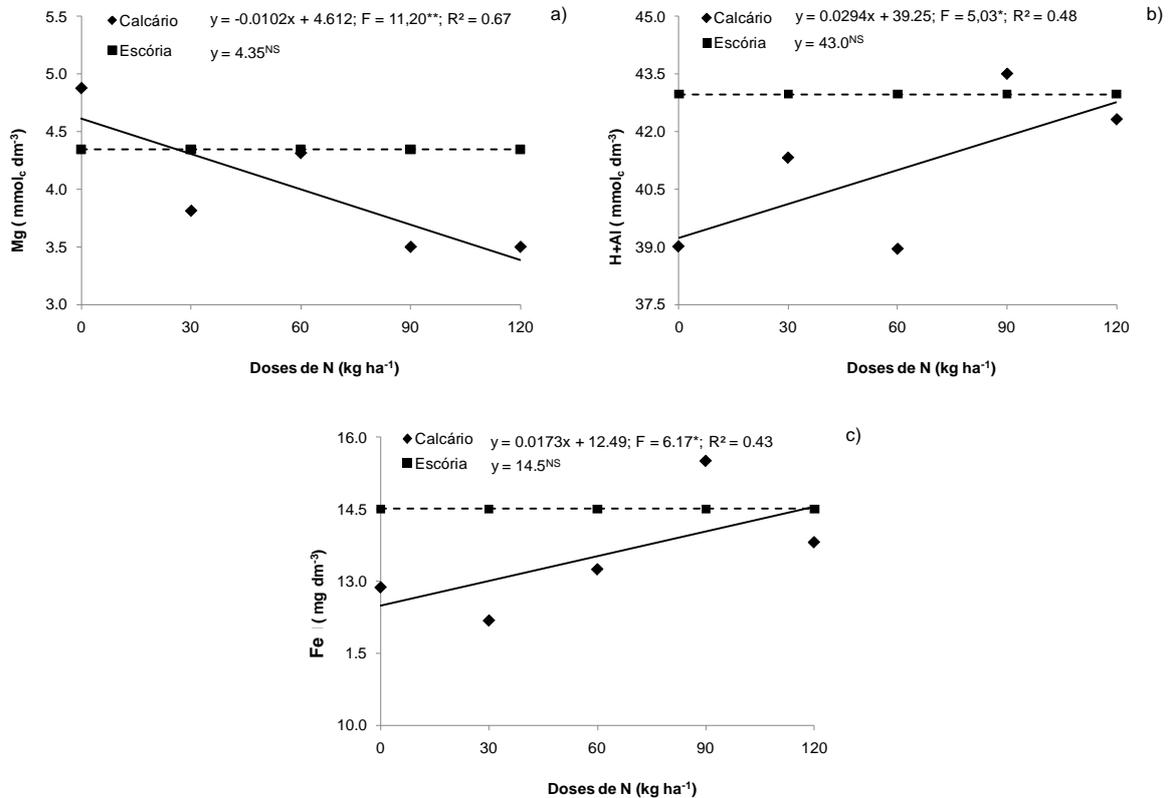


Figura 23. Concentrações de Mg (a), H+Al (b) e Fe (c) no solo em função das doses de N após quinze meses do plantio da cana-de-açúcar. **, *, ^{NS} – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não-significativo, respectivamente.

Para os micronutrientes B e Fe, os maiores valores obtidos foram nos tratamentos com aplicação da escória de siderurgia (Tabela 6). Na presença de calcário e com o aumento das doses de N, observou-se um incremento linear somente na concentração de Fe no solo (Figura 23c).

De modo geral, as maiores concentrações de Cu, Fe, Mn e Zn encontraram-se nas camadas superficiais, ou seja, até os 20 cm de profundidade (Tabela 6). Observou-se também que as concentrações de Si e de N-inorgânico (NH₄⁺ e NO₃⁻) foram maiores nos tratamentos com escória de siderurgia do que com o calcário.

Tabela 6. Micronutrientes, Si e N (total e inorgânico - amônio, nitrato) em função das doses de N e da aplicação de escória de siderurgia e calcário, em quatro profundidades, aos quinze meses após o plantio da cana-de-açúcar.

Tratamentos	mg dm ⁻³										g kg ⁻¹		
	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Si	N-total	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻				
Material corretivo (MC)													
Calcário	0,30	0,74	13,5	27,9	0,26	5,2	0,91	22,96	16,88				
Escória	0,31	0,76	14,5	26,3	0,28	5,7	0,92	24,59	17,64				
Teste F (MC)	**	NS	*	NS	NS	*	NS	**	*				
Doses de nitrogênio (N)													
0 kg ha ⁻¹	0,30	0,74	14,5	25,0	0,27	5,2	0,88	18,23	8,60				
30 kg ha ⁻¹	0,30	0,73	12,8	27,0	0,26	5,4	0,88	18,82	23,21				
60 kg ha ⁻¹	0,30	0,73	13,1	26,5	0,27	5,6	0,95	13,36	16,29				
90 kg ha ⁻¹	0,32	0,80	16,2	25,9	0,28	5,4	0,93	28,02	16,63				
120 kg ha ⁻¹	0,30	0,75	13,5	27,3	0,27	5,7	0,96	40,44	21,59				
Teste F (N)	NS	NS	**	NS	NS	**	**	**	**				
Teste F (MC) X (N)	NS	NS	*	NS	NS	*	NS	*	**				
Profundidades (P)													
0-10 cm	0,36	0,76	15,3	33,8	0,43	5,4	1,14	18,56	19,17				
10-20 cm	0,30	0,83	16,6	37,4	0,38	5,3	1,00	28,70	21,36				
20-40 cm	0,28	0,78	13,6	23,1	0,17	5,6	0,89	25,08	12,89				
40-60 cm	0,29	0,63	10,5	14,1	0,10	5,5	0,64	22,75	15,62				
Teste F (P)	NS	**	**	**	**	NS	**	**	**				
Tratamentos (TP) x (TS)													
Tratamentos (TP) x (TS)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	**				
Teste F (MC) x (P)	NS	NS	NS	NS	NS	*	**	**	NS				
Teste F (N) x (P)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	**	**				
CV _{TP} (%)	9,0	14,4	18,2	29,3	22,7	7,6	5,6	12,0	12,6				
CV _{TS} (%)	47,5	25,9	25,5	31,8	99,4	10,6	6,7	12,5	13,0				

*** * e NS - Significativo a 1% e 5% de probabilidade e não-significativo, respectivamente.

Os valores da concentração de Si ajustaram ao modelo linear de regressão para as camadas 10-20 e 40-60 cm e ao modelo quadrático para a camada de 0-10 cm, sendo a dose de 97 kg ha⁻¹ de N a responsável por maior teor de Si nesta profundidade (5,9 mg dm⁻³) (Figura 24). Avaliando a disponibilidade de Si no solo, mediante a aplicação de escórias de siderurgia, CARVALHO-PUPATTO et al. (2004) e PEREIRA et al. (2007) observaram incrementos na concentração desse elemento no solo. MELO et al. (2003) verificaram aumentos de 5,8 a 27,9 mg dm⁻³ na concentração de Si no solo.

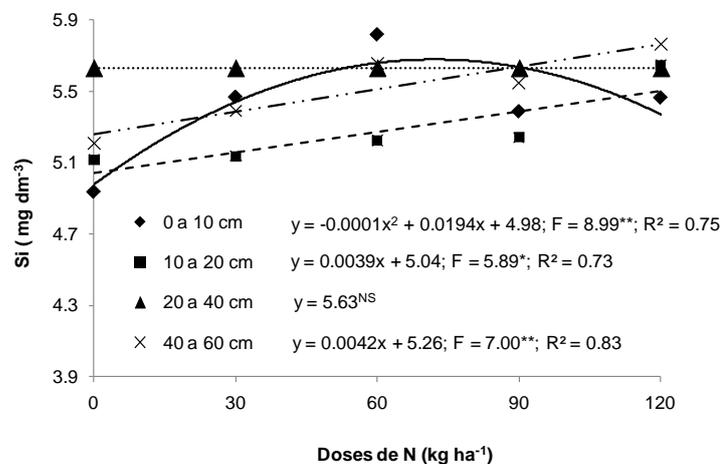


Figura 24. Concentração de Si no solo em função das doses de N após quinze meses do plantio da cana-de-açúcar em diferentes profundidades. **, *, NS – Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não-significativo, respectivamente.

As maiores concentrações de NH₄⁺ de 54,4 e 47,5 mg kg⁻¹, respectivamente, para calcário e escória de siderurgia, foram obtidas nas maiores doses de N aplicadas no solo, independentemente da profundidade do solo analisada. Em relação à concentração de NO₃⁻, observou-se que os maiores valores obtidos (calcário = 21,15 mg kg⁻¹; escória = 23,9 mg kg⁻¹) estiveram relacionados à dose padrão de N (90 kg ha⁻¹) nas camadas mais superficiais do solo (Figuras 26a, b, c, d). Observou-se também que a concentração de N-total no solo foi maior na camada de 0-10 cm e esteve relacionada com o aumento das doses de N (Figura 25).

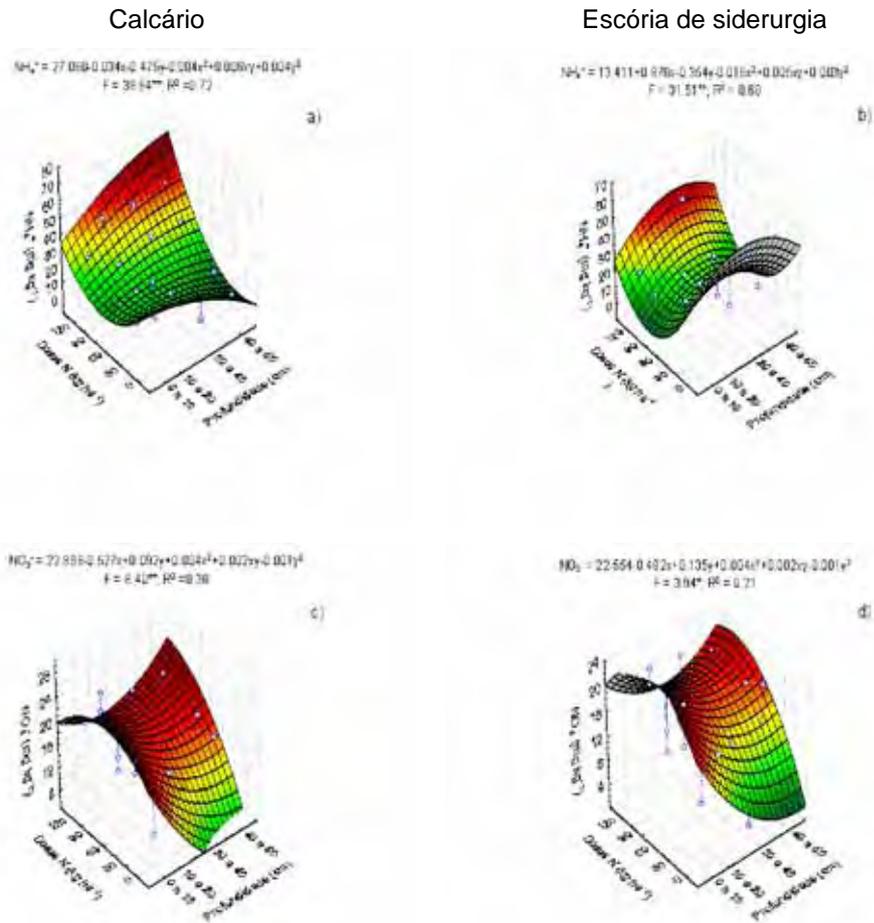


Figura 25. Superfícies de resposta das concentrações de NH_4^+ (a,b) e NO_3^- (c,d) no solo em função de doses de N e das profundidades do solo com aplicação de calcário e escória de siderurgia após quinze meses do plantio. **, * – Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

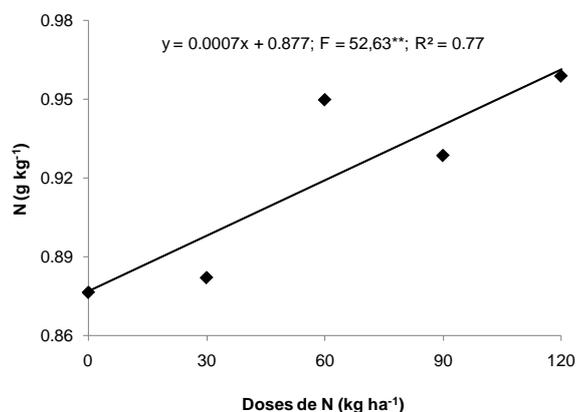


Figura 26. Concentração de N-total no solo em função das doses de N após quinze meses do plantio da cana-de-açúcar. ** – Significativo a 1% de probabilidade.

4.2. Efeitos dos tratamentos na planta

4.2.1. Efeitos no desenvolvimento, na produção de massa seca e na produtividade da cana-planta

Para as variáveis de desenvolvimento da cana-planta aos 133 DAP (Tabela 7), não houve diferença entre os tratamentos com a aplicação de calcário e escória no solo. Isto se deve, provavelmente, à semelhança obtida desses materiais nos atributos químicos do solo nessa mesma época de avaliação (Tabela 2). Contudo, com o aumento das doses de N, constatou-se efeito linear na altura das plantas (Figura 27a).

A função mais importante do N está relacionada à sua participação na constituição de moléculas das proteínas, além de participar da formação de compostos indispensáveis às plantas (MALAVOLTA, 2006). Altas doses de N promovem um crescimento vegetal inicial acelerado, corroborando os resultados obtidos.

VALE (2009), avaliando os efeitos das doses de N na cultura da cana-de-açúcar, também verificou que a aplicação de fertilizantes nitrogenados proporcionou efeitos benéficos na altura das plantas aos quatro meses após a brotação, sendo que a dose de 120 kg ha⁻¹ de N foi a responsável pelo maior crescimento.

Tabela 7. Efeitos dos tratamentos na altura das plantas, no número e no diâmetro do colmo da cana-de-açúcar aos 133, 278 e 447 DAP.

Tratamentos	133 DAP				278 DAP				447 DAP			
	Altura (cm)	Número de colmos	Diâmetro do colmos (mm)	Altura (cm)	Número de colmos	Diâmetro do colmos (mm)	Altura (cm)	Número de colmos	Diâmetro do colmo (mm)	Altura (cm)	Número de colmos	Diâmetro do colmo (mm)
Material corretivo (MC)												
Calcário	52	23	20,44	102	22	25,00	255	17	29,25			
Escória	54	22	20,60	105	24	25,37	254	18	28,18			
Teste F	NS	NS	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS			NS
Doses de nitrogênio (N)												
0 (kg ha ⁻¹)	45	20	20,08	95	21	25,60	253	17	28,05			
30 (kg ha ⁻¹)	50	21	20,14	101	21	24,95	256	17	28,99			
60 (kg ha ⁻¹)	54	21	21,04	108	24	24,63	255	18	28,37			
90 (kg ha ⁻¹)	59	24	20,77	107	24	24,63	257	18	29,34			
120 (kg ha ⁻¹)	58	25	20,58	106	24	26,12	251	19	28,80			
Teste F	**	**	NS	NS	**	NS	NS	NS	NS			NS
----- Teste F -----												
(MC) X (N)	NS	**	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS			NS
CV%	8,7	11,8	5,6	9,2	8,7	7,9	2,9	10,6	7,7			

***, * e NS - Significativo a 1% e 5% de probabilidade e não-significativo, respectivamente.

O incremento das doses de N associadas à escória de siderurgia, promoveu aumento linear no número de colmos ($p < 0,01$) e, com o uso do calcário, efeito quadrático ($p < 0,05$) para esta mesma variável, atingindo ponto máximo na dose de 73 kg ha^{-1} de N (Figura 27b). Esses resultados indicam o efeito benéfico da associação da adubação nitrogenada com o Si no crescimento inicial da cana-planta, uma vez que, como mencionado, a escória e o calcário foram semelhantes na neutralização da acidez do solo, justificando, dessa forma, o efeito positivo do silicato no aumento do número de colmos da cana-planta aos 133 DAP.

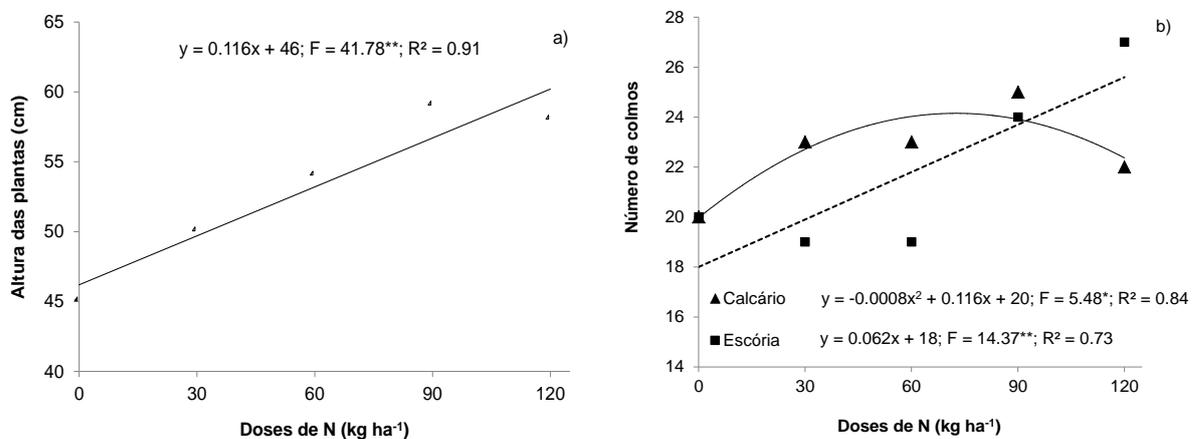


Figura 27. Efeito da adubação nitrogenada na altura das plantas (a) e sua interação com o calcário e a escória no número de colmos (b) da cana-de-açúcar aos 133 DAP. **, * – Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

Aos 278 DAP, observou-se apenas efeito dos tratamentos na variável número de colmos (Tabela 7), ajustando-se ao modelo linear com o aumento das doses de N associadas ao uso do calcário, e um ajuste quadrático com o uso da escória de siderurgia, sendo a dose de 63 kg ha^{-1} de N a que proporcionou maior perfilhamento da planta com adição de Si (Figura 28).

Em relação ao efeito da adubação nitrogenada com (escória) e sem adição de Si (calcário) aos 447 DAP, não foi constatada diferença entre os tratamentos quanto às

variáveis de desenvolvimento (Tabela 7). Entretanto, pôde-se observar um incremento de 151 cm na altura das plantas entre os 278 e 447 DAP, concordando com outros autores que apresentaram resultados semelhantes quanto à altura das plantas nesta mesma época de avaliação (MIOCQUE, 1999; SUGUITANI, 2001; OLIVEIRA et al., 2004).

Para o número médio de colmos obtido aos 278 e 447 DAP, notou-se uma redução de 22%, ou seja, de 23 para 18 colmos, respectivamente. Esta diminuição do número de colmos na cultura da cana-de-açúcar é normal, haja vista que o máximo de perfilhamento ocorre por volta dos 150 a 180 dias, estabilizando próximo ao momento da colheita (IDO, 2003; OLIVIERA et al., 2004).

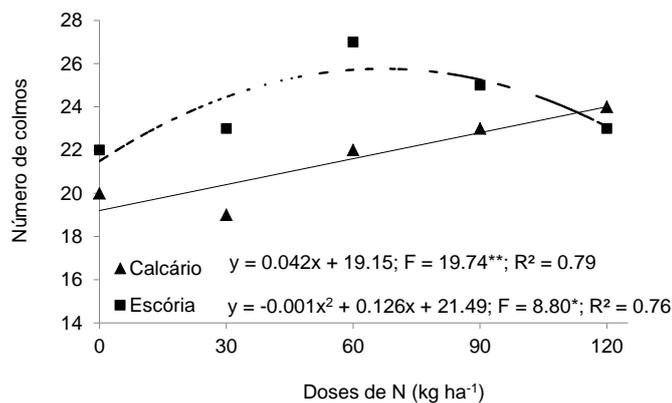


Figura 28. Efeito da adubação nitrogenada e sua interação com o calcário e a escória no número de colmos da cana-de-açúcar aos 278 DAP. **, * – Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente.

Em se tratando do diâmetro médio do colmo no momento da colheita (447 DAP), este foi de 28,7 mm, corroborando os resultados de OLIVEIRA et al. (2004) que obtiveram 28,8 mm de colmo em cultivares de cana-de-açúcar.

A produção de massa seca das folhas apresentou efeito negativo com o aumento das doses de N ($y = 20,20 - 0,048x$; $F = 16,68^{**}$; $R^2 = 0,52$). Já para a produção de fitomassa do palmito, apenas nos tratamentos com calcário constatou-se diferença

entre os tratamentos, apresentando uma pequena redução até a dose 30 kg ha⁻¹ de N com posterior acréscimo a partir da dose de 60 kg ha⁻¹ de N ($y = 1,38 - 0,008x + 0,0001x^2$; $F = 10,46^{**}$; $R^2 = 0,57$). Para a produção de massa seca dos colmos, foi observado ajuste linear crescente ($y = 35,92 + 0,104x$; $F = 20,50^{**}$; $R^2 = 0,84$) em função das doses de N com adição de Si (escória). Todavia, com calcário, a produção de massa seca dos colmos apresentou um decréscimo inicial com posterior aumento a partir da dose de 90 kg ha⁻¹ de N ($y = 43,63 - 0,311x + 0,003x^2$; $F = 18,07^{**}$; $R^2 = 0,94$).

Em relação à produtividade da cana-planta, o efeito das doses de N sem adição de Si não foi significativo, obtendo valor médio de 95,8 t ha⁻¹ nos tratamentos com calcário (Tabela 8, Figura 29), confirmando os resultados apresentados por CANTARELLA & RAIJ (1985), ROSSIELLO (1987) e WIEDENFELD (2000) que não constataram aumento na produtividade da cana-planta em função das doses de N no plantio.

Tabela 8. Produtividade de colmos e produção de massa seca (MS) das partes da cana-planta (variedade RB855156) com e sem adição de Si aos 447 DAP.

Tratamentos	MS Folha	MS Palmito	MS Colmo	Produtividade
Material corretivo (MC)	t ha ⁻¹			
Calcário	10,6	0,9	23,9	95,8
Escória	10,1	0,9	25,3	99,0
Teste F	NS	NS	NS	NS
Doses de nitrogênio (N)				
0 kg ha ⁻¹	11,8	0,8	22,9	103,0
30 kg ha ⁻¹	10,7	1,0	24,2	92,7
60 kg ha ⁻¹	12,5	0,9	23,2	107,8
90 kg ha ⁻¹	8,2	0,7	24,5	94,5
120 kg ha ⁻¹	8,8	1,1	28,2	88,9
Teste F	**	**	**	**
	Teste F			
(MC) X (N)	NS	**	**	**
CV (%)	18,1	15,0	10,6	7,5

** e ^{NS} - Significativo a 1% de probabilidade e não-significativo, respectivamente.

A ausência de resposta da cana-planta à aplicação de N, possivelmente, deve-se a alguns fatores, como a mineralização da matéria orgânica que ocorre durante o preparo do solo, às reservas existentes no tolete de plantio e ao sistema radicular da cana-de-açúcar, o qual, por ser extenso e profundo, favorece a absorção do nutriente (SEGATO et al., 2006). Além disso, a formação de associações da cultura com bactérias fixadoras de N₂ do ar atmosférico pode contribuir com a absorção de N pelas plantas (LIMA et al., 1987; URQUIAGA et al., 1997). Em função disso, tem-se observado que a adubação nitrogenada não vem sendo recomendada no plantio da cana e, quando feita, é recomendada em pequenas doses (30 kg ha⁻¹) (SCHULTZ et al., 2010).

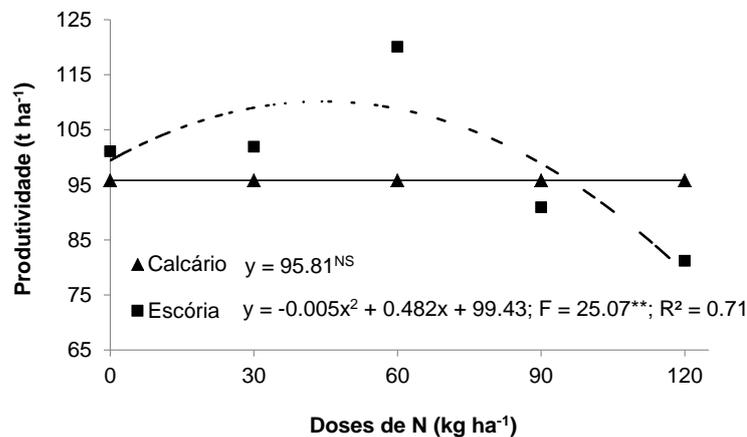


Figura 29. Efeito da adubação nitrogenada na produtividade da cana-de-açúcar aos 447 DAP, associada à aplicação de calcário e escória de siderurgia. **, ^{NS} – Significativo a 1% de probabilidade e não-significativo, respectivamente.

As doses de N associadas à adição de Si no solo na forma de escória promoveram incremento quadrático na produtividade da cana-planta (Figura 29). Porém, a dose de N que proporcionou maior produtividade da cultura (111,0 t ha⁻¹) foi aproximadamente metade da dose recomendada (48,2 kg ha⁻¹). Neste sentido, também se observou baixa resposta à adubação nitrogenada, entretanto, houve incremento de 15,2 t ha⁻¹ (cerca de 15%) na produtividade de colmos com a adição de escória de siderurgia. Na literatura, inexistem trabalhos que relataram interação do N e do Si na

cana-de-açúcar, entretanto, efeitos benéficos dessa interação foram verificados por FONSECA et al. (2009 e 2011) em gramíneas, constatando que o aumento da absorção de Si promoveu incrementos na absorção dos macronutrientes pela *Brachiaria brizantha*, em especial para o N, conseqüentemente, aumentando a produtividade da cultura.

KORNDÖRFER et al. (2002b) verificaram aumentos de 11 a 16% na produção da cana-planta em função da adubação com Si. Isso se deve aos efeitos benéficos desse elemento na cultura da cana-de-açúcar estando relacionado à maior resistência ao acamamento e às alterações na arquitetura da planta, já que, plantas adubadas com Si possuem as folhas mais eretas e, em consequência disso, são mais eficientes quanto à capacidade de absorção da luz solar e de realizar fotossíntese, favorecendo melhor desempenho dos adubos nitrogenados. BITTENCOURT et al. (2003), estudando os efeitos do silicato de cálcio em um Latossolo Vermelho Escuro, também encontraram aumentos na produção de colmos de cana-de-açúcar.

No Haváí, a aplicação de silicatos (escórias de siderurgia) em Latossolos incrementaram a produção de cana-de-açúcar em até 12 t ha⁻¹ (FOX et al., 1967). GURGEL (1979) mostrou que a aplicação de 3 t ha⁻¹ de silicato de cálcio puro no plantio da cana-de-açúcar (CB 41-76) proporcionou aumento de 6,4% e 16% na produtividade de colmos de primeiro e segundo cortes, respectivamente.

4.2.2. Efeitos na nutrição da cana-planta

Os teores médios dos nutrientes obtidos na folha +1 aos 278 DAP da cana-de-açúcar apresentaram-se adequados segundo RAIJ & CANTARELLA (1997), a exceção do N e do S que obtiveram valores inferiores à faixa recomendada (Tabela 9). Em relação ao teor de Si, também se verificou valor abaixo do considerado adequado (15 a 40 g kg⁻¹) por ANDERSON & BOWEN (1990) no Estado da Flórida, nos Estados Unidos.

Tabela 9. Estado nutricional da cana-planta (folha +1) em função dos tratamentos estudados.

Tratamentos	g kg ⁻¹							mg kg ⁻¹					Si g kg ⁻¹
	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn		
Material corretivo (MC)													
Calcário	14,6	1,5	10,8	4,0	1,3	0,6	17,8	7,3	70	41	19	5,6	
Escória	15,0 NS	1,5 NS	10,8 NS	4,0 NS	1,4 NS	0,6 NS	18,5 *	7,6 NS	72 NS	40 NS	21 NS	5,8 *	
Teste F													
Doses de nitrogênio (N)													
0 kg ha ⁻¹	15,3	1,5	10,9	4,2	1,4	0,6	18,3	6,9	69	40	21	5,1	
30 kg ha ⁻¹	15,1	1,5	10,8	3,9	1,4	0,5	18,9	7,4	69	40	20	5,1	
60 kg ha ⁻¹	14,8	1,5	10,9	3,8	1,3	0,6	18,3	7,0	64	37	21	5,7	
90 kg ha ⁻¹	14,7	1,5	10,9	4,2	1,4	0,7	17,6	8,3	80	41	21	6,5	
120 kg ha ⁻¹	14,1 NS	1,4 NS	10,5 NS	3,9 NS	1,4 NS	0,6 NS	17,8 NS	7,5 NS	74 **	44 *	18 NS	6,1 *	
Teste F													
(MC) X (N)	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	*	
CV (%)	5,9	5,6	5,9	10,1	10,8	16,0	5,5	19,7	9,3	10,4	20,0	7,3	
Teores adequados ⁽¹⁾	18,0- 25,0	1,5-3,0	10,0- 16,0	2,0-8,0	1,0-3,0	1,5-3,0	10,0- 30,0	6,0-15,0	40-250	25-250	10-50	15-40 ⁽²⁾	

**, * e NS - Significativo a 1% e 5% de probabilidade, e não-significativo, respectivamente. ⁽¹⁾ RAIJ & CANTARELLA (1997). ⁽²⁾ ANDERSON & BOWEN (1990).

KORNDÖRFER et al. (1998) encontraram teores de Si nas folhas de 7,6; 10,4 e 11,4 g kg⁻¹, respectivamente, para as variedades RB72454, SP79-1011 e SP71-6163, sendo superiores aos valores encontrados no presente trabalho. Esses autores constataram que existe uma relação muito estreita entre os teores foliares e a dose de Si aplicada, além de uma divergência entre os teores desse elemento e as variedades de cana, o que é aceitável, considerando as diferenças entre os genótipos da mesma espécie quanto à aquisição do elemento.

De modo geral, os teores dos nutrientes na folha +1 não diferiram quanto à adição ou não de Si no solo, havendo apenas efeito superior nos teores de B e de Si com a aplicação da escória de siderurgia, o que era esperado, sobretudo no teor de Si, uma vez que a escória é constituída basicamente de silicatos de cálcio e de magnésio.

A adubação nitrogenada com aplicação de calcário não influenciou os teores de N e Fe na cana-planta, ao passo que com o uso da escória houve diminuição no teor de N e aumento linear no teor de Fe (Tabela 9). Ambos os materiais corretivos associados ao N também promoveram incremento linear no teor de Si na cana-de-açúcar. O pequeno aumento no valor de pH no solo obtido com a aplicação dos corretivos (Tabela 2) pode ter colaborado na liberação do Si existente no solo, já que, a forma química do Si disponível depende da variação do pH (ILER, 1979); o que promove maior o grau de ionização do H₄SiO₄, liberando o Si na solução do solo.

Para o acúmulo de nutrientes nas folhas da cana-planta no momento da colheita (447 DAP), a interação material corretivo e doses de N não foi significativa (Tabela 10). Contudo, ao analisar o efeito isolado da adubação nitrogenada, observou-se que houve um decréscimo no acúmulo de N, P, K, Ca, Mg, B, Mn, Zn e Si (Tabelas 11 e 12). Justifica-se este resultado em função do cálculo dos nutrientes acumulados nas folhas está relacionado com a produção de massa seca das mesmas que apresentou este mesmo ajuste matemático com o aumento das doses de N.

Tabela 10. Acúmulo de nutrientes e de silício em diferentes partes da cana-planta em função dos tratamentos estudados.

Treatments	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Si
	kg ha ⁻¹											
Material Corretivo (MC)												
Calcário	53,7	5,7	47,9	24,9	11,8	17,3	148,0	27,7	5305	1651	89,9	85,7
Escória	47,3 ^{NS}	5,4 ^{NS}	41,0 ^{NS}	21,3 [*]	11,7 ^{NS}	16,9 ^{NS}	133,0 ^{NS}	18,9 ^{**}	4752 ^{NS}	1602 ^{NS}	81,3 ^{NS}	89,5 ^{NS}
Teste F												
Doses de nitrogênio (N)												
0 kg ha ⁻¹	54,9	5,5	49,0	29,7	14,2	17,9	169,5	28,1	5449	1997	100,7	106,3
30 kg ha ⁻¹	60,8	7,0	53,8	22,8	11,3	18,8	140,9	23,3	4968	1525	88,9	80,7
60 kg ha ⁻¹	57,7	6,2	47,1	27,1	14,5	19,7	160,4	28,6	5671	1959	91,7	109,8
90 kg ha ⁻¹	40,5	4,9	39,2	17,1	8,7	15,5	109,5	19,6	4309	1284	69,3	71,3
120 kg ha ⁻¹	38,6	4,1	33,1	18,7	10,0	13,3	122,1	16,8 ^{NS}	4747 ^{NS}	1369 ^{**}	77,3 [*]	69,8 ^{**}
Teste F	**	*	**	**	**	*	**	NS	NS	**	*	**
(MC) X (N)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
CV (%)	24,2	29,3	25,2	21,8	24,8	23,9	23,4	39,6	22,6	19,0	21,9	19,1
Palmito												
Material Corretivo (MC)												
Calcário	6,6	1,4	27,5	1,5	1,7	2,3	9,1	5,3	227	192	28,6	6,7
Escória	6,5 ^{NS}	1,4 ^{NS}	27,8 ^{NS}	1,3 ^{NS}	1,7 ^{NS}	2,3 ^{NS}	8,0 [*]	4,9 ^{NS}	214 ^{NS}	194 ^{NS}	25,8 [*]	7,0 ^{NS}
Teste F												
Doses de nitrogênio (N)												
0 kg ha ⁻¹	6,9	1,4	29,8	1,6	1,9	2,1	7,9	5,2	227	195	29,3	6,7
30 kg ha ⁻¹	6,4	1,4	26,7	1,2	1,6	2,6	8,3	4,7	159	181	25,6	6,5
60 kg ha ⁻¹	6,2	1,4	26,9	1,1	1,5	2,3	8,4	5,2	197	187	28,4	6,9
90 kg ha ⁻¹	5,3	1,1	22,9	1,1	1,3	1,7	8,1	4,3	197	156	22,2	5,7
120 kg ha ⁻¹	7,8	1,6	32,1	2,0	2,2	3,0	10,1	6,2	324	245	30,5	8,6
Teste F	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
(MC) X (N)	**	**	**	**	**	**	**	*	**	**	**	**
CV (%)	14,7	14,3	13,7	22,2	18,0	20,4	16,3	16,5	29,7	16,6	15,4	17,7
Colmo												
Material Corretivo (MC)												
Calcário	73,1	10,7	118,3	22,4	20,4	23,0	137,6	94,2	3720	1234	227,5	87,2
Escória	81,6 [*]	12,5 [*]	104,4 ^{NS}	15,0 ^{**}	21,3 ^{NS}	21,2 ^{NS}	152,7 [*]	81,9 [*]	3914 ^{NS}	1341 ^{NS}	206,0 ^{NS}	105,5 ^{**}
Teste F												
Doses de nitrogênio (N)												
0 kg ha ⁻¹	63,8	12,3	135,4	15,2	20,0	18,8	121,7	78,0	3164	1116	199,4	90,5
30 kg ha ⁻¹	71,3	10,8	98,9	14,1	20,2	24,9	138,2	84,2	3736	1305	189,0	88,1
60 kg ha ⁻¹	70,6	9,8	82,6	12,5	18,1	19,3	128,7	84,7	2986	1200	176,2	81,3
90 kg ha ⁻¹	88,9	13,5	134,1	33,2	21,5	24,4	181,6	89,3	4941	1389	279,7	105,0
120 kg ha ⁻¹	92,0	11,6	105,9	18,7	24,4	23,0	155,7	104,0 ^{NS}	4257 ^{**}	1428 [*]	239,4 ^{**}	116,7 ^{**}
Teste F	**	*	**	**	*	**	**	NS	**	*	**	**
(MC) X (N)	**	**	**	**	NS	**	**	**	**	NS	**	*
CV (%)	15,5	20,2	19,5	29,2	17,1	15,4	15,6	19,6	23,2	16,8	16,8	16,8

** , * e NS - Significativo a 1% e 5% de probabilidade, e não-significativo, respectivamente.

Tabela 11. Estudos de regressão polinomial sobre o efeito de doses de N no acúmulo de nutrientes nas folhas e no colmo da cana-planta (variedade RB855156).

Variável (y)	Adubação Nitrogenada		
	Equação	Teste F	R ²
<i>Folhas</i>			
Acúmulo N	$y = 61,15 - 0,176x$	14,91**	0,67
Acúmulo P	$y = 5,80 + 0,032x - 0,0004x^2$	5,62*	0,84
Acúmulo K	$y = 53,83 - 0,155x$	13,85**	0,80
Acúmulo Ca	$y = 28,69 - 0,093x$	24,49**	0,67
Acúmulo Mg	$y = 13,93 - 0,037x$	11,36**	0,47
Acúmulo S	$y = 17,93 + 0,068x - 0,001x^2$	4,55*	0,91
Acúmulo B	$y = 165,76 - 0,421x$	11,76**	0,63
Acúmulo Mn	$y = 1926,68 - 4,992x$	18,68**	0,51
Acúmulo Zn	$y = 98,88 - 0,221x$	9,98**	0,72
Acúmulo Si	$y = 104,10 - 0,275x$	19,30**	0,46
<i>Colmo</i>			
Acúmulo Mg	$y = 18,81 + 0,034x$	6,55*	0,47
Acúmulo Mn	$y = 1146,25 + 2,361x$	8,58**	0,74

** , * - Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

Tabela 12. Estudos de regressão polinomial sobre o efeito das doses de N associadas à aplicação de calcário e de escória de siderurgia no acúmulo de nutrientes no palmito e no colmo da cana-planta (variedade RB855156).

Variável (y)	Calcário			Escória		
	Equação	Teste F	R ²	Equação	Teste F	R ²
<i>Palmito</i>						
Acúmulo N	$y = 6,94 - 0,059x + 0,001x^2$	16,89**	0,76	$y = 6,5$	NS	-
Acúmulo P	$y = 1,39 - 0,010x + 0,0001x^2$	13,47**	0,68	$y = 1,4$	NS	-
Acúmulo K	$y = 28,55 - 0,158x + 0,002x^2$	7,84**	0,46	$y = 32,29 - 0,227x + 0,002x^2$	8,68**	0,42
Acúmulo Ca	$y = 1,65 - 0,031x + 0,0003x^2$	46,86**	0,97	$y = 1,64 - 0,015x + 0,0001x^2$	4,95*	0,69
Acúmulo Mg	$y = 1,80 - 0,022x + 0,0002x^2$	25,88**	0,86	$y = 2,14 - 0,022x + 0,0002x^2$	11,48**	0,74
Acúmulo S	$y = 2,17 - 0,014x + 0,002x^2$	6,34*	0,43	$y = 2,4$	NS	-
Acúmulo B	$y = 8,60 - 0,073x + 0,001x^2$	19,32**	0,84	$y = 7,63 + 0,047x - 0,001x^2$	4,81*	0,31
Acúmulo Cu	$y = 5,13 - 0,021x + 0,0002x^2$	4,50*	0,55	$y = 4,9$	NS	-
Acúmulo Fe	$y = 267,76 - 2,947x + 0,025x^2$	6,75*	0,46	$y = 180,80 - 2,183x + 0,030x^2$	9,77**	0,86
Acúmulo Mn	$y = 189,29 - 1,974x + 0,022x^2$	22,37**	0,78	$y = 193,7$	NS	-
Acúmulo Zn	$y = 28,51 - 0,186x + 0,002x^2$	11,27**	0,60	$y = 30,04 - 0,071x$	10,25**	0,51
Acúmulo Si	$y = 6,06 - 0,041x + 0,001x^2$	10,17**	0,79	$y = 7,0$	NS	-
<i>Colmo</i>						
Acúmulo N	$y = 76,22 - 0,494x + 0,005x^2$	7,70**	0,88	$y = 57,90 + 0,397x$	39,52**	0,87
Acúmulo P	$y = 14,19 - 0,154x + 0,001x^2$	9,38**	0,91	$y = 10,49 + 0,035x$	7,84**	0,40
Acúmulo K	$y = 172,48 - 2,401x + 0,017x^2$	26,81**	0,74	$y = 90,36 + 0,238x$	4,32*	0,18
Acúmulo Ca	$y = 11,28 + 0,400x - 0,002x^2$	8,58**	0,20	$y = 14,57 - 0,144x + 0,002x^2$	4,32*	0,65
Acúmulo S	$y = 26,85 - 0,164x + 0,001x^2$	4,76*	0,48	$y = 12,94 + 0,299x - 0,002x^2$	12,43**	0,78
Acúmulo B	$y = 137,6$	NS	-	$y = 95,18 + 1,666x - 0,008x^2$	5,41*	0,72
Acúmulo Cu	$y = 94,2$	NS	-	$y = 55,96 + 0,432x$	22,46**	0,51
Acúmulo Fe	$y = 3720,7$	NS	-	$y = 2482,51 + 23,865x$	26,20**	0,73
Acúmulo Zn	$y = 250,22 - 1,744x + 0,015x^2$	7,85**	0,27	$y = 142,37 + 1,061x$	30,49**	0,81
Acúmulo Si	$y = 99,64 - 0,913x + 0,008x^2$	10,67**	0,96	$y = 79,36 + 0,435x$	26,10**	0,89

** , * e NS - Significativo a 1% e 5% de probabilidade, e não-significativo, respectivamente.

A interação materiais corretivos e doses de N foi significativa para todos os nutrientes e para o Si acumulados no palmito (Tabela 10). Com adição da escória, o acúmulo de K, Ca, Mg e Fe apresentou uma pequena diminuição até a dose 30 kg ha⁻¹ de N com posterior acréscimo a partir da dose de 60 kg ha⁻¹ de N. Por outro lado, o acúmulo de B apresentou maior valor na dose de 37 kg ha⁻¹ de N (efeito quadrático) e o acúmulo de Zn diminuiu linearmente com as doses de N (Tabela 12).

No colmo, houve efeito linear nos acúmulos de Mg e Mn com o aumento das doses de N (Tabelas 11). Verificou-se incremento com ajuste ao modelo de regressão quadrático no acúmulo de Ca, S e B com adição de escória, sendo as doses de 36,0; 74,8 e 104,1 kg ha⁻¹ de N as que promoveram maiores acúmulos desses elementos (Ca = 12,0; S = 24,1 e B = 181,9 kg ha⁻¹), respectivamente (Tabela 12) e aumento linear no acúmulo de N, P, K, Cu, Fe, Zn e de Si. Com a aplicação de calcário no solo, houve decréscimo inicial com posterior aumento a partir da dose de 90 kg ha⁻¹ de N no acúmulo dos nutrientes, a exceção do Ca que obteve seu maior acúmulo na dose 100 kg ha⁻¹ de N (modelo quadrático) e do B, Cu e Fe que não apresentaram efeito significativo (Tabela 12).

Em relação à repartição dos nutrientes e de Si acumulados nas partes vegetais da cana, observou-se que, para os macronutrientes, os maiores acúmulos foram encontrados no colmo (Figuras 30a, b, c, e, f), a exceção do Ca que se concentrou em maiores quantidades nas folhas (Figura 30d). O B, Fe, Mn e Si também se acumularam em maiores quantidades nas folhas, entretanto a partir da dose de 60 kg ha⁻¹ de N, esses elementos estiveram em maiores proporções no colmo, independentemente da adição ou não de escória (Figura 31a, c, d, f). Já para o Cu e Zn, os maiores acúmulos foram verificados no colmo das plantas (Figuras 31b, e).

De modo geral, observou-se a seguinte ordem nos acúmulos de N, P, K, Mg, S, Cu e Zn: colmo>folha>palmito. No caso do Ca, B, Fe, Mn e Si, a ordem acumulada nos tecidos vegetais foi: folha>colmo>palmito.

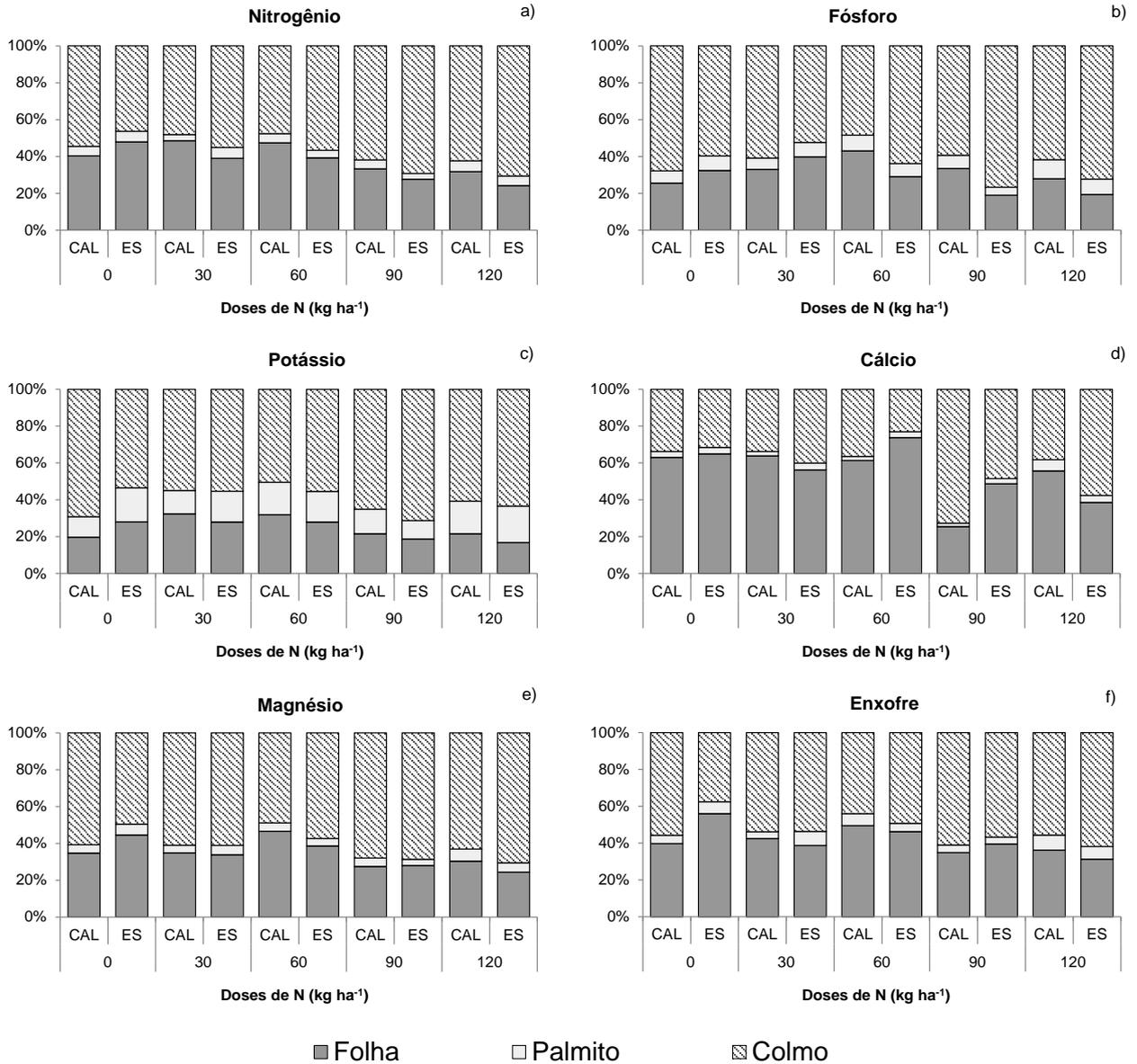


Figura 29. Repartição dos macronutrientes N (a), P (b), K (c), Ca (d), Mg (e) e S (f) na cana-planta em função das doses de N associadas à aplicação de calcário (CAL) e de escória de siderurgia (ES).

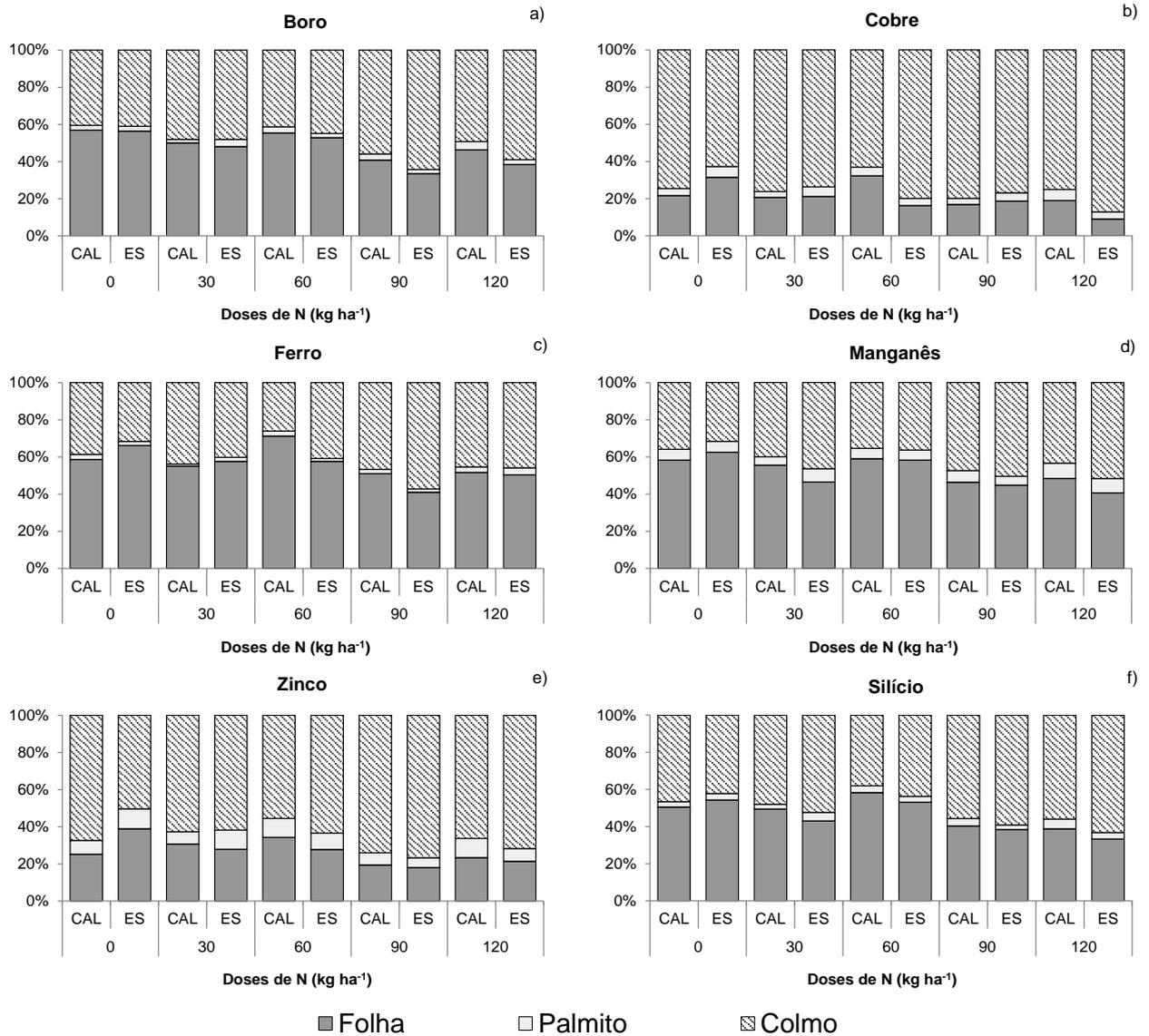


Figura 30. Repartição dos micronutrientes B (a), Cu (b), Fe (c), Mn (d), Zn (e) e de Si (f) na cana-planta em função das doses de N associadas à aplicação de calcário (CAL) e de escória de siderurgia (ES).

A extração de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn e Si pela parte aérea (folhas + palmito + colmo) da cana-planta foi, respectivamente, de: 133,4; 17,8; 193,7; 48,8; 33,9; 42,6; 0,29; 0,13; 9,2; 3,1; 0,3 e 179,6 kg ha⁻¹ para os tratamentos com calcário, e, 135,4; 19,3; 173,2; 37,6; 34,7; 40,4; 0,3; 0,1; 8,9; 3,1; 0,3 e 202,0 kg ha⁻¹ para os

tratamentos com adição de Si na forma de escória. Portanto, a ordem de extração dos nutrientes e de Si pela cana-planta foi: K>Si>N>Ca>S>Mg>P>Fe>Mn>Zn>B>Cu e Si>K>N>S>Ca>Mg>P>Fe>Mn>Zn>B>Cu nos tratamentos com calcário e escória de siderurgia, respectivamente.

Pôde-se notar que a extração total da parte aérea excedeu ao que foi adicionado ao solo via fertilizantes em 44,6 e 63,8 kg ha⁻¹ de N e K, respectivamente, evidenciando uma significativa contribuição de outras fontes que não os fertilizantes químicos.

Estudo realizado por OLIVEIRA et al. (2010) constatou que a extração de nutrientes pela parte aérea da cana-planta foi superior à obtida neste trabalho, apresentando, em média, valores de 179, 25, 325, 226 e 87 kg ha⁻¹ de N, P, K, Ca e Mg, respectivamente, o que proporcionou a seguinte ordem de extração: K>Ca>N>Mg>P. Por outro lado, TASSO JUNIOR et al. (2007), trabalhando com a variedade RB855156, e COLETI et al. (2006), com as variedades RB835486 e SP81-3250, encontraram que as ordens de extração para cana-planta foi K>N>S>Mg>Ca>P e K>N>S>P>Mg>Ca, nessa ordem, demonstrando maior similaridade com este estudo.

Verificou-se uma exportação (colmos) do solo de N, P e K (nutrientes citados pelas recomendações de adubação) e de Si de: 77,4; 11,6; 111,4 e 96,4 kg ha⁻¹, respectivamente. Dessa forma, em função da extração média de N, P, K e Si observada neste experimento, teoricamente por diferença (extração menos exportação), o solo teria sido enriquecido com 57,2; 6,9; 72,2 e 94,4 kg ha⁻¹ nesta ordem. Entretanto, os nutrientes das folhas e do palmito que permaneceram no solo como resíduo vegetal não devem ser computados porque as formas em que se esses elementos se encontram nos tecidos, sobretudo para o N, não estão prontamente disponíveis para absorção das plantas, sendo apenas liberados em função da degradação deste resíduo a médio e longo prazo. A exceção se faz ao K que apresenta 85% do seu teor presente na palhada liberados durante um ano agrícola (OLIVEIRA et al., 1999). E, isso se deve ao fato desse elemento não ser constituinte de nenhum composto existente na planta, e estar presente na forma iônica (MALAVOLTA et al., 1989), o que facilita a sua saída da célula após o rompimento da membrana plasmática.

Para o Si, a fertilização silicatada na forma da escória de siderurgia em função da correção da acidez do solo também não foi suficiente para atender as exigências nutricionais da cultura. Isto pode estar relacionado ao baixo teor de Si solúvel disponível na escória de siderurgia (cerca de 6%). Observou-se que a cana-planta extraiu cerca de 22% a mais desse elemento do que foi aplicado.

Trabalhos de pesquisa demonstraram a viabilidade do uso de escória (silicatos) como fonte de Si para cana-de-açúcar, entretanto, para se observar os efeitos desejados do Si sobre a produção, as quantidades de Si requeridas foram bastante elevadas, entre 3 e 5 t ha⁻¹ (ROSS et al., 1974), diferentemente da quantidade empregada neste trabalho (157 kg ha⁻¹).

É interessante observar que, embora o Si não seja essencial aos vegetais, o mesmo foi absorvido em quantidade expressiva e, mesmo considerando que aproximadamente 50% do Si permanece no solo na forma de palhada, torna-se fundamental a adubação silicatada nesta cultura, uma vez que cultivos sucessivos podem promover a redução considerável do nível desse elemento no solo (KORNDÖRFER et al., 2002b) e, conseqüentemente, a produtividade dos próximos ciclos da cultura da cana-de-açúcar.

Ainda, analisando a eficiência nutricional obtida neste estudo, observou-se que, para produção de 1 t de colmo industrializável com adição de Si na forma de escória, foram necessários 14; 7; 29; 50; 13; 22; 16; 39; 21; 14; 28 e 3% de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn, Zn e Si, respectivamente, a menos do que para a produção de 1 t de colmos sem adição de Si (calcário). Isso pode evidenciar melhor eficiência nutricional da planta em converter os nutrientes absorvidos em biomassa na forma de colmos, o que poderia ter sido ainda maior, caso fosse aplicado maior quantidade de Si no solo.

4.2.4. Efeitos na qualidade tecnológica da cana-planta

Pelos resultados obtidos (Tabela 13), a qualidade tecnológica da cana-planta apresentou as seguintes características: Brix (17,53 a 18,52%), Pol (14,91 a 15, 67%), Fibra (11,52 a 13,11%), Pureza (83,61 a 87,87%), AR caldo (0,80 a 1,15%) PC (Pol do

Caldo) (12,65 a 13,12%), ATR (açúcar teórico recuperável) (126,49 a 130,19 kg ha⁻¹). Esses valores encontraram-se adequados quanto aos padrões aceitos para caracterizar uma cana madura (STUPIELLO, 1987).

Tabela 13. Variáveis tecnológicas da cana-planta (variedade RB855156) em função das doses de N associada à aplicação de calcário e escória de siderurgia.

Tratamentos	AR	Brix	Pol	Fibra	Pureza	PC	ATR
Material Corretivo (MC)	%						kg ha ⁻¹
Calcário	1,00	18,10	15,43	12,12	85,28	13,04	129,69
Escória	1,08	17,95	15,17	12,14	84,54	12,82	127,75
Teste F	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Doses de Nitrogênio (N)							
0 (kg ha ⁻¹)	1,15	17,88	14,98	11,52	83,81	12,79	127,78
30 (kg ha ⁻¹)	1,15	17,83	14,91	11,88	83,61	12,65	126,49
60 (kg ha ⁻¹)	0,80	17,53	15,39	11,64	87,87	13,12	129,78
90 (kg ha ⁻¹)	1,02	18,39	15,67	13,11	85,24	13,01	129,36
120 (kg ha ⁻¹)	1,11	18,52	15,56	12,49	84,03	13,06	130,19
Teste F	*	**	**	**	*	NS	NS
	Teste F						
(MC) X (N)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
CV%	25,7	2,5	2,9	3,8	3,0	2,9	2,4

**, * e ^{NS} - Significativo a 1% e 5% de probabilidade, e não-significativo, respectivamente.

Observou-se que não houve efeito da adição de escória na qualidade tecnológica dos colmos de cana-planta, bem com as doses de N não foi significativa. Pôde-se verificar que o principal reflexo da nutrição com Si na cana-planta foi o incremento na produtividade de colmos alcançada, porém, não havendo efeitos nos teores de sacarose, o que corrobora os relatos de KIDDER & GASCHO (1977) e, por outro lado, discordam de ANDERSON et al. (1987) que obtiveram, além de um aumento de 39% na produtividade de colmos de cana-de-açúcar, um incremento de 50% na produção de açúcar com a aplicação de 20 t ha⁻¹ de escórias no plantio.

Em relação às doses de N aplicadas, observou-se que não houve efeito na pureza do caldo (PC) e no açúcar teórico recuperável (ATR) na cana-de-açúcar (Tabela

13). A ausência de efeitos significativos no rendimento de açúcar, deve-se ao fato de que, em geral, os tratamentos não afetaram o rendimento de colmos, principalmente, nos tratamentos que não receberam a adição de Si (calcário) (Figura 31).

Conforme PRADO (2001), a relação do rendimento de colmos na cana-planta e a variável ATR da área apresentou efeito linear com o uso de escória, enquanto para o calcário não atingiu esta significância. O autor verificou que cada tonelada de colmos de cana-de-açúcar obtida com aplicação de escória de siderurgia esteve associado à produção de 122 kg ha⁻¹ de açúcar.

Para o teor de sacarose (Pol % cana) e fibra obtidos, observou-se incremento linear com o aumento das doses de N (Tabela 14). Já a porcentagem de açúcares redutores (AR), Brix e Pureza, apresentaram ajuste quadrático com as doses de N, atingindo valores máximos de 0,99; 18,0 e 86,3% nas doses de 45, 40 e 66 kg ha⁻¹ de N, respectivamente.

Os resultados deste trabalho discordam dos obtidos por COSTA et al. (2003) que verificaram que a adubação nitrogenada (100 kg ha⁻¹) não afetou as variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar, e dos de RODELLA et al. (1984) que verificaram redução do teor de sacarose com a adubação nitrogenada. Entretanto, o efeito quadrático das doses de N constatado na quantidade de AR na cana-planta deste experimento confirma o efeito deletério de altas doses de N, favorecendo redução de açúcares redutores, obtido por HART (1970).

Tabela 14. Estudos de regressão polinomial sobre o efeito de doses de N nas variáveis de qualidade tecnológica da cana-planta (variedade RB855156).

Variável (y)	Adubação Nitrogenada		
	Equação	Teste F	R ²
AR	$y = 1,20 - 0,009x + 0,0001x^2$	5,66*	0,49
Brix	$y = 17,88 - 0,008x + 0,0001x^2$	6,24*	0,74
Pol	$y = 14,92 + 0,006x$	14,82**	0,79
Fibra	$y = 11,50 + 0,011x$	38,49**	0,57
Pureza	$y = 83,23 + 0,092x - 0,0007x^2$	6,98*	0,49

** , * - Significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente.

V. CONCLUSÕES

Nas condições que a presente pesquisa foi desenvolvida, pôde-se concluir que:

1. Os atributos químicos do solo não diferem com a aplicação de calcário ou de escória de siderurgia após 99 dias da aplicação. Não há maior mobilidade das bases no perfil do solo com uso de silicatos quando comparado ao calcário.
2. As variáveis de desenvolvimento da planta (altura, número e diâmetro do colmo) não diferem com a adubação nitrogenada com ou sem adição de Si na forma de escória.
3. Os maiores acúmulos de N, P, K, Mg, S, Cu e Zn ocorrem no colmo, ao passo que os maiores acúmulos de Ca, B, Fe, Mn e Si apresentam-se nas folhas da cana-planta.
4. Os elementos mais extraídos pela cana-planta foram: Si, K e N.
5. Não há efeito da adubação nitrogenada na produtividade da cana-planta, entretanto, associada à adição de Si na forma de escória de siderurgia, ocorre um aumento de 15 t ha^{-1} na produção de colmos industrializáveis.
6. Não há efeito da adição de Si nas variáveis tecnológicas da cana-planta, por outro lado, o uso da adubação nitrogenada incrementa o teor de sacarose e fibra de forma linear.

De modo geral, a adubação nitrogenada associada à adição de Si na forma de escória mostra-se adequada ao cultivo da cana-planta.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. F.; ABREU, C. A.; ANDRADE, J. C. Determinação de boro em água quente, usando aquecimento com microonda. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. p. 231-239.

AGRIANUAL. **Anuário da agricultura brasileira**. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, 2011.

ALBUQUERQUE, G. A. C.; MARINHO, M. L. Adubação na região Norte-Nordeste. In: ORLANDO FILHO, J. (Coord.). **Nutrição de adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: Instituto do Açúcar e do Alcool, 1983. p. 267-286.

ALCARDE, J. C. **Corretivo de acidez do solo**: características e interpretações. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 1992. 26p.

ANDERSON, D. L.; JONES, D. B.; SNYDER, G. H. Response of a rice and sugar cane relation to calcium silicate slag on Everglades Histossols. **Agronomy Journal**, v. 79, p. 531-535, 1987.

ANDERSON, D. L.; BOWEN, J. E. **Sugarcane nutrition**. Atlanta: Potash and Phosphate Institute, 1990. 39p.

ANDERSON, D. L. Soil and leaf nutrient interaction following application of calcium silicate slag to sugarcane. **Fertilizer Research**, v. 30, p. 9-18, 1991.

AZEREDO, D. F.; BOLSANELLO, J.; WEBER, H.; VIEIRA, J. R. Nitrogênio em cana-planta – doses e fracionamento. **STAB – Açúcar, Alcool e Subprodutos**, v. 4, n. 5, p. 26-33, 1986.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability**: a mechanistic approach. 2.ed. New York, John Wiley & Sons, 1995. 414p.

BARBOSA FILHO, M. P. **Nutrição e adubação do arroz**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. 127p.

BARBOSA, J. C.; MALDONADO JR.; W. **AgroEstat – Sistema de análises estatísticas de ensaios agronômicos**. Jaboticabal: Universidade Estadual Paulista, [s.a.].

BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: IAC, 1983. 48p. (Boletim Técnico, 78).

BITTENCOURT, M. F.; NOKAGHI, R. M.; KORNDÖRFER, G. H.; VOSS, L. V.; JARUSSI, J. R.; CAMARGO, M. S.; PEREIRA, H. S. Efeito do silicato de cálcio sobre a produção e qualidade da cana-de-açúcar: Usina Equipav. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003. **Anais...** [S.l.: s.n.], 2003. p. 66.

BOLOGNA-CAMPBELL, I. R. **Balanço de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta**. 110 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Balanço nacional da cana-de-açúcar e agroenergia**. Brasília, 2007. 139p.

BRUN, L. A.; MAILLET, J.; RICHARTE, J.; HERRMANN, P.; REMY, J. C. Relationships between extractable copper, soil properties and copper uptake by wild plants in vineyard soils. **Environmental Pollution**, v. 102, p. 151-161, 1998.

CAMARGO, O. A.; VALADARES, J. M. A. S.; DECHEN, A. R. Efeitos de pH e da incubação na extração do manganês, zinco, cobre e ferro do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 6, p. 83-88, 1982.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; van RAIJ, B.; Determinação da matéria orgânica. In: van RAIJ, B.; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise**

química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001a. cap. 9, p.173-180.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van; COSCIONE, A. R.; ANDRADE, J. C. Determinação de alumínio, cálcio e magnésio trocáveis em extrato de cloreto de potássio. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade em solos tropicais.** Campinas, Instituto Agrônomo, 2001b. p. 213-224.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van. Adubação nitrogenada no Estado de São Paulo. In: ROSAND, P. C. (Org.). **Adubação nitrogenada no Brasil.** Ilhéus: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1985. p. 47-49.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O. Determinação de nitrogênio inorgânico em solo pelo método da destilação a vapor. In: RAIJ, B. van.; ANDRADE, J. C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. p. 270-276.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C. Nitrogênio e enxofre na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira,** Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2007. p. 355-392.

CARNAÚBA, B. A. A. O nitrogênio e a cana-de-açúcar. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos,** v. 7, p. 24-41, 1990.

CARNEIRO, A. E. V.; TRIVELIN, P. C. O.; VICTORIA, R. L. Utilização da reserva orgânica e de nitrogênio do tolete de plantio (colmo-semente) no desenvolvimento da cana-planta. **Scientia Agricola,** v. 53, n. 2, p. 199-209, 1995.

CARVALHO-PUPATTO, J. G.; BULL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade do arroz de acordo com a aplicação de escórias. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** v. 39, n. 12, p. 1213-1218, 2004.

COELHO, P. E. Da escória ao vidro. **Revista Limpeza Pública**, v. 49, p. 36-45, 1998.

COLETI, R. A.; CASAGRANDE, J. C.; STUPIELLO, J. J.; RIBEIRO, L. D.; OLIVEIRA, G. R. Remoção de macronutrientes pela cana-planta e cana-soca, em Argissolos, variedades RB835486 e SP813250. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 24, n. 5, p. 32-36, 2006.

CONSECANA-SP – Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo. **Manual de instruções**. Piracicaba: CONSECANA-SP, 2006, 112p.

COSTA, M. C. G.; VITTI, G. C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH₃ de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 631-637, 2003.

DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture: studies in plant science**. Amsterdam: Elsevier, 2001. 403p.

ELAWAD, S. H.; GASCHO, G. J.; STREET, J. J. Response of sugarcane to silicate source and rate. I. Growth and yield. **Agronomy Journal**, v. 74, p. 481-483, 1982a.

ELAWAD, S. H.; STREET, J. J.; GASCHO, G. J. Response of sugarcane to silicate source and rate. II. Leaf freckling and nutrient content. **Agronomy Journal**, v. 74, n. 3, p. 484-487, 1982b.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Levantamento de média intensidade dos solos e avaliação de aptidão agrícola das terras do triângulo mineiro**. Rio de Janeiro, 1982. 526 p (Boletim Técnico, 1).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1997. 212p.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306 p.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 91, n. 1, p. 11–17, 1994.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 50, p. 641-664, 1999.

ESPIRONELLO, A. Aplicação de aquamônia, uréia, nitrato de amônio e cloreto de potássio em cinco níveis, em três socas de cana-de-açúcar. In CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS DO BRASIL, 4., Piracicaba, **Anais...** Olinda: STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos, p. 94-102, 1987.

ESPIRONELO, A. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar, calagem, estudos iniciais, nitrogênio e potássio em cana-planta. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 5, p. 17-28, 1989.

FARIA, R. J. **Influência do silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico do solo**. 2000. 47 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2000.

FONSECA, I. M. **Efeito da escória de siderurgia como fonte de silício e sua interação com a adubação nitrogenada em *Brachiaria brizantha***. 2007. 79 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Jaboticabal, 2007.

FONSECA, I. M.; PRADO, R. M.; VIDAL, A. A.; NOGUEIRA, T. A. R. Efeito da escória, calcário e nitrogênio na absorção de silício e na produção do capim-marandu. **Bragantia**, v. 68, n. 1, p. 221-232, 2009.

FONSECA, I. M.; PRADO, R. M.; NOGUEIRA, T. A. R.; BARBOSA, J. C. Macronutrients in marandu palisade grass as influenced by lime, slag, and nitrogen fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 2011 (no prelo).

FOX, R. L.; SILVA, J. A.; YOUNGUE, O. R.; PLUCNETT, D. L.; SHERMAN, G. D. Soil and plants silicon and silicate response by sugar cane. **Soil Science Society America Proceeding**, v. 31, p. 775-779, 1967.

GURGEL, M. N. A. **Efeitos do silicato de cálcio e sua interação com o fósforo no estado nutricional, produtividade e qualidade tecnológica da cana-de-açúcar**. 1979. 62 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1979.

HART, C. E. Effect of nitrogen deficiency upon translocation of ^{14}C in sugar cane. **Plant Physiology**, v. 46, n. 3, p. 419-422, 1970.

HODSON, M. J.; EVANS, D. E. Aluminum silicon interactions in higher plants. **Journal of Experimental Botany**, v. 46, n. 2, p. 161-171, 1995.

IDO, O. T.; **Desenvolvimento radicial e caulinar, de três variedades de cana-de-açúcar, em Rizotron, em dois substratos**. 2003. 141 f. Tese (Doutorado em Agronomia, Produção Vegetal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

ILER, R. K. **The chemistry of silica**. New York, John Wiley & Sons, 1979, 687p.

KHALID, R. A.; SILVA, J. A.; FOX, R. L. Residual effects of calcium silicate in tropical soil. I-Fate of applied silicon during five years cropping. **Soil Science Society of America Journal**, v. 42, n. 1, p. 89-94, 1978.

KIDDER, G.; GASCHO, G. J. **Silicate slag recommended for specified conditions in Florida sugar cane**. Agronomy Facts. Florida Cooperative Extension Service, University of Florida, n. 65. 1977.

KORNDÖRFER, G. H.; VALLE, M.; MARTINS, P. R. Eficiência do aproveitamento do nitrogênio pela cana-planta (*Sacharum* spp.). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, n. 1, p. 23-26, 1997.

KORNDÖRFER, G. H., COLOMBO, C. A.; RODRIGUES, L. L. Effect of thermo-phosphate as silicon source for sugarcane. In: INTER-AMERICAN SUGAR CANE SEMINAR, Miami, 1998.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. de. Papel do silício na produção de cana-de-açúcar. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 21, n. 2, p. 6-9, 2002a.

KORNDÖRFER, G. H.; COLOMBO, C. CHIMELLO, M. A.; LEONE, P. L. C. Desempenho de variedades de Cana-de-Açúcar cultivadas com e sem Nitrogênio. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 20, p. 28-31, 2002b.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. de. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2002c. 23p (Boletim técnico; 1).

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 34 p. (Boletim técnico, 2).

LIMA, J. F. W. F.; DA SILVA, G. L.; DE LUNA, J. G.; DA SILVA, M. A.; OLIVEIRA, E. M. Efeito de doses crescentes de vinhaça e níveis de nitrogênio na produtividade da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 4., Olinda, 1987. **Anais...** Olinda, 1987. p. 730-737.

LINDSAY, W. L.; NORWELL, W. A. Development of DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. **Soil Science Society of America Journal**, v. 42, n. 3, p. 421-428, 1978.

MAE, T. Physiological nitrogen efficiency in rice: nitrogen utilization, photosynthesis and yield potential. **Plant and Soil**, v. 196, p. 201-210, 1997.

MALAVOLTA, E.; FORNASIERI FILHO, D. Nutrição mineral da cultura do arroz. In: FERREIRA, M. E.; YAMADA, T.; MALAVOLTA, E. **Cultura do arroz de sequeiro: fatores afetando a produtividade**. Piracicaba: FEALQ, 1983. p. 95-143.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 201p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MANECHINI, C.; DONZELLI, J. L. **Recomendação da adubação e calagem com base na análise e características dos solos: princípios e aplicações**. Piracicaba: Copersucar, 1984.

MARSCHNER, H. **Mineral nutritional of higher plants**. New York: Academic Press, 1995. 889p.

MAUAD, M.; GRASSI FILHO, H.; CRUSCIOL, C. A. C.; CORRÊA, J. C. Teores de silício no solo e na planta de arroz de terras altas com diferentes doses de adubação silicatada e nitrogenada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 867-873, 2003.

McKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in the soil. **Advances in Agronomy**, v. 15, p. 339-396, 1963.

MELLO, F. A. F. **Uréia fertilizante**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 192p.

MELO, S. P.; KORNDÖRFER, G. H.; KORNDÖRFER, C. M.; LANA, R. M. Q.; SANTANA, D. G. Silicon accumulation and water deficit tolerance in *Brachiaria* grasses. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 4, p. 755-759, 2003.

MIOCQUE, J. Avaliação de crescimento e de produtividade de matéria verde da cana-de-açúcar na região de Araraquara – SP. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 17, n. 4, p. 45-47, 1999.

MIYAKE, Y. The effect of silicon on the grow of the different groups of rice (*Oryza sativa*) plants. **Scientific Report of the Faculty of Agriculture**, v. 8, p. 101-105, 1992.

MORELLI, J.; DEMATTÊ, J. L. I.; DALBEN, A. E.; NELLI, E. Parcelamento da adubação nitrogenada em cana-planta: aplicação no solo. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 15, n. 6, p. 26-30, 1997.

NATALE, W.; COUTINHO, E. L. M. Avaliação da eficiência agrônômica de frações granulométricas de um calcário dolomítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, p. 55-62, 1994.

OLIVEIRA, L. A.; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, A. C. Acumulação de silício em arroz em diferentes condições de pH da rizosfera. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p.685-690, 2007.

OLIVEIRA, M. W. de, TRIVELIN, P. C. O., GAVA, G. J. C.; PENATTI, C. P. Degradação da palhada de cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, v. 56, n. 4, p. 803-809, 1999.

OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; IDO; O. T.; ZUFFELLATO-RIBAS, K. C.; KOEHLER, H. S.; SILVA, D. K. T. Crescimento e desenvolvimento de três cultivares de cana-de-açúcar, em cana-planta, no Estado do Paraná. **Scientia Agraria**, v. 5, n. 1-2, p. 87-94, 2004.

OLIVEIRA, E. C. A.; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, R. I.; FREIRE, M. B. G. S.; SIMOES NETO, D .E.; SILVA, S. A. M. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1343-1352, 2010.

ORLANDO FILHO, J.; RODELLA, A. A.; BELTRAME, J. A.; LAVORENTI, N. A. Doses, fontes e formas de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 17, n. 4, p. 39-41, 1999.

OTA, M. **Studies of the utilization of slag fertilizers**. Kazama-Japão. 1964. s.p.

PENATTI, C. P.; DONZELLI, J. L.; FORTI, J. A. Doses de nitrogênio em cana-planta. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., Piracicaba, 1997. **Anais...** Piracicaba: Centro de Tecnologia da COPERSUCAR 1997, p. 340-349.

PEREIRA, H. S.; BARBOSA, N. C.; CARNEIRO, M. A. C.; KORNDORFER, G. H. Avaliação de fontes e de extratores de silício no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 2, p. 239-247, 2007.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p.

PLUCKNETT, D. L. The use of soluble silicates in Hawaiian agriculture. **University of Queensland Papers**, p. 203-223, 1972.

PMGCA – Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar. **Variedades RB de cana-de-açúcar**. Centro de Ciências Agrárias/UFSCAR, 2008.

PRADO, R. M. **Resposta da cana-de-açúcar à aplicação de escória silicatada como corretivo da acidez do solo**. 2000. 97 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2000.

PRADO, R. M.; CORRÊA, M. C. M.; CINTRA, A. C. O.; NATALE, W.; SILVA, M. A. C. Liberação de micronutrientes de uma escória de siderurgia aplicada em um Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com mudas de goiabeira (*Psidium guajava* L.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, n. 2, p. 536-542, 2002a.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Escória e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 4, p. 739-744, 2000.

PRADO, R. M. Qualidades tecnológicas da cana-planta e da cana-soca em função da aplicação da escória de siderurgia e do calcário. **Scientia Agrária**, v. 2, n. 1-2, p. 61-66, 2001.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Resposta da cana-de-açúcar a aplicação da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 199-207, 2001.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. **Uso agrícola da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo**: estudos na cultura da cana-de-açúcar. Jaboticabal, Fundação de Estudos e Pesquisas em Medicina Veterinária, Agronomia e Zootecnia. 2001. 67p.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Calcário e escória de siderurgia avaliados por análise foliar, acúmulo e exportação de macronutrientes em cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 1, p. 129-135, 2002b.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 2, p. 287-296, 2003.

PRADO, R. M.; PANCELLI, M. A. Resposta de soqueiras de cana-de-açúcar à aplicação de nitrogênio em sistema de colheita sem queima. **Bragantia**, v. 67, n. 4, p. 951-959, 2008.

PRIMAVESI, A. C.; PRIMAVESI, O.; CORRÊA, L. A.; CANTARELLA, H.; SILVA, A. G. Absorção de cátions e ânions pelo capim-coastcross adubado com uréia e nitrato de amônio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 40, n. 3, p. 247-253, 2005.

PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C.; CORRÊA, L. A.; SILVA, A.; CANTARELLA, H. Lixiviação de nitrato em pastagem de coastcross adubada com nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 3, p. 683-690, 2006.

PULZ, A. L. **Estresse hídrico e adubação silicatada em batata (*Solanum tuberosum* L.) cv. Bintje. 2007.** 56 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

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

QUAGGIO, J. A.; RAIJ, B. van. Determinação do pH em cloreto de cálcio e da acidez total. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A., (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas: Instituto Agronômico, 2001. p. 181-188.

RAID, R. N.; ANDERSON, D. L.; ULLOA, M. F. Influence of cultivar and amendment of soil with calcium silicate slag on foliar disease development and yield of sugar cane. **Crop Protection**, v. 11, n. 1, p. 84-88, 1992.

RAIJ, B. van; CAMARGO, O. A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, v. 32, p. 223-31, 1973.

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

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H. Outras culturas industriais. In: RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo.** 2 ed. rev. Campinas: Instituto Agronômico, 1997. p. 233-239.(Boletim técnico, 100).

RAIJ, B. van.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Eds.) **Análise química para avaliação da fertilidade do solo.** Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.

RAIJ, B. van; QUAGGIO, J. A. Determinação de fósforo, cálcio, magnésio e potássio extraídos com resina trocadora de íons. In: RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. p. 189-199.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society**, v. 58, n. 2, p.179-207, 1983.

RHOTON, F. E. Influence of time on soil response to no-till practices. **Soil Science Society American Journal**, v. 64, p. 700-709, 2000.

RODELLA, A. A.; ZAMBELLO JUNIOR, E.; ORLANDO FILHO, J. Calibração de cálcio, magnésio e acidez do solo para cana-de-açúcar cultivada na região de cerrado. **STAB – Açúcar Álcool e Subprodutos**, v. 2, n. 3, p. 45-48, 1984.

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

ROSS, L.; NABABSING, P.; WONG YOU CHEONG, Y. Residual effect of calcium silicate applied to sugarcane soils. In: INTERNATIONAL CONG. THE SOC. SUGAR CANE TECHNOL. 15., Durban, **Proceedings...** v. 15, n. 2, p. 539-542. 1974.

ROSSIELLO, R. O. P. **Bases fisiológicas da acumulação de nitrogênio e potássio em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp. cv. NA56-79) em resposta à adubação nitrogenada em Cambissolo**. 1987. 172 f. (Doutorado na área de Ciência do Solo) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

SAS INSTITUTE (Cary, Estados Unidos). **Software and services**: system for Windows, versão 9.0: software. Cary, 2002.

SCHULTZ, N.; LIMA, E.; PEREIRA, M.G.; ZONTA, E. Efeito residual da adubação na cana-planta e da adubação nitrogenada e potássica na cana-soca colhidas com e sem a queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 811-820, 2010.

SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba, Gráfica Prol, 2006. 415p.

SILVEIRA, J. A. G.; CROCOMO, O. J. Assimilação de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em presença de elevado nível de N e de vinhaça no solo. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v. 2, n. 2, p. 7-15, 1990.

SILVEIRA JÚNIOR, E. G.; PENATTI, C.; KORNDÖRFER, G. H.; CAMARGO, M. S. Silicato de cálcio e calcário na produção e qualidade da cana-de-açúcar: usina Catanduva. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO: ALICERCE DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO, 39., 2003, Ribeirão Preto, SP. **Resumos...** Ribeirão Preto: USP, 2003. p. 66.

SPIRONELLO, A.; RAIJ, B. van.; PENATTI, C. P.; CANTARELLA, H. MORELLI, J. L.; ORLANDO FILHO, J., LANDELL, M. G. A.; ROSSETTO, R. Cana-de-açúcar. In: RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2 ed. rev. Campinas: Instituto Agrônomo, 1997. p. 237-239.(Boletim técnico, 100).

STUPIELLO, J. P. **Cana como matéria prima**. In: PARANHOS, S. B. (Coord.). Cana-de-açúcar: cultivo e utilização. Campinas: Cargill, 1987. v. 2, p. 759-804.

SUGUITANI, C. **Fenologia da cana-de-açúcar (*Sacharum spp.*) sob efeito do fósforo**. 2001. 79 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H., (Ed.). **Science of the rice**

plant: physiology. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1995. cap. 5, p. 420-433.

TASSO JUNIOR, L. C.; MARQUES, M. O.; CAMILOTTI, F.; SILVA, T. Extração de macronutrientes em cinco variedades de cana-de-açúcar cultivadas na região centro-norte do estado de São Paulo. **STAB – Açúcar Álcool e Subprodutos**, v. 25, n. 6, p. 38-42, 2007.

TEDESCO, M. J.; VOLKWEISS, S. J.; BOHNEN, H. **Análises de solo, plantas e outros minerais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. 188p. (Boletim Técnico de Solos, 5).

TISDALE, S. L.; NELSON, W.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers**. 4 ed. New York: Macmillan Publishing Company, 1985. 754p.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. J.; BEATON, J. D. **Soil Fertility and Fertilizers**. 5 ed. Macmillan Publishing Company: New York, 1993. 634p.

TRIVELIN, P. C. O. **Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar: três casos estudados com o uso de traçador ^{15}N** . 2000. 143 f. Tese (Livre-docência) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OLIVEIRA, M. W.; GAVA, G. J. C.; SARRIÉS, G. A. Utilização de nitrogênio e produtividade de cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, p. 636-646, 2002.

UNICA. UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR. **Sustentabilidade – meio ambiente:** melhores práticas agrícolas e ambientais – consumo de fertilizantes. Disponível em: <http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode={0C8534A8-74A7-4952-8280-C5F6FB9276B7}>. Acesso em: 10 de março de 2009.

URQUIAGA, S.; CRUZ, K. H. S. BODDEY, R. M. Contribution of nitrogen fixation to sugar cane: nitrogen-15 and nitrogen-balance estimates. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 1, p. 105-114, 1992.

URQUIAGA, S.; RESENDE, A. S.; QUESADA, D. M.; SALLES, L.; GONDIM, A.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Efeito das aplicações de vinhaça, adubo nitrogenado e da queima no rendimento de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. **Anais...** Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM.

VALADARES, J. M. A. S.; BATAGLIA, O. C.; FURLANI, P. R. Estudos de materiais calcários usados como corretivos do solo no Estado de São Paulo. III – Determinação de Mo, Co, Cu, Zn e Fe. **Bragantia**, v. 33, n. 15, p. 147-152, 1974.

VALE, D. W. do. **Efeito da aplicação de nitrogênio nos atributos químicos do solo, na nutrição e na produção de cana-de-açúcar**. 2009. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2009.

VITTI, A. C.; TRIVELIN, P. C. O.; GAVA, G. J. C.; PENATTI, C. P.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C. E.; FRANCO, H. C. J. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada ao nitrogênio residual da adubação e do sistema radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 2, p. 249-256, 2007.

VITTI, G. C.; TAVARES JÚNIOR, J. E.; LUZ, P. H.; FAVARIN, J. L.; COSTA, M. C. G. Influência da mistura de sulfato de amônio com uréia sobre a volatilização de nitrogênio amoniacal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 663-671, 2002.

WALLACE, A. Relationships among nitrogen, silicon and heavy metal uptake by plants. **Soil Science**, v. 147, n. 6, p. 457-460, 1989.

WIEDENFELD, R. P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. **Agricultural Water Management**, v. 43, n. 2, p. 173-182, 2000.

ZAMBELLO JÚNIOR, E.; AZEREDO, D. F. Adubação na Região Centro-Sul. In: ORLANDO FILHO, J. (Coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1983. p. 287-313.