**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

CELSO EDUARDO BONAFÉ PERES

**Eficiência agronômica de fontes de fósforo e micronutrientes
sobre a produtividade e qualidade tecnológica em soqueira de
cana-de-açúcar**

2014

CELSO EDUARDO BONAFÉ PERES

**Eficiência agronômica de fontes de fósforo e micronutrientes
sobre a produtividade e qualidade tecnológica em soqueira de
cana-de-açúcar**

Versão corrigida

Dissertação apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Zootecnia.

Área de concentração: Qualidade e produtividade Animal

Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz.

Pirassununga - SP

2014

EFICIÊNCIA AGRONÔMICA DE FONTES DE FÓSFORO E
MICRONUTRIENTES SOBRE A PRODUTIVIDADE E QUALIDADE
TECNOLÓGICA EM SOQUEIRA DE CANA-DE-AÇÚCAR

Celso Eduardo Bonafé Peres

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À FACULDADE DE ZOOTECNIA E
ENGENHARIA DE ALIMENTOS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, COMO
PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ZOOTECNIA.

Aprovada por:

Prof. Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz.

(FZEA/USP - Orientador)

Dr. Estevão Vicari Mellis

(IAC/CSRAFS – Membro)

Prof. Dr. Valdo Herling Rodriguez

(FZEA/USP – Membro)

Pirassununga - BRASIL

Fevereiro 2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Serviço de Biblioteca e Informação da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos
da Universidade de São Paulo

P437e Peres, Celso Eduardo Bonafé
Eficiência agrônômica de fontes de fósforo e micronutrientes sobre a produtividade e qualidade tecnológica em soqueira de cana-de-açúcar / Celso Eduardo Bonafé Peres. -- Pirassununga, 2014.
114 f.
Dissertação (Mestrado) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - Universidade de São Paulo. Departamento de Zootecnia.
Área de Concentração: Qualidade e Produtividade Animal.
Orientador: Prof. Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz.

1. Palavras-chave 2. Palavras-chave 3. Palavras-chave
4. Palavras-chave 5. Palavras-chave. I. Título.

Dedicatória

Aos meus pais, Celso e Maria Cecília, por todo amor e compreensão.

Aos meus irmãos, Ana Paula e Padu e ao meu sobrinho Pedro, obrigado por tudo.

A minha namorada Núbia, por todo companheirismo ao longo desse trajeto.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Pedro Henrique de Cerqueira Luz, pela confiança, pela oportunidade da orientação, pelos inúmeros ensinamentos ao longo do curso, pela amizade e sobretudo, pela compreensão nos momentos de erro.

Ao Prof. Dr. Valdo Rodrigues Herling, pela rica convivência ao longo do mestrado, pela confiança e oportunidades de trabalho, pela ajuda em todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Cesar Gonçalves Lima, pela amizade sincera, pelos valiosos ensinamentos em estatística e por toda a ajuda nos trabalhos realizados ao longo do mestrado.

Ao Prof. Dr. Rogério Lacaz, pela amizade ao longo do curso e pela ajuda em momentos difíceis.

A bibliotecária Vanessa Rodrigues (FZEA-USP) pela grande ajuda nas pesquisas bibliográficas.

À FZEA-USP pela oportunidade.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo.

Aos funcionários do laboratório da Agrárias, na pessoa do Sr. Marcos Ferraz, pela ajuda nas análises, pela amizade e convivência.

Aos funcionários do Setor de Agrárias, Paulo, Layane e Manoel por toda ajuda.

Aos funcionários da secretaria de Pós-Graduação da FZEA.

A Usina Ferrari nas pessoas dos senhores José Sérgio Ferrari e Reginaldo Aparecido Casarei.

Ao engenheiro agrônomo Thiago Fraga.

A todos os amigos, dividi com cada um vocês a realização deste trabalho e cujos nomes não cito para não cometer o erro imperdoável de esquecer de alguém.

RESUMO

PERES, C.E.B. **Eficiência agronômica de fontes de fósforo e micronutrientes sobre a produtividade e qualidade tecnológica em soqueira de cana-de-açúcar.** 2014. 116f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2014.

A nutrição mineral representa um dos principais fatores de produção na cultura da cana-de-açúcar, tendo impacto direto na produtividade, na qualidade, e nos custos de produção. A expansão da cultura sobre área de baixa fertilidade natural ou ainda em áreas tradicionais de cultivo com evidente esgotamento dos recursos, reforça a necessidade da aplicação de fertilizantes na recuperação da produtividade, principalmente em áreas de soqueira de cana. O fósforo é um elemento chave nesse processo dada a intensidade das reações de adsorção e fixação, que o tornam pouco disponível para a cultura. Além disso o fato de ser normalmente aplicado na reforma do canavial, não garante o correto fornecimento do mesmo nos ciclos consecutivos de soca. Já os micronutrientes representam um desafio, uma vez que mesmo em áreas deficientes, as respostas não são conclusivas. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de fertilizantes fosfatados aplicados no solo e micronutrientes aplicados via foliar sobre a produtividade e qualidade tecnológica em soqueira de cana-de-açúcar. Para tanto, foi instalado um experimento no município de Porto Ferreira(SP) na Usina Ferrari S/A, em dezembro de 2010, sob Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico de textura média, com a variedade RB - 85 7515, 3ª soca em área colhida mecanicamente e sem queima. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados com parcelas subdivididas. Nas parcelas foram aplicados os tratamentos principais correspondendo às fontes de fósforo: T₁ - Controle (sem adubação); T₂ - 495 kg ha⁻¹ da formulação 21-00-14 (nitrato de amônio + cloreto de potássio); T₃ - 495 kg ha⁻¹ da formulação 21-07-14 (nitrato de amônio + superfosfato triplo + cloreto de potássio); e T₄ - 495 kg ha⁻¹ da formulação 21-07-14 (Polifosfatos + ortofosfatos -YaraMila™). Nas subparcelas foram aplicados os tratamentos secundários, compostos pela aplicação ou não de micronutrientes via foliar. As doses e fontes utilizadas foram: Zn= 778g ha⁻¹ (óxidos); B= 150 g ha⁻¹ (Borato de monoetilamina); Cu= 110g ha⁻¹ (óxidos); Mn= 331g ha⁻¹ (Carbonato de Mn); e Mo= 52g ha⁻¹ (Molibdato de sódio). Após a colheita da cana (Agosto de 2011) pode-se constatar que a produtividade média da soqueira de cana-de-açúcar respondeu significativamente a aplicação de N-K, N-P-K e as diferentes fontes de P. A utilização de 104 kg ha⁻¹ de N na forma de nitrato de amônio e 70 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio proporcionam incremento médio de produtividade de 4 t de ha⁻¹ em relação ao controle sem adubação. Em relação ao fósforo, a utilização de 35 kg ha⁻¹ de P₂O₅ promoveu um ganho médio de produtividade de 12,6 t ha⁻¹ em comparação ao controle sem adubação. Considerando as fontes, o fertilizante 21-07-14 YaraMila contendo polifosfatos em sua formulação proporcionou produtividade média superior em de 4 t ha⁻¹ em relação ao fertilizante 21-07-14 contendo como fonte de P o superfosfato triplo. A utilização de micronutrientes nas doses, fontes e forma de aplicação testadas, não proporcionou ganho produtivo

significativo em relação a área sem aplicação. Com respeito as variáveis tecnológicas, utilização de fertilizantes contendo N-K e N-P-K e a utilização de micronutrientes aplicados via foliar nas doses e fontes testadas não alterou significativamente os parâmetros, pureza, pol, fibra e ART

Palavras-chave: cana-soca, fósforo, micronutrientes produtividade, qualidade tecnológica.

ABSTRACT

PERES, C.E.B. **Agronomical efficiency of phosphorus sources and micronutrients over productivity and technological quality in ratoon sugar cane.** 2014. 116 p. Dissertation (Msc) – Faculty of Animal Science and Food Engineering, University of São Paulo, Pirassununga, 2014.

The mineral nutrition is one of the main production factors in the sugar cane culture having a direct impact in productivity, quality, and in production costs. The expansion of culture in low natural fertility area and traditional area with evident source depletion reinforce the necessity of fertilizers application in the productivity recovering, especially in areas of brass knuckles. The phosphorus is a key element in this process due to the intensity of the adsorption and fixation reactions that make it less available for the culture. Besides that, the fact that phosphorus is normally applied in the sugar cane area reform does not guarantee the correct supply of this element in the consecutives cycles of ratoon. On the other hand, the micronutrients present a challenge, knowing that even in deficient areas, the answers are not conclusive. In this context, the main of this work was to evaluate the efficiency of phosphate fertilizers applied in the soil and micronutrients applied via foliar over the productivity and technological quality in ratoon sugar cane. For that purpose, it was installed an experiment in a town called Porto Ferreira (SP), in the Plant Ferrari S/A, in December 2010, under Oxisol Distrophic medium texture with the variety RB – 857515, in the 3^a ratoon sugar cane mechanically harvested and unburned area. The experimental design used was the one with randomized blocks with split plots. In these plots, the main treatments were applied, each one corresponding to the sources of phosphorous: T₁– Control (without fertilizer); T₂– 495 kg ha⁻¹ from formulation 21-07-14 (ammonium nitrate + triple superphosphate + potassium chloride); and T₄– 495 kg ha⁻¹ from formulation 21-07-14 (Polyphosphates + orthophosphates - YaraMila™). In the subplots, the secondary treatments were applied, composed by the application or not of the micronutrients via foliar. The doses and sources used were: Zn= 778g ha⁻¹ (oxides); B= 150 g ha⁻¹ (Borate monoetolomine); Cu= 110g ha⁻¹ (oxides); Mn= 331g ha⁻¹ (Mn Carbonate); and Mo= 52 g ha⁻¹ (Sodium molybdate). After harvesting the sugar cane (August 2011), it could be concluded that the average productivity of the brass knuckles had a significant response to the application of N-K, N-P-K and to the different sources of P. The use of 104 kg ha⁻¹ of N in the form of ammonium nitrate and 70 kg ha⁻¹ of K₂O in the form of potassium chloride made possible an average increasing in productivity of 4 t of ha⁻¹ when comparing with the control without fertilizer. Considering the sources, the fertilizer 21-07-14 YaraMila containing polyphosphates in its formulation promoted superior average productivity of 4 t ha⁻¹ when compared to the fertilizer 21-07-14, which contained triple superphosphate as P source. The use of micronutrients in the doses, sources and application forms tested didn't promote significant production gain in relation to the area without application. About the technological varieties, the use of fertilizers containing N-K and N-P-K and the use of micronutrients applied via foliar in the tested doses and sources didn't change significantly the parameters, purity, pol, fiber and ATR.

Key words: ratoon sugar cane, Phosphorus, Micronutrients, Productivity, Technological quality.

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1	Importância social e econômica da cana-de-açúcar.	22
2.2	Extração, exportação e reciclagem de macro e micronutrientes na cultura da cana-de-açúcar.	27
2.3	Resposta da soqueira de cana-de-açúcar a aplicação de fósforo.....	31
2.4	Produção de fertilizantes fosfatados	39
2.5	Resposta da cana-de-açúcar à aplicação de micronutrientes.....	48
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	55
3.1	Escolha e caracterização química e física da área experimental (Etapa1).....	56
3.2	Preparação dos tratamentos e implantação do experimento (Etapa 2)	57
3.3	Coletas de folhas e solo (Etapa 3)	61
3.4	Colheita da cana-de-açúcar (Etapa 4).....	63
3.5	Processamento dos dados e análise estatística (Etapa 5).....	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
4.1	Avaliação da produtividade da cana-de-açúcar	67
4.2	Parâmetros químicos de avaliação de nutrientes nas folhas coletadas 120 dias após a aplicação dos tratamentos.....	74
4.2.1	Macronutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio).....	74
4.2.2	Micronutrientes (boro, cobre, ferro, manganês e zinco)	79
4.3	Parâmetros químicos do solo 120 dias após a aplicação dos tratamentos.....	83
4.3.1	Macronutrientes	86

4.4	Avaliação dos atributos qualitativos da cana-de-açúcar.....	104
5	CONCLUSÕES	107
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produtividade média e teores de macronutrientes extraídos pelos colmos de cinco variedades de cana-de-açúcar (Cana-planta). Fonte: adaptado de Tasso Junior <i>et al.</i> (2007).....	28
Tabela 2. Extração e exportação de nitrogênio, fósforo e potássio em 11 variedades de cana-de-açúcar. (Fonte: Adaptado de Oliveira <i>et al.</i> ; 2010)	28
Tabela 3. Extração de micronutrientes pela cultura da cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de Orlando Filho (1993).	30
Tabela 4. Acúmulo de macronutrientes pela cana-planta para a produção de 100 t de colmos industrializáveis (Adaptado de Franco <i>et al.</i> , 2008).	30
Tabela 5. Efeito residual da aplicação de fertilizantes fosfatados em solo cultivado com cana-de-açúcar sobre variáveis tecnológicas da cana-soca (2º corte) e ressoça (3º corte) (variedade RB 86 7515, Goianésia, GO- Safra 2008 e 2009). Fonte: Adaptado de Sousa e Korndörfer (2012).	47
Tabela 6. Doses e respostas produtivas de três variedades de cana-de-açúcar submetidas à aplicação de micronutrientes no sulco de plantio. Fonte. Adaptado de Korndörfer <i>et al.</i> (1995).	52
Tabela 7. Análise tecnológica da cana-planta. Fonte. Korndörfer <i>et al.</i> (1995).	52
Tabela 8. Micronutrientes na produtividade e qualidade das soqueiras em 6 locais. Fonte: Adaptado de Mellis <i>et al.</i> (2010).....	54
Tabela 9. Características químicas e físicas do solo da área experimental.	57
Tabela 10. Tratamentos principais (Fontes de fósforo para soqueira de cana-de-açúcar).	58
Tabela 11. Produto comercial, doses e fontes dos micronutrientes utilizados na 3ª soqueira de cana-de-açúcar.	60
Tabela 12. Análise de variância para os dados de produtividade média obtidos na 3ª soqueira de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais, secundários e interação entre eles.....	67
Tabela 13. Produtividade média (t ha ⁻¹) da 3ª soqueira de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais e secundários.....	67
Tabela 14. P- valor da estatística F para os contrastes de médias da produtividade da soqueira de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais.	68

Tabela 15. Teores médios de fósforo no solo 120 dias após a aplicação dos tratamentos 3 e 4.	70
Tabela 16. Teores médios de micronutrientes presentes no solo (média para as 3 profundidades amostradas) das subparcelas 120 dias após a aplicação dos tratamentos.	73
Tabela 17. Limites de interpretação de teores de micronutrientes no solo para a cultura da cana-de-açúcar. Fonte: Raij et al. (1996).	73
Tabela 18. Análise de variância para os teores foliares de N, P e K presentes nas folhas da soqueira de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais, secundários e interação entre eles.....	74
Tabela 19. Contrastes de médias para os teores foliares de nitrogênio e potássio em função dos tratamentos principais.....	75
Tabela 20. Contrastes de médias para o desdobramento da interação que compara os níveis dos tratamentos principais dentro dos níveis dos tratamentos secundários.....	78
Tabela 21. Análise de variância para os teores de micronutrientes foliares na soqueira de cana-de-açúcar (4ª corte) em função dos tratamentos principais e secundários.....	79
Tabela 22. Análise de variância para o desdobramento da interação que compara os níveis do tratamento secundário dentro de cada nível dos tratamentos principais	81
Tabela 23. Análise de variância para os atributos químicos do solo coletado 120 dias após a aplicação dos tratamentos.	84
Tabela 24. Quadro de médias para os atributos químicos do solo coletado 120 dias após a aplicação dos tratamentos	85
Tabela 25. Contrastes de média para os teores de K no solo em função das profundidades de coleta	86
Tabela 26. Análise de variância para o desdobramento da interação: efeito dos tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo sobre os teores de P.	88
Tabela 27. Contrastes de médias para os valores de P entre os tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo.	88
Tabela 28. Contrastes de medias para os valores de pH nas diferentes camadas de solo amostradas 120 dias após a aplicação dos tratamentos.	90

Tabela 29. Análise de variância para o desdobramento da interação: efeito os tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solos sobre os teores de MO.....	92
Tabela 30. Contrastes de médias para os valores de MO entre os tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo.	92
Tabela 31. Contrastes de médias para os valores de acidez trocável do solo (média para as 3 camadas amostradas), em função dos tratamentos principais 120 dias após a aplicação dos tratamentos.	94
Tabela 32. Contrastes de médias para os valores de acidez trocável nas diferentes camadas de solo amostradas 120 dias após a aplicação dos tratamentos.	95
Tabela 33. Análise de variância para o desdobramento da interação: efeito os tratamentos secundários dentro de cada nível dos tratamentos principais.	96
Tabela 34. Contrastes de médias para os teores de Cu no solo (média para as 3 camadas de solo amostradas), em função dos tratamentos principais 120 dias após a aplicação dos tratamentos.	97
Tabela 35. Análise de variância para o desdobramento da interação: efeito os tratamentos secundários dentro de cada nível dos tratamentos principais.	98
Tabela 36. Análise de variância para o desdobramento da interação: efeito os tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solos.....	99
Tabela 37. Contrastes de médias para os teores de Fe no solo em função dos tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo.....	100
Tabela 38. Análise de variância para o desdobramento da interação: efeito os tratamentos secundários dentro de cada nível dos tratamentos principais. ...	101
Tabela 39. Análise de variância para o desdobramento da interação: efeito dos tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo.....	102
Tabela 40. Contrastes de médias para os teores de Zn no solo entre os tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo.....	103
Tabela 41. Análise de variância para os atributos qualitativos obtidos na terceira soca de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais e secundários.....	104
Tabela 42. Correlações de Person entre os atributos tecnológicos obtidos na terceira soca de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais e secundários.....	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Comparativo de áreas entre as principais Culturas agrícolas do Brasil na safra 2013. (Fonte: IBGE, 2013).	22
Figura 2. Produção brasileira de veículos automotores. (Fonte: Adaptado de ANFAVEA, 2013).	23
Figura 3 Setor Sucroalcooleiro safra 2012/13 nas principais regiões produtoras do Brasil (a) Área Plantada. (b) Produção. (c) Produtividade. (d) Principais estados produtores de cana-de-açúcar na região Sudeste. (Fonte: Adaptado de Conab, 2013).....	23
Figura 4. Produtividade média da cana-de-açúcar no Brasil. Fonte: Adaptado de Conab, 2013).....	24
Figura 5. Variação na produtividade da variedade de cana-de-açúcar SP 70-1143 em 4 anos de cultivo, nos tratamentos adubados e não adubados. (a) Produtividade média da cana planta, 1ª, 2ª e 3ª socas. (b) Redução da produtividade média para cada ciclo de cultivo dentro dos tratamentos. Fonte: Adaptado de Orlando Filho <i>et al.</i> 1993.....	25
Figura 6. Componentes do Custo de produção da cana-de-açúcar safra 2011/12. a) Cana-planta b) Cana-soca (Fonte: Elaborado a partir de Agrianual, 2012).	26
Figura 7. Redução dos custos de produção em função do aumento da produtividade da cana-de-açúcar. (Fonte: Silva, 2006).....	27
Figura 8. Produção de colmos e concentração média de macronutrientes de 12 variedades de cana-de-açúcar, em três ciclos de produção e dois tipos de solos (a) Produção (b) Nitrogênio (c) Fósforo (d) Potássio. LV: Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico Psamítico; NV: Nitossolo Vermelho Eutroférico Latossólico. Fonte: Adaptado de Gomes (2003).	29
Figura 9. Formas de fósforo no sistema solo-planta (interdependências e equilíbrios). Observações: I= Intensidade; Q= Quantidade; Q/I= Fator capacidade de fósforo. Fonte: Adaptado de Novais & Smyth (1999)	32
Figura 10. Produtividade de grãos do híbrido de milho Bt 30F53H em função das doses e fontes de fósforo convencional e polimerizado. (Fonte: Adaptado de Valderrama et al., 2010)	34

Figura 11. (a) Fluxo difusivo de P em função de diferentes fontes, solos e umidades. (b) Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP). Nota: Barras de cor cinza clara e cinza escura indicam 80 e 40% da umidade na capacidade de campo. (Fonte: Adaptado de Costa et al., 2009)	37
Figura 12. Efeito de fontes de fósforo sobre o fluxo difusivo desse elemento em amostras de solo com diferentes teores de argila (Fonte: Adaptado de Villani et al., 1993).	38
Figura 13. Via de obtenção dos principais adubos fosfatados utilizados no Brasil superfosfato triplo Fonte: Adaptado de Lápido-Loureiro e Melamed (2009).	39
Figura 14. Rota de produção dos fertilizantes YaraMila (elaborado pelo autor a partir de dados da YARA).....	40
Figura 15. Redução da saturação por bases do solo ao longo de 5 ciclos de corte da cana-de-açúcar. Fonte: adaptado de Morelli <i>et al.</i> (1987).	42
Figura 16. Resultados da análise química do solo e produtividade da 5ª soca de cana-de-açúcar após a aplicação dos tratamentos. Observações: Todos os tratamentos receberam como base 100-00-120 kg ha ⁻¹ de N-P ₂ O ₅ -K ₂ O. Fonte: Adaptado de Lorenzetti <i>et al.</i> (1992).	43
Figura 17. Produtividade da cana-de-açúcar em função das fontes e da localização de aplicação do fósforo. (a) Cana-Planta (b) Cana-soca. Médias no mesmo ciclo de produção e seguidas por uma mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade segundo Tukey. FNR: Fosfato natural reativo); SPT: Superfosfato triplo; AT: Área Total; S: Sulco de Plantio. Fonte: Adaptado de Rossetto <i>et al.</i> (2002).	44
Figura 18. Resposta da variedade SP79-1010 (3º corte) a aplicação de duas fontes de fósforo. Fonte: Adaptado de Resende <i>et al.</i> (2003).	45
Figura 19. Efeito da aplicação de 300 kg ha ⁻¹ de P ₂ O ₅ de diferentes fertilizantes fosfatados aplicados no solo antes do plantio da cana-de-açúcar sobre a produtividade agrícola da cana-planta, soca e ressoca, variedade RB 867515. Médias em um mesmo ciclo de Cultivo e seguidas por uma mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade segundo teste de Tukey. (Fonte: adaptado de Sousa e Korndörfer, 2012). Nota: Colheita da cana: Cana-planta: 19 meses; Cana-soca: 6,5 meses; Ressoca: 12 meses. Safras: 2007; 2008 e 2009.	46

Figura 20. Relação entre os teores de B, Cu, Fe, Mn e Zn abaixo do nível crítico presentes em amostras de solo e nas plantas de cana-de-açúcar. (d) Zinco. Fonte. Adaptado de Vale <i>et al.</i> (2008).....	49
Figura 21. Porcentagem de amostras de solo e folhas com teores de micronutrientes abaixo do nível crítico, em função do número do corte realizado nas áreas. (a) B (b) Cu (c) Zn. Fonte: Adaptado de Vale <i>et al.</i> (2008).....	51
Figura 22. Fluxograma de trabalho.	55
Figura 23. a) Produto final da mistura de grânulos N-P-K (NAM + SPT + KCl). b) Produto acondicionado em sacos plásticos para aplicação no campo. c) Aspecto da área experimental no momento da aplicação dos tratamentos.	59
Figura 24. a) Parcela experimental. b) Subparcela experimental.....	61
Figura 25. Distribuição da área experimental.....	61
Figura 26. Processo de coleta de solos estratificada. a) Sonda coletando na linha de plantio. b) Sonda + êmbolo. c) Conjunto de anéis contendo solo coletado em 4 profundidades.	62
Figura 27. Croqui da área experimental.	63
Figura 28. Colheita manual das unidades experimentais.....	64
Figura 29. Separação das parcelas.....	64
Figura 30. Pesagem das parcelas.....	65
Figura 31. Feixe de colmos de cana-de-açúcar para análise tecnológica.	65
Figura 32. Contrastes de médias para a produtividade média da soqueira de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais.	69
Figura 33. Produtividade média da 3ª soqueira de cana-de-açúcar em função dos tratamentos secundários.	72
Figura 34. Contrastes de média para os teores de nitrogênio foliar em função dos tratamentos principais.....	75
Figura 35. Contrastes de média para os teores de nitrogênio foliar em função dos tratamentos secundários.	76
Figura 36. Contrastes de média para os teores de potássio foliar em função dos tratamentos principais.	76
Figura 37. Contrastes de média para os teores de potássio foliar em função dos tratamentos secundários.....	77
Figura 38. Contrastes de médias para os teores de P foliar em função da interação entre os tratamentos principais e os secundários.....	79

Figura 39. Teores de boro, cobre, ferro e manganês presentes nas folhas da soqueira de cana-de-açúcar (4ª corte) 120 dias após a aplicação dos tratamentos.	80
Figura 40. Teores médios de zinco em função da interação entre os tratamentos principais e os secundários	81
Figura 41. Faixas de micronutrientes consideradas adequadas para a cultura da cana-de-açúcar Fonte: Adaptado de Raij <i>et al.</i> (1996).	82
Figura 42. Teores de potássio presentes no solo (média para as 3 camadas de amostradas), 120 dias após a aplicação dos tratamentos.	86
Figura 43. Teores de K no solo em função das profundidades de coleta, 120 dias após a aplicação dos tratamentos.	87
Figura 44. Teor médio de fósforo dentro de cada uma das camadas de solo amostradas em função dos tratamentos.	89
Figura 45. pH médio do solo ao longo das 3 camadas de solo amostradas. ...	90
Figura 46. Geração de carga elétrica variável na interface de óxidos de ferro e adsorção de íons fosfato.	91
Figura 47. Teores de matéria orgânica presentes nas 3 camadas de solo amostradas 120 dias após a aplicação dos tratamentos principais.	93
Figura 48. Valores médios de acidez trocável do solo (média para as 3 camadas amostradas), 120 dias após a aplicação dos tratamentos a) Tratamentos principais b) Tratamentos secundários.	94
Figura 49. Acidez trocável presente nas 3 camadas de solo amostradas 120 dias após aplicação dos tratamentos.	95
Figura 50. Teores médios de B no solo (média para as 3 camadas de solo amostradas), 120 dias após a aplicação considerando a interação entre os tratamentos principais e tratamentos secundários.	97
Figura 51. Teores médios de Cu no solo (média para as 3 camadas de solo amostradas), 120 dias após a aplicação dos tratamento, em função dos tratamentos principais	98
Figura 52. Teores médios de ferro no solo (média para as 3 camadas amostradas) 120 dias após a aplicação dos tratamentos considerando a interação entre os tratamentos principais e tratamentos secundários.	99

Figura 53. Teores médios de Fe presentes no solo, 120 dias após a aplicação dos tratamentos, em função da interação entre os tratamentos principais e as profundidades de coleta de solo.	100
Figura 54. Teores médios de Zn no solo, 120 dias após a aplicação dos tratamentos, considerando a interação entre os tratamentos principais e tratamentos secundários.	102
Figura 55. Teores médios de Zn presentes no solo, 120 dias após a aplicação dos tratamentos, em função da interação entre os tratamentos principais e as profundidades de coleta de solo.	103
Figura 56. Variáveis tecnológicas obtidas na 3ª soqueira de cana-de-açúcar de em função dos tratamentos principais. (a) Pureza (b) Pol (c) Fibra (d) ART..	104
Figura 57. Variáveis tecnológicas obtidas na terceira soqueira de cana-de-açúcar em função dos tratamentos secundários. (a) Pureza, Fibra e Pol. (b) ART.	105

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar representa uma das principais culturas agroindustriais do Brasil. Pelos dados da CONAB (2013) a área colhida e destinada à atividade sucroalcooleira na safra 2013/14 é estimada em 8.79 milhões de hectares; com uma produção de mais de 650 milhões de toneladas de cana-de-açúcar o que implica em uma produtividade média de 74 t ha^{-1} . Ainda, segundo a companhia, na safra 2013/14, 11% das áreas cultivadas de cana, ou seja, mais de 970 mil hectares devem ser renovadas, permanecendo o restante como soqueira.

No sistema produtivo da cana-de-açúcar, tanto no plantio quanto nos tratamentos culturais ao longo das soqueiras, a nutrição mineral representa um dos principais fatores de produção com impacto direto na produtividade, na qualidade e nos custos de produção. De acordo com AGRIANULA (2012), dentro dos custos totais para o cultivo anual das soqueiras (cerca de R\$ 4500,00 ha^{-1}), os fertilizantes representam mais de 11% do valor total. Todavia, quando considerados apenas os insumos aplicados diretamente na lavoura, ou seja, maturadores, herbicidas e fertilizantes, este último representa mais de 64% dos gastos totais. Isto deve-se, em grande parte, a baixa fertilidade natural dos solos tanto em macro quanto em micronutrientes.

Alguns trabalhos tem demonstrado respostas positivas do uso de fertilizantes na recuperação produtiva de soqueiras, sobretudo em áreas de expansão sob solos de baixa fertilidade natural ou ainda em áreas tradicionais de cultivo com evidente esgotamento dos recursos naturais. Todavia, o uso de fósforo e micronutrientes em soqueira não é uma prática totalmente aceita e difundida no setor sucroalcooleiro. Isto deve-se, em parte, pela falta de resultados mais conclusivos a respeito da real eficiência agrônômica da utilização destas práticas de adubação.

2. Hipóteses

O presente trabalho fundamenta-se na verificação da seguinte hipótese: A produtividade e a qualidade tecnológica da 3ª soqueira de cana-de-açúcar são influenciadas tanto pela utilização de fósforo, assim como por diferentes fontes deste elemento. E mais, a produtividade e a qualidade tecnológica da 3ª soqueira de cana-de-açúcar são influenciadas pela aplicação de micronutrientes via foliar, nas doses e fontes destes elementos testadas.

3. Objetivos

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência de fertilizantes fosfatados aplicados no solo e micronutrientes veiculados via foliar na produtividade e qualidade tecnológicas na 3ª soqueira de cana-de-açúcar.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Importância social e econômica da cana-de-açúcar.

A cana-de-açúcar representa uma das principais culturas de escala do Brasil cuja cadeia produtiva gera milhões de postos de trabalho, desenvolve novas tecnologias e produz os mais variados produtos, desde o tradicional açúcar e álcool, passando por álcoolquímicos, polímeros para uso medicinal, bioenergia até a venda de créditos de carbono.

O Brasil destaca-se no cenário mundial como o maior produtor de cana-de-açúcar, fechando a safra 2012/13 com mais de 9 milhões de hectares plantados, formando juntamente com a soja e o milho as culturas com maior participação em área cultivada do país (Figura 1).

Figura 1. Comparativo de áreas entre as principais Culturas agrícolas do Brasil na safra 2013. (Fonte: IBGE, 2013).

Um dos fatores mais importantes para a expansão da cultura canavieira no país foi a mudança ao longo das últimas décadas no perfil da frota nacional de veículos automotores. Em 2003, a produção de automóveis bicompostíveis representava apenas 2,7% do total de unidades produzidas no Brasil; Em 2012, esse valor aumentou 88,9%, enquanto que os carros movidos à gasolina representaram 11,1% da produção (Figura 2).

Figura 2. Produção brasileira de veículos automotores. (Fonte: Adaptado de ANFAVEA, 2013).

No Brasil as áreas de produção de cana-de-açúcar estão concentradas na regiões Centro-Sul, formada pelo Sudeste, Centro-Oeste e Sul, que juntas produzem mais de 90% da safra nacional. O Estado de São Paulo é o maior produtor e foi responsável por 55% de toda cana-de-açúcar produzida no Brasil durante a safra 2012/13 (CONAB, 2013) (Figura 3).

Figura 3 Setor Sucroalcooleiro safra 2012/13 nas principais regiões produtoras do Brasil (a) Área Plantada. (b) Produção. (c) Produtividade. (d) Principais estados produtores de cana-de-açúcar na região Sudeste. (Fonte: Adaptado de Conab, 2013).

Dados da CONAB (2013) mostram que nos últimos anos, a produtividade média dos canaviais brasileiros vem diminuindo (Figura 4).

Figura 4. Produtividade média da cana-de-açúcar no Brasil. Fonte: Adaptado de Conab, 2013).

A diminuição da produtividade é reflexo, principalmente, dos menores investimentos em nutrição mineral. Isso ocorre porque a cada ciclo de cultivo, a produtividade média do canavial se reduz em relação à produção obtida no primeiro corte e assim sucessivamente ao longo dos ciclos. Isso ocorre como consequência natural do elevado gasto energético necessário para cada rebrota do canavial e do esgotamento dos recursos minerais do solo.

Entretanto, solos com maior fertilidade natural ou adubados suportam um número maior de cortes até a reforma do canavial, de maneira que a produtividade ao longo dos anos se mantém econômica (Rossetto *et al.*, 2008).

Dados obtidos por Orlando filho *et al* (1993) mostraram que a redução da produtividade da cana-de-açúcar ao longo de 3 ciclos de corte é menos acentuada nas soqueiras que receberam adubação (Figura 5).

Figura 5. Variação na produtividade da variedade de cana-de-açúcar SP 70-1143 em 4 anos de cultivo, nos tratamentos adubados e não adubados. (a) Produtividade média da cana planta, 1ª, 2ª e 3ª socas. (b) Redução da produtividade média para cada ciclo de cultivo dentro dos tratamentos. Fonte: Adaptado de Orlando Filho *et al.* 1993.

Todavia, a utilização de fertilizantes na cultura da cana-de-açúcar tem exigido um refinamento cada vez maior das técnicas de recomendação em função da elevada participação deste insumo nos custos de produção.

Dados do Agrianual (2012) mostraram que os fertilizantes representaram mais de 34% dos custos de produção na cana-planta e 64% nos custos da cana-soca (Figura 6).

Figura 6. Componentes do Custo de produção da cana-de-açúcar safra 2011/12. a) Cana-planta b) Cana-soca (Fonte: Elaborado a partir de Agrianual, 2012).

Embora tenha participação relativamente elevada, Silva (2006) mostrou que os custos de produção da cana-de-açúcar diminuem à medida que se eleva a produtividade, melhora-se a qualidade e aumenta-se a longevidade do canavial (nº de cortes até a reforma). Assim, para uma produtividade média de 65 t ha⁻¹ de colmos, o custo final foi de R\$ 48,16 t⁻¹ de cana-de-açúcar produzida; já para uma produtividade de 105 t ha⁻¹, os gastos foram de R\$ 35,56 t⁻¹, ou seja, uma redução de 26% (Figura 7). Os custos também são diluídos à medida que a longevidade do canavial aumenta, pois a maior parte dos gastos são gerados no início, durante a implantação da lavoura. Quando foram feitos três cortes comerciais, o custo foi de R\$ 44,34 t⁻¹ de cana produzida, enquanto que para oito cortes, o custo foi de R\$ 38,15 t⁻¹ de cana.

Figura 7. Redução dos custos de produção em função do aumento da produtividade da cana-de-açúcar. (Fonte: Silva, 2006)

Ainda de acordo com o autor a partir da safra 1998/1999, o preço da cana-de-açúcar passou a ser formado em função da qualidade da matéria-prima, expressa em ATR (açúcares totais recuperáveis) por tonelada de colmos industrializáveis. Com isso, o aumento de 125 para 165 Kg ATR t⁻¹ de colmos processados, fruto de melhorias no processo produtivo como um todo, proporcionou redução quase proporcional dos custos (cerca de 30%), passando de 0,32 para 0,24 R\$ kg⁻¹ de ATR produzido.

2.2 Extração, exportação e reciclagem de macro e micronutrientes na cultura da cana-de-açúcar.

Dada a importância da nutrição mineral como fator de produção da cana-de-açúcar, estudos a respeito da extração, remoção e ciclagem de nutrientes pela cultura da cana-de-açúcar assim como dos fatores que interferem nesses processos (clima, solo, material genético, ciclo de corte, tratos culturais etc.), constituem a base para o entendimento e adoção de estratégias para o manejo da aplicação de fertilizantes na cultura. Tasso Junior *et al.*, (2007) estudaram a extração de macronutrientes em cinco variedades de cana-de-açúcar e mostraram que para um mesmo ambiente de produção, há grandes variações nas quantidades de nutrientes extraídos em função do material genético utilizado (Tabela 1).

Tabela 1. Produtividade média e teores de macronutrientes extraídos pelos colmos de cinco variedades de cana-de-açúcar (Cana-planta). Fonte: adaptado de Tasso Junior *et al.* (2007).

Variedade	Produtividade	Extração de nutrientes					
	Mg ha ⁻¹	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	SO ₄
		Kg t ⁻¹ de colmos					
IA 91-2195	132,2 ^b	0,90 ^a	0,18 ^b	1,37 ^c	0,24 ^c	0,29 ^c	0,27 ^b
SP 89-1115	111,1 ^d	0,81 ^b	0,19 ^a	1,33 ^c	0,33 ^b	0,33 ^b	0,40 ^a
RB 855453	165,5 ^a	0,91 ^a	0,15 ^c	1,73 ^b	0,32 ^b	0,45 ^a	0,46 ^a
RB 855156	124,7 ^c	0,51 ^c	0,20 ^a	2,14 ^a	0,20 ^c	0,40 ^a	0,42 ^a
RB 835486	138,6 ^b	0,45 ^c	0,13 ^d	1,21 ^d	0,42 ^a	0,31 ^b	0,18 ^c
CV (%)	63,67	8,66	33,22	24,37	25,09	25,39	11,10

Médias em uma mesma coluna e seguidas por uma mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade segundo teste de Tukey. THC:

Oliveira *et al.* (2010) quantificaram a extração e a exportação de nitrogênio, fósforo, cálcio e magnésio em 11 variedades de cana-de-açúcar e verificaram diferenças significativas nesses valores em função das variedades de cana-de-açúcar (Tabela 2).

Tabela 2. Extração e exportação de nitrogênio, fósforo e potássio em 11 variedades de cana-de-açúcar. (Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.*; 2010)

Variedade	Prod.	N		P		K		Ca		Mg	
		Ext.	Exp.	Ext.	Exp.	Ext.	Exp.	Ext.	Exp.	Ext.	Exp.
		Mg ha ⁻¹		Kg ha ⁻¹							
RB 92 579	256 ^a	260 ^a	167 ^a	25 ^a	16 ^a	212 ^b	97 ^b	236 ^b	201 ^b	122 ^a	99 ^a
SP 81-3250	232 ^a	241 ^b	168 ^a	28 ^a	15 ^a	404 ^a	235 ^a	193 ^b	160 ^b	99 ^b	75 ^b
RB 86 7515	186 ^b	237 ^b	135 ^b	19 ^b	9 ^b	264 ^b	160 ^b	264 ^a	230 ^a	90 ^c	70 ^b
SP 78-4764	179 ^b	201 ^c	122 ^c	20 ^b	15 ^a	274 ^b	164 ^b	210 ^b	173 ^b	82 ^c	62 ^b
RB 863129	181 ^b	196 ^c	80 ^d	29 ^a	18 ^a	299 ^b	160 ^b	231 ^b	193 ^b	82 ^c	66 ^b
RB 943365	193 ^b	177 ^d	85 ^d	24 ^a	9 ^a	363 ^a	178 ^b	186 ^b	149 ^b	96 ^b	68 ^b
RB 763710	212 ^a	170 ^d	90 ^d	27 ^a	17 ^a	362 ^a	219 ^a	194 ^b	160 ^b	85 ^c	63 ^b
RB 72454	192 ^b	153 ^e	27 ^e	23 ^b	12 ^b	345 ^a	165 ^b	209 ^b	174 ^b	87 ^b	61 ^b
SP 79-1011	155 ^b	142 ^e	85 ^d	25 ^a	14 ^a	400 ^a	256 ^a	225 ^b	168 ^b	55 ^d	40 ^b
RB 872552	176 ^b	96 ^f	18 ^f	28 ^a	18 ^a	328 ^a	206 ^a	238 ^b	180 ^b	83 ^c	64 ^b
RB 813804	177 ^b	94 ^f	36 ^e	30 ^a	19 ^a	326 ^a	232 ^a	305 ^a	266 ^a	74 ^c	57 ^b
Média	195	179	92	25	15	325	188	226	187	87	66
CV (%)	12,5	7,2	9,6	14	17,4	14,8	24	13,2	15,7	11,5	14

Medias em uma mesma coluna e seguidas por uma mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Nota: Ext. = Extração; Exp. = Exportação.

Gomes (2003) comparou a extração de nitrogênio, fósforo e potássio em 12 variedades de cana-de-açúcar e concluiu que, além das características genéticas (variedade), o ciclo de cultivo e tipo de solo são fatores determinantes na produção e na extração desses nutrientes pela cultura (Figura 8).

Figura 8. Produção de colmos e concentração média de macronutrientes de 12 variedades de cana-de-açúcar, em três ciclos de produção e dois tipos de solos (a) Produção (b) Nitrogênio (c) Fósforo (d) Potássio. LV: Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico Psamítico; NV: Nitossolo Vermelho Eutroférico Latossólico. Fonte: Adaptado de Gomes (2003).

Além dos macronutrientes a cana-de-açúcar também extrai quantidade considerável de micronutrientes conforme, dados obtidos por Orlando Filho (1993) (

Tabela 3). Considerando-se os dados apresentados, observa-se que a cana-de-açúcar promove grande retirada e exportação de macro e micronutrientes do solo e comparativamente, muito superior ao potencial de reciclagem desses elementos no campo.

Tabela 3. Extração de micronutrientes pela cultura da cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado de Orlando Filho (1993).

Micronutrientes	Cana-planta			Cana-soca		
	Colmos	Folhas	C+F	Colmos	Folhas	C+F
	g 100 t ⁻¹ de colmos					
B	195	116	311	102	55	157
Cu	194	93	287	273	116	389
Fe	2378	6512	8890	1207	4538	5745
Mn	1188	1651	2838	916	1189	2105
Zn	440	282	722	298	163	561

Dados de Franco *et al.*, (2008) mostraram que as taxas de exportação de macronutrientes superam muito o potencial de reciclagem desses elementos para o ciclo de cultivo subsequente (Tabela 4). Além disso, se fossem contabilizados também os diversos mecanismos envolvidos na dinâmica desses nutrientes no solo (p.ex. fixação do P, volatilização do N etc.) certamente os valores reais de disponibilidade dos nutrientes seriam menores. Esse fato evidencia a necessidade de uma reposição adequada dos nutrientes ao longo dos ciclos de cultivo, levando-se em conta o material genético (variedade), ambiente de produção (clima, solo etc.), características das fontes de macro e micronutrientes e o sistema de colheita.

Tabela 4. Acúmulo de macronutrientes pela cana-planta para a produção de 100 t de colmos industrializáveis (Adaptado de Franco *et al.*, 2008).

Média	Exportação		Reciclagem	
	Colmos	Folhas secas	Ponteiros	Total
	kg 100 TCI			
N	60	21	28	21
P ₂ O ₅	16	3	7	3
K ₂ O	250	39	66	39
CaO	30	27	11	27
MgO	19	12	5	12
S	15	4	3	4
Média	g 100 TCI			
B	74	43	18	61
Cu	38	14	11	25
Fe	1745	2619	908	3527
Mn	565	709	209	918
Zn	119	47	54	101

Notas: TCI: Toneladas de colmos industrializáveis; Média para a variedade SP 81 3250 em duas localidades.

2.3 Resposta da soqueira de cana-de-açúcar a aplicação de fósforo.

No pH (CaCl_2) que comumente ocorre nos solos cultivados, o fósforo é absorvido predominantemente na forma iônica H_2PO_4^- . A medida que se acumula nas células corticais da raiz, é transferido para dentro dela até o xilema, via simplasto. No interior das células, o P não para de se movimentar quando, no transporte a longa distância, chega à folha ou às outras regiões de crescimento, pois é, juntamente com o N, o elemento mais prontamente redistribuído. O caminho mais importante para sua entrada em combinações orgânicas é através da esterificação de um grupo OH da pentose ligada à adenina (base nitrogenada) para formar o monofosfato de adenosina (AMP), e depois o ADP e o ATP (MALAVOLTA *et al.*, 1997).

O fósforo é absorvido em pequenas quantidades pela cana-de-açúcar, se comparado com o nitrogênio e o potássio, no entanto exerce função chave no metabolismo desta planta, particularmente em formação de proteínas, processo de divisão celular, fotossíntese, armazenamento de energia, desdobramento de açúcares, respiração e fornecimento de energia a partir do ATP e formação de sacarose. Durante o processo metabólico, o composto glucose-1-fosfato junta-se com a frutose para formar a sacarose, matéria prima para a produção de açúcar e álcool (KORNDÖRFER, 2004). Entretanto, dada à complexidade dos fatores que envolvem a disponibilidade do fósforo para as plantas associado aos custos de aquisição dos fertilizantes fosfatados, diversas pesquisas envolvendo doses, fontes e modos de aplicação do fósforo, são desenvolvidas no sentido de melhor compreender as inter-relações fósforo-solo-planta e com isso, ajustar as necessidades da planta às práticas de adubação.

Novais & Smyth (1999) trazem uma vasta revisão de seus trabalhos e de outros autores a respeito das complexas relações do fósforo nas condições de clima e solos tropicais. De acordo com os autores, o fósforo pode ser dividido

em oito compartimentos dentro do sistema solo-planta, cuja interdependência e equilíbrio entre eles, determinam a disponibilidade de fósforo para a planta (Figura 9). Alguns desses compartimentos como o P-Fonte mineral, P-Solução junto à raiz, P- Solução do solo, P-Lábil e P-Não lábil são de especial interesse em experimentos envolvendo fontes de fósforo por permitir, mediante o conhecimento dos fenômenos envolvidos em cada um deles, compreender como as fontes minerais (adubos fosfatados) irão se comportar no solo.

Figura 9. Formas de fósforo no sistema solo-planta (interdependências e equilíbrios). Observações: I= Intensidade; Q= Quantidade; Q/I= Fator capacidade de fósforo. Fonte: Adaptado de Novais & Smyth (1999)

De acordo com os autores, o P-Solução é definido como sendo a concentração de P na solução do solo. Solos pobres em P apresentam baixos valores de “P-disponível” por um extrator (medida mais próxima do P-lábil ou P-trocável), o que resulta em concentrações de P-solução próximas de zero. O aumento temporário do P-solução por fontes minerais (fertilizantes) ocasionará um desequilíbrio em relação ao estado anterior, aumentando tanto a adsorção e a precipitação (aumento do compartimento P-lábil) quanto à difusão, isto é, o transporte de P em direção as raízes.

A medida que o P-Solução vai sendo “consumido” (adsorção, absorção, retrogradação, imobilização ou pelas perdas), o estoque de P-lábil irá recompor o P-solução, pelo menos parcialmente, num novo equilíbrio. Assim, o P-Lábil pode ser chamado de “Fator Quantidade” (Q) e indicará o tamanho do estoque de P que irá repor o P-Solução. O aumento do P-Solução ou “Fator Intensidade” (I) implica em aumento do P-Lábil, e vice-versa. No entanto, os solos diferem quanto à sensibilidade do P-Lábil a alterações do P-Solução. Esta resistência do solo a mudar o P-Lábil como consequência de mudanças no P-Solução e vice-versa, é denominada Fator Capacidade de P do solo (FCP) ou Poder Tampão de P do solo.

Solos com maior FCP (solos mais intemperizados e argilosos) mantêm o valor de P-Solução mais constante (I) quando submetidos à adição ou à retirada de P. Assim, o FCP é definido como a relação entre “Fator Quantidade” (Q) e o “Fator Intensidade” (I). Para um mesmo grupo de solos, todos com a mesma quantidade de P em solução, os mais argilosos terão maiores valores de Q do que os solos com textura média e arenosa. Isso implica em dizer que solos com alta relação Q/I (argilosos) deverão para um mesmo valor de Q, manter menores valores de I, embora mais constantes (tamponados) que os solos com menores relações Q/I (textura média e arenosa).

Os conceitos propostos por Novais & Smyth (1999) servem como fundamentação para entender, como fontes de fósforo com diferentes solubilidades e/ou a aplicação de diferentes doses P em um mesmo solo e/ou em solos diferentes irão reagir e disponibilizar P para a planta.

Valderrama *et al.* (2010) estudaram a resposta de 2 fontes e 4 doses de fósforo (fosfato monoamônico – MAP e fosfato polimerizado – Kimcoat P) na cultura do milho sob um Latossolo Vermelho Distroférico com 580 g kg⁻¹ de argila (Figura10). Os autores observaram que para todas as doses, o fosfato polimerizado proporcionou maior produtividade de grãos, quando comparado ao fosfato monoamônico. A maior eficiência do P na forma polimerizada é atribuída a estrutura dos grânulos do fertilizante revestidos por polímeros. Estes ao absorverem água do solo solubilizam o fósforo no interior das cápsulas, liberando-os gradativamente pela estrutura porosa na região

radicular. Com isso, houve redução do contato direto do P com os colóides do solo minimizando os processos de adsorção e fixação do fósforo.

Figura10. Produtividade de grãos do híbrido de milho Bt 30F53H em função das doses e fontes de fósforo convencional e polimerizado. (Fonte: Adaptado de Valderrama et al., 2010)

Observa-se na Figura10 que até a dose de 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ ambas as fontes tem o mesmo comportamento, ou seja, proporcionam produções semelhantes. Pode-se imaginar que a solubilização do P (“Fator Intensidade”) em ambas as fontes tiveram a mesma eficiência em manter o P-Solução em níveis adequados para a planta. Porém, para as maiores doses, a elevada solubilidade do MAP pode ter aumentado o P-Solução deslocando o equilíbrio no sentido de maiores taxas de adsorção e fixação. No caso o P polimerizado, a liberação mais lenta do P contido nos grânulos proporcionou um P-Solução menor, porém mais constante ao longo do ciclo da cultura. Em outras palavras, o fosfato liberado de forma mais lenta atua de forma semelhante ao “Fator Quantidade” do solo, representando um “estoque” de P para a solução do solo.

Considerando-se um experimento com duas fontes de P, ambas solúveis, aplicadas em dose única e sobre um mesmo tipo de solo, qual ou quais mecanismos apresentados na Figura10 poderiam explicar a eficiência diferencial entre duas fontes? Partindo da informação que ambas as fontes são solúveis, ocorre a passagem do P-Fonte mineral para P-solução. A partir desse

ponto, abre-se a possibilidade de cinco “caminhos” que poderiam explicar a eficiência diferencial das fontes, ou seja, o comportamento de cada uma delas frente aos fenômenos de adsorção, imobilização, retrogradação, perdas e difusão.

Segundo Novais & Smyth (1999), o fluxo difusivo de fósforo no solo é fortemente influenciado pela textura, teor de umidade, compactação do solo e pela fonte do fósforo. Do ponto de vista da fonte de P, uma parte da difusão dos elementos no solo pode ser explicada pela mobilidade do íon acompanhante. Dessa forma, por exemplo, a utilização de gesso (CaSO_4) como condicionador de perfis de solo é devido à maior mobilidade do ânion SO_4^{2-} , comparativamente ao H_2PO_4^- . Embora o CaSO_4 seja menos solúvel que o $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ (superfosfato triplo, por exemplo), a maior adsorção do fosfato pelo solo e sua consequente menor mobilidade em relação à do sulfato, faz com que a mobilidade do Ca na forma de superfosfato triplo seja bem menor que na forma de gesso. Semelhantemente, o Ca, na forma de CaCl_2 ou de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, será muito mais móvel no solo que na forma de gesso. Portanto, há estreita relação entre a mobilidade do Ca no perfil do solo e a mobilidade do ânion que o acompanha.

Por similaridade, o princípio da mobilidade do P no solo em função do cátion acompanhante foi avaliado por Costa *et al.* (2009). Os autores avaliaram o efeito de fontes de fósforo, com níveis de umidade sobre o fluxo difusivo deste elemento em amostras de solos de Alagoas. Foram utilizadas como fontes de P os fosfatos de potássio (KH_2PO_4), de cálcio [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$] e de amônio ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$). Os solos avaliados foram o Latossolo amarelo coeso (25% de argila– LAc_1), Latossolo amarelo coeso (35% de argila– LAc_2), Argissolo acinzentado (27% de argila– Pac) e Neossolo Flúvico (10% de argila– RU), ambos mantidos com a umidade em 40 e 80% da capacidade de campo (CC).

Os resultados demonstraram que o fluxo difusivo de P variou com a fonte do elemento utilizada e com a umidade nos quatro solos estudados (Figura 11a). De modo geral, o fluxo difusivo foi maior, independente da fonte, no solo mais arenoso (RU). O menor fluxo difusivo no solo mais argiloso (LAc_2), pode ser explicado, em parte, pela sua maior capacidade máxima de adsorção de

fósforo (Figura 11b). Esse fato é atribuído à relação direta entre adsorção de fósforo e teor de argila dos solos; neste caso, os solos mais argilosos e com maiores teores de óxidos de ferro e alumínio apresentam menor fluxo difusivo de P.

Em relação às fontes, o fosfato monoamônico ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) foi o que, em relação às demais, proporcionou maior fluxo difusivo de fósforo seguida do fosfato de potássio (KH_2PO_4). O menor fluxo foi obtido com o fosfato monocálcico $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ (Figura 11a). Assim esses resultados permitem afirmar que o cátion acompanhante do ânion interferiu no processo difusivo de fósforo no solo. Segundo os autores, os fertilizantes fosfatados apresentam reações distintas quando aplicados ao solo devido a sua composição. A solução saturada que se produz na região de aplicação do fertilizante pode ter característica ácida ou alcalina, conforme o íon acompanhante do fosfato, gerando variações na carga e no potencial elétrico das superfícies de reação. Com isto qualquer alteração na força iônica da solução do solo, seja aumentando-a ou reduzindo-a, interfere na disponibilidade do íon fosfato devido às mudanças geradas nas superfícies de reação, favorecendo ou não a seletividade dessas superfícies pelo íon em questão.

Figura 11. (a) Fluxo difusivo de P em função de diferentes fontes, solos e unidades. (b) Capacidade máxima de adsorção de fósforo (CMAP). Nota: Barras de cor cinza clara e cinza escura indicam 80 e 40% da unidade na capacidade de campo. (Fonte: Adaptado de Costa et al., 2009)

O potencial elétrico da solução do solo assim como a difusão de P em função de diferentes fontes foi testada por Villani *et al.* (1993). Para tanto, os autores utilizaram amostras de três tipos de solos coletadas na camada de 0-20 cm de profundidade as quais foram tratadas com uma dose única de 500 μg de P cm^{-3} de solo. Os solos foram incubados e mantidos a 85% da capacidade de campo. A difusão do P nos solos foi avaliada pela técnica do papel aniônico, a qual considerou o P-adsorvido em uma área conhecida do aniônico, 15 dias após a incubação do solo. Observou-se um fluxo difusivo menor para o $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ que para as demais fontes, principalmente no Latossolo Vermelho Escuro (LE) e no Latossolo Vermelho Amarelo (LV), solos mais argilosos. A difusão para o $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ foi 3,4 vezes maior que a obtida com o $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ no solo LE; aumentando para 4,5 vezes no solo LV. Já no Latossolo Vermelho Amarelo de textura média (LVM), as fontes tiveram comportamento similar e muito superior aos solos mais argilosos. Em relação

às fontes amoniacais, observou-se maior fluxo difusivo com o $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ em comparação ao $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, ficando em torno de 16 e 40% superior nos solos LE e LV, respectivamente. Comparando-se a média geral das fontes em relação ao controle para cada tipo de solo, observou-se que no LVm o fluxo difusivo de P para as fontes foi 4625 vezes maior que o fluxo de P no controle; já para o LE e o LV, o fluxo difusivo aumentou 286 e 1213 vezes, respectivamente, mostrando o potencial da fertilização de solos mais arenosos em condições tropicais. De acordo com os autores, a diferença entre as fontes de P está, aparentemente, ligada à mobilidade diferencial, no solo, do cátion presente na fonte de P (Figura 12). Os autores observaram também aumento de aproximadamente duas unidades de pH em relação ao controle, com a aplicação de $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ou K_2HPO_4 , o que favorece o aparecimento de cargas negativas em um possível decréscimo na afinidade solo-fosfato. Por outro lado, a forma HPO_4^{2-} apresenta maior afinidade com o solo que a forma monovalente H_2PO_4^- .

Figura 12. Efeito de fontes de fósforo sobre o fluxo difusivo desse elemento em amostras de solo com diferentes teores de argila (Fonte: Adaptado de Villani et al., 1993).

Além do fenômeno de difusão, outros fatores contribuem para o maior ou menor aproveitamento do fósforo aplicado ao solo. Dessa forma, seguindo a linha de raciocínio anterior, o ânion acompanhante do P (variável em função da fonte utilizada) influencia tanto as taxas de difusão quanto de adsorção do fósforo às partículas do solo, modulando em grande parte sua eficiência agrônômica.

2.4 Produção de fertilizantes fosfatados

No Brasil, a matéria prima básica para a produção de fertilizantes fosfatados são os minerais de apatita, representados pela fórmula geral: $M_{10}(YO_4)_6(X_2)$, em que $M = Ca^{2+}$, com possíveis substituições por Na^+ , Sr^{+} , Mg^{2+} , Mn^{2+} , Sc^{2+} ; $Y = P$, que pode ser substituído por CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , CrO_4^{2-} , VO_4^{3-} ; $X = F^-$, OH^- , Cl^- (Dutra e Formoso, 1995). De acordo com Lápido-Loureiro e Melamed (2009), devido ao componente fósforo, a principal aplicação da apatita é na fabricação de ácido fosfórico para a produção de fertilizantes, tanto em escala mundial quanto nacional, consumindo cerca de 90% da sua produção. Dos fertilizantes fosfatados, 90% são obtidos quimicamente pelas vias sulfúrica, nítrica e clorídrica; 2% via térmica e 6% são aplicados sob a forma natural. Ainda, segundo os autores, no Brasil o processo para a obtenção de ácido fosfórico a partir de concentrados apatíticos é feito exclusivamente via rota sulfúrica (Figura 13).

Figura 13. Via de obtenção dos principais adubos fosfatados utilizados no Brasil superfosfato triplo Fonte: Adaptado de Lápido-Loureiro e Melamed (2009).

Os fertilizantes fosfatados obtidos no processo podem ser aplicados diretamente nas culturas ou utilizados com fonte de P em misturas de grânulos (NPK). No caso do superfosfato triplo, predomina como ânion acompanhante do P o cálcio ($Ca(H_2PO_4)_2$).

Outra forma de obtenção de fertilizantes fosfatados é o ataque da rocha fosfática com ácido nítrico. Atualmente, a empresa Norueguesa YARA é a principal empresa produtora de fertilizantes fosfatados que utiliza a rota nítrica como parte do processo de produção de fertilizantes; neste caso, mediante um complexo sistema de produção e granulagem os três macronutrientes básicos (NPK) fundem-se em um mesmo grânulo formando os chamados fertilizantes complexos (Figura 14). Segundo dados da empresa, a composição final do fertilizante apresenta de 70 a 80% de P na forma de ortofosfatos e 20 a 30% na forma de polifosfatos (polifosfatos de amônio, principalmente).

Figura 14. Rota de produção dos fertilizantes YaraMila (elaborado pelo autor a partir de dados da YARA).

Menos populares no País, os fertilizantes contendo polifosfatos vem ganhando popularidade em função de respostas positivas em diversas culturas no mundo. Segundo MacBeath et al. (2007a), na maior parte dos fertilizantes contendo polifosfatos, o fósforo predomina nas formas iônicas de ortofosfatos (30 a 40%) e pirofosfato (50 a 55%), sendo o restante constituído por

tripolifosfatos e outras formas de P mais condensadas. As diferentes formas do P presentes nos polifosfatos fazem com que haja solubilidade diferencial desses compostos aplicados ao solo, afetando diretamente o grau de adsorção pelos constituintes do solo e a disponibilidade para as plantas (Dick & Tabatabai, 1987). De acordo com Neimeyer (1999), os polifosfatos (Poli-P) ou fosfatos condensados, são compostos por cadeias em que cada P está ligado ao seu vizinho através de átomos de oxigênio, formando estruturas lineares, cíclicas ou ramificadas. Dessa forma, fertilizantes contendo polifosfatos tendem a ser menos reativos em solos do que os ortofosfatos, em função de sua estrutura em cadeia ou anel, o que pode aumentar sua disponibilidade no solo para as plantas (Philen e Lehr, 1967; Engelstad e Terman, 1980).

Esse fato é particularmente importante no Brasil onde predominam solos ricos em óxidos de ferro e alumínio. Segundo Novais e Smyth (1999), os íons Al^{3+} e Fe^{2+} presente na solução do solo reagem com os íons $H_2PO_4^-$ provenientes da solubilização dos adubos fosfatos adicionadas ao solo, reduzindo sua disponibilidade para as plantas (equação 1).

2.3 Resposta da soqueira de cana-de-açúcar a adubação fosfatada

A maioria dos experimentos usando fósforo em soqueira não tem apresentado resultados conclusivos. Um dos fatores que podem estar interferindo nessa resposta é o pH do solo, uma vez que a medida que os cortes vão avançando, a saturação por bases tende a diminuir e, em consequência, o pH fica mais ácido, condição para baixa eficiência de absorção de fósforo (DEMATTE, 2005). Morelli *et al.* (1987) demonstraram que a fertilidade do solo, expressa pela saturação por bases, cai ao longo dos ciclos de corte a patamares próximos ao estado inicial após o quinto corte (Figura 15). A queda na saturação por bases e em consequência do pH ocasionou, segundo os autores, redução na disponibilidade de nutrientes como P, K e N, além da própria deficiência de Ca e Mg.

Figura 15. Redução da saturação por bases do solo ao longo de 5 ciclos de corte da cana-de-açúcar. Fonte: adaptado de Morelli *et al.* (1987).

Entretanto, em diversos trabalhos ficou demonstrado que a recuperação química do solo é uma prática viável para a recuperação da produtividade das soqueiras. Lorenzetti (1992) estudou produtividade da 5ª soqueira de cana-de-açúcar, variedade NA 56-79, e as características químicas do solo 12 meses após a aplicação de NK, calcário e gesso. Os resultados apontaram que a aplicação conjunta do calcário foi o tratamento que promoveu melhor balanço de cátions trocáveis (Ca e Mg), distribuição da saturação por bases ao longo do perfil do solo e ganho produtivo de mais de 20 toneladas em relação ao controle (Figura 16a). Embora não seja usual realizar práticas corretivas como a calagem e a gessagem em canaviais em final de ciclo produtivo, os resultados demonstraram que recuperação das condições químicas do solo é uma prática tecnicamente viável, podendo ser adequada às fases intermediárias entre o plantio e a reforma do canavial. Espera-se que a melhoria dessas condições (elevação do pH e das bases trocáveis) favoreçam também o aproveitamento do fósforo eventualmente utilizado nas soqueiras (Figura 16b).

Figura 16. Resultados da análise química do solo e produtividade da 5ª soca de cana-de-açúcar após a aplicação dos tratamentos. Observações: Todos os tratamentos receberam como base 100-00-120 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O. Fonte: Adaptado de Lorenzetti *et al.* (1992).

Rossetto *et al.* (2002) estudaram a resposta da cana-planta (variedade RB 85 5117) e das soqueiras (1ª e 2ª soca) a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ em área total e no sulco de plantio de duas fontes de fósforo (superfosfato triplo e fosfato natural reativo) em um Neossolo Quartzarênico. Os resultados demonstraram que para a cana-planta, a utilização de superfosfato triplo (SPT) em área total proporcionou produtividade maior que os demais tratamentos e cerca de 36% superior em relação ao controle sem P (Figura 17a). De acordo com os autores, o melhor desempenho do SPT em área total está associado a maior solubilidade da fonte em relação às demais e as menores taxas de fixação de fósforo pelo solo da área experimental. Na segunda soca, não houve resposta significativa dos tratamentos e as produtividades obtidas foram baixas. Esse fato foi também atribuído a forte seca ocorrida na região Centro-Sul do Brasil durante aquele ano agrícola. Já na segunda soqueira, novamente a produtividade foi recuperada e mais uma vez os resultados obtidos em

resposta aos tratamentos para a cana planta foram repetidos na soqueira. Verificou-se que os fosfatos tiveram bom efeito residual, elevando a produtividade em relação aos tratamentos sem fósforo (Figura 17b).

Figura 17. Produtividade da cana-de-açúcar em função das fontes e da localização de aplicação do fósforo. (a) Cana-Planta (b) Cana-soca. Médias no mesmo ciclo de produção e seguidas por uma mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade segundo Tukey. FNR: Fossato natural reativo; SPT: Superfossato triplo; AT: Área Total; S: Sulco de Plantio. Fonte: Adaptado de Rossetto *et al.* (2002).

Resende *et al.* (2003) verificaram a resposta à aplicação de duas fontes e três doses de fósforo em uma soqueira de terceiro corte (variedade SP 79-1010) cultivada sobre um Latossolo vermelho-amarelo de textura argilosa e concluíram que aplicação de fósforo, independente da fonte utilizada, promoveu ganhos de produtividade quando comparado ao controle (Figura 18).

Figura 18. Resposta da variedade SP79-1010 (3º corte) a aplicação de duas fontes de fósforo. Fonte: Adaptado de Resende *et al.* (2003).

Em relação a qualidade da matéria prima alguns trabalhos tem demonstrado que a nutrição adequada afeta positivamente os parâmetros qualitativos da cana-de-açúcar. Sousa e Korndörfer (2012) avaliaram o efeito residual da fosfatagem sobre a produtividade de colmos e as variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar durante três anos agrícolas. A produtividade da cana planta não foi influenciada pela aplicação dos diferentes fertilizantes fosfatados no 1º corte. O efeito da fosfatagem neste caso foi em parte mascarado devido à dose de fósforo aplicada no sulco de plantio (112 kg ha⁻¹ de P_2O_5) por ocasião da instalação do experimento. Já na 1ª e 2ª socas, as parcelas que receberam fosfatagem apresentaram maiores produtividades, independente da fonte de fósforo utilizada (Figura 19).

Figura 19. Efeito da aplicação de 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ de diferentes fertilizantes fosfatados aplicados no solo antes do plantio da cana-de-açúcar sobre a produtividade agrícola da cana-planta, soca e ressoca, variedade RB 867515. Médias em um mesmo ciclo de Cultivo e seguidas por uma mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade segundo teste de Tukey. (Fonte: adaptado de Sousa e Korndörfer, 2012). Nota: Colheita da cana: Cana-planta: 19 meses; Cana-soca: 6,5 meses; Ressoca: 12 meses. Safras: 2007; 2008 e 2009.

A aplicação de fertilizantes fosfatados no solo de cultivo da cana-de-açúcar não influenciou nas variáveis tecnológicas brix, fibra, pureza do caldo da cana-planta e soca (2º corte). Os autores verificaram diferenças apenas nos valores da pol do caldo (Pol % caldo) e da cana (Pol % cana) na 1ª soca. Para a ressoca (3º corte), a fosfatagem por ocasião do plantio não afetou o brix, pol do caldo, pol da cana, pureza do caldo e pureza da cana (

Tabela 5).

Tabela 5. Efeito residual da aplicação de fertilizantes fosfatados em solo cultivado com cana-de-açúcar sobre variáveis tecnológicas da cana-soca (2º corte) e ressorca (3º corte) (variedade RB 86 7515, Goianésia, GO- Safra 2008 e 2009). Fonte: Adaptado de Sousa e Korndörfer (2012).

Fertilizantes	Variáveis tecnológicas da cana-soca (2º corte - 6,5 meses)					
	Brix	Fibra	Pol Caldo	Pol Cana	Pureza Cana	Pureza Caldo
	%					
Testemunha	14,6	12,6	11,1 ^a	9,2 ^a	72,4	76,1
SPT	14,0	13,0	10,4 ^{ab}	8,5 ^{ab}	70,2	74,2
MAP	14,0	13,1	10,2 ^{ab}	8,4 ^b	68,9	73,1
F. Arad	14,2	12,5	10,4 ^{ab}	8,7 ^{ab}	70,0	73,5
F. Itafós	14,2	13,2	10,3 ^{ab}	8,5 ^{ab}	68,7	72,7
T. Yoorin	13,9	12,9	10,0 ^b	8,3 ^b	68,7	72,0
CV (%)	3,4	5,2	5,2	5,0	3,0	3,2
DMS	ns	ns	1,1	0,8	ns	ns
Fertilizantes	Variáveis tecnológicas da Ressorca (3º corte - 12 meses)					
	Brix	Fibra	Pol Caldo	Pol Cana	Pureza Cana	Pureza Caldo
	%					
Testemunha	18,0	-	15,2	11,8	74,3	84,4
SPT	17,6	-	15,1	11,7	73,4	86,0
MAP	17,6	-	15,0	11,5	73,8	84,9
F. Arad	17,3	-	14,7	11,5	73,6	84,9
F. Itafós	17,8	-	15,2	11,2	74,2	85,2
T. Yoorin	17,6	-	14,8	11,4	73,5	84,3
CV (%)	3,8	-	4,2	4,5	1,1	2,4
DMS	ns	-	ns	ns	ns	ns

Médias na mesma coluna e seguidas por uma mesma letra, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade segundo teste de Tukey. ^{ns}: Não significativo.

Os resultados desse experimento não demonstraram efeito da aplicação de fósforo e micronutrientes em soqueira sobre a qualidade tecnológica da cana. Entretanto como já descrito anteriormente, canaviais bem nutridos apresentam matéria prima de melhor qualidade mediante a evidente participação dos nutrientes no desenvolvimento fisiológico normal da cultura.

2.5 Resposta da cana-de-açúcar à aplicação de micronutrientes.

Nas últimas décadas, a produtividade agrícola da cana-de-açúcar obteve ganhos expressivos no país, graças à novas variedades, manejo mais adequado do solo, uso de resíduos industriais e aplicação racional de adubos e corretivos. Todavia, a média geral de 70 t ha⁻¹ ainda é baixa e poderá ser melhorada, uma vez que são várias as unidades de produção do País que apresentam produtividade próxima de 90 t ha⁻¹ numa média de 5 cortes (Orlando Filho *et al.*, 2001). Ainda, segundo os autores, um dos fatores que contribuiu para que a produtividade média não ultrapassasse 70 t ha⁻¹ foi que a expansão da cultura, a partir da década de 1970, ocorreu não apenas em áreas tradicionais de cultivo, mas também em áreas com solos de baixa fertilidade, nas quais, além da calagem, adubação NPK e rotação, os micronutrientes podem ser necessários. Além disso, a intensificação da produção, mesmo em áreas tradicionais, poderá levar ao consumo das reservas dos micronutrientes do solo, devido especialmente à generalização da prática do uso de fertilizantes concentrados, sem a reposição dos micronutrientes que são removidos pela cultura.

Vale *et al.* (2008), avaliaram mais de 890 amostras de solo e folhas coletadas em talhões produtores de cana-de-açúcar, nos ciclos de 1 a 6 corte, localizados nas regiões de Ribeirão Preto-SP e Catanduva-SP e compararam as concentrações de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe) manganês (Mn) e zinco (Zn) com os níveis críticos (NC) desses elementos no solo e nas folhas propostos por Orlando Filho *et al.*, (1994). Os resultados demonstraram que o B encontrava-se bastante deficiente nas áreas (95% nos solos e 85% nas plantas), seguido pelo Zn (67% nos solos e 73% nas plantas). Para o B, essa deficiência foi atribuída a não utilização do elemento nos programas de adubação associado à sua alta movimentação no perfil do solo, tendo sido provavelmente lixiviado do sistema. Já para o Zn, a deficiência foi atribuída tanto a não utilização dos nutrientes quanto a pobreza natural da maioria dos

solos. O Fe e Mn apresentaram poucas áreas com problemas, explicado pela possível alta concentração nos solos intemperizados da região, ricos em óxidos de Fe e Mn.

O Cu foi o elemento que apresentou maior variabilidade entre teores encontrados nos solos e folhas (33% da área abaixo do NC em solos e 67% nas plantas). Isso pode estar indicando, de acordo com os autores, falhas nos métodos de análise ou nas tabelas de interpretação apresentadas na literatura (Figura 20).

Figura 20. Relação entre os teores de B, Cu, Fe, Mn e Zn abaixo do nível crítico presentes em amostras de solo e nas plantas de cana-de-açúcar. (d) Zinco. Fonte. Adaptado de Vale *et al.*(2008).

A análise dos teores de B, Cu e Zn ao longo dos ciclos de corte permitiram visualizar o que ocorre com as concentrações desses nutrientes nas soqueiras de cana-de-açúcar. Para o B observou-se que a deficiência no solo é alta em todos os cortes, com tendência de aumento do primeiro para o último. Essa variação foi ainda maior quando se observaram os dados de análise foliar (Figura 21a). Essas diferenças são atribuídas à extração do B com o passar dos cortes (que é maior no início do ciclo da cultura devido à maior produtividade apresentada nos primeiros cortes) associada à lixiviação do elemento para camadas subsuperficiais. Para o elemento Cu observou-se grande discrepância entre os teores disponíveis no solo e a absorção pelas plantas, principalmente nos primeiros cortes (Figura 21b). Apenas 3% das áreas apresentaram deficiência de Cu, e essa deficiência foi aumentando com o aumento do número do corte, chegando a mais de 60% nas áreas com mais de 5 cortes. Isso poderia ser reflexo da liberação do cobre retido na matéria orgânica durante o preparo do solo para o plantio, e que depois foi novamente

sendo retido à medida que os cortes iam avançando e a matéria orgânica aumentando. Porém, a resposta pelas plantas indica que esse Cu não estaria disponível, já que os teores foliares de cobre sempre estiveram abaixo do NC em pelo menos 60% da área (exceto no corte cinco). Essa discrepância foi a responsável pela grande variabilidade entre as médias desse elemento em solos e folhas (Figura 21b). Esses dados podem indicar que o método de extração poderia estar superestimando o Cu no solo ou subestimando nas folhas, ou então nas tabelas de interpretação os níveis de Cu considerados não estão adequados, necessitando serem revistos. Em relação ao Zn, os autores observaram que nos primeiros cortes a falta de Zn é mais sentida pelas plantas, e que o número de amostras com teores mais baixos vai diminuindo com o aumento do número de cortes (Figura 21c). Essa deficiência de Zn no início pode estar relacionada com o uso de altas doses de calcário e fósforo para o plantio, prática comum no setor canavieiro, levando à baixa disponibilidade do elemento, que depois vai sendo gradativamente liberado à solução. A relação entre Zn no solo e planta foi bem correlacionada para o elemento.

Embora os dados apresentados por Vela *et al.* (2008) mostrarem que existe uma condição de deficiência de micronutriente em muitos canaviais, os resultados a respeito da resposta da cana-de-açúcar a aplicação de micronutrientes ainda não é conclusiva.

Figura 21. Porcentagem de amostras de solo e folhas com teores de micronutrientes abaixo do nível crítico, em função do número do corte realizado nas áreas. (a) B (b) Cu (c) Zn. Fonte: Adaptado de Vale *et al.* (2008).

Korndörfer *et al.* (1995) verificaram o efeito das doses 0, 30, 50 e 70 kg ha⁻¹ de fritas “Fritted Trace Elementos” aplicados no sulco de plantio, sobre a produção e qualidade tecnológica da cana-planta e cana-soca de três variedades de cana-de-açúcar, SP70-1143, SP79-1011 e RB 72-454, cultivadas em Neossolo Quartzarênico de baixa fertilidade natural da região de Ribeirão Preto. De acordo com os autores, o uso de micronutrientes afetou significativamente a produção de cana. No entanto, a análise de variância aplicada a produção de cana do primeiro mais o segundo corte mostrou uma interação positiva e significativa ao nível de 5% de probabilidade, isto é, o efeito dos micronutrientes sobre a produtividade foi variável de acordo com a variedade. Enquanto as variedades SP 79-1011 e RB 72-454 apresentaram

resposta positiva às doses de micronutrientes, não houve efeito destes sobre a variedade SP70-1143 considerada menos exigente quanto à fertilidade do solo (Tabela 6).

Tabela 6. Doses e respostas produtivas de três variedades de cana-de-açúcar submetidas à aplicação de micronutrientes no sulco de plantio. Fonte. Adaptado de Korndörfer *et al.* (1995).

Dosagem de fritas (kg há ⁻¹)	Cana-planta + Cana-soca		
	SP 70-1143	SP 79-1011	RB 72-454
	Produtividade média (t ha ⁻¹)		
0	182,5 ^a	167,0 ^b	172,9 ^c
30	178,8 ^a	190,7 ^b	176,3 ^{bc}
50	173,8 ^a	174,8 ^{ab}	196,8 ^{ab}
70	184,6 ^a	182,8 ^{ab}	201,6 ^a

Observações: Médias em uma mesma coluna e seguidas por uma mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade segundo teste de Tukey. **F.T.E:** 9,0% de Zn; 1,8% de B; 0,8% de Cobre; 3,0% de Fe; 2,0% de Mn e 0,1% de Mo).

Em relação às qualidades tecnológicas analisadas na cana-planta, houve diferenças significativas para alguns parâmetros tecnológicos. A variedade SP 79-1011 foi a que apresentou maior teor de brix (20,3%), pol da cana (18,3%) e sacarose (36,5%), não havendo diferença significativa para Pol da cana e sacarose com a variedade RB 72-454 (Tabela 7).

Tabela 7. Análise tecnológica da cana-planta. Fonte. Korndörfer *et al.* (1995).

Variedade	Pureza	Brix	Pol da cana	Sacarose
	%			
SP70-1143	89,4 ^a	19,5 ^b	17,4 ^b	26,5 ^b
SP791011	90,2 ^a	20,3 ^a	18,3 ^a	36,5 ^a
RB72-454	89,7 ^a	19,7 ^b	17,7 ^{ab}	31,4 ^{ab}
D.M.S	1,33	0,58	0,97	6,11
C.V (%)	1,45	2,84	4,18	18,9

Médias seguidas em uma mesma coluna e seguidas por uma mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade segundo teste de Tukey.

Mellis *et al.* (2010) avaliaram o efeito residual da aplicação de B, Cu, Mn, Mo e Zn no sulco de plantio, no perfilhamento e a qualidade industrial das primeiras soqueiras de seis ensaios conduzidos em diferentes ambientes edafoclimáticos do Estado de São Paulo. De acordo com os resultados,

aplicações de doses de micronutrientes no sulco de plantio da cana-de-açúcar, acima das doses recomendadas proporcionaram efeito residual significativo para a cana-soca. O perfilhamento das soqueiras obteve aumento médio de 15 mil perfilhos por hectare em relação ao tratamento controle, mesmo após 3 anos da instalação dos ensaios. Em relação à produção de colmos, apesar de também ter ocorrido efeito residual na cana-soca com a aplicação dos micronutrientes, apenas os tratamentos com Zn e Mo foram significativos (Tabela 8). Esses tratamentos foram também os que apresentaram maiores incrementos de perfilhamento, em média 16,5 mil perfilhos a mais que no tratamento controle. Segundo os autores, a produtividade da cana-de-açúcar está diretamente relacionada com o seu perfilhamento, sendo este diretamente influenciado pela luz, temperatura, umidade do solo e nutrientes. Com a aplicação de 10 kg ha⁻¹ de Zn e 2 kg ha⁻¹ de Mo no sulco de plantio, o TCH da cana-soca aumentou em média 10 toneladas em relação ao controle. Conforme os autores, o Zn é essencial para a síntese de triptofano, que é precursor do ácido indolacético (AIA), que irá formar as enzimas responsáveis pelo crescimento e alongamento celular, sendo assim, considerado um dos mais importantes micronutrientes para a cultura da cana-de-açúcar. O papel do Mo foi associado, possivelmente, a sua ação sobre as enzimas redutase do nitrato e nitrogenase, podendo colaborar para a fixação biológica de nitrogênio pela cana-de-açúcar.

Os resultados desse estudo permitiram concluir que embora tenha sido observado efeito residual da aplicação de micronutrientes no perfilhamento e na produtividade da cana-soca, os valores de ATR não foram influenciados pelos tratamentos. Todavia, a estimativa de produção de açúcar por hectare foi significativamente maior que o tratamento controle com o fornecimento de B, Cu, Mo e Zn (Tabela 8).

Tabela 8. Micronutrientes na produtividade e qualidade das soqueiras em 6 locais. Fonte: Adaptado de Mellis *et al.* (2010).

Tratamento	Perfilhamento Nº Perfilhos ha ⁻¹	TCH t ha ⁻¹	ATR kg t ⁻¹	TAH t ha ⁻¹
Controle	76188	76,9	159,2	12,49
NPK + S + Zn	92478**	86,7**	158,6	13,98**
NPK + S + Mn	88056**	83,1	155,6	13,27
NPK + S + Cobre	91085**	83,4	159,7	13,61**
NPK + S + B	92375**	82,8	160,7	13,54**
NPK + S + Mo	92900**	86,6**	158,6	13,97**
NPK + Micros	88752**	81,2	160,3	13,30
C.V (%)	9,9	15,2	4,0	15,3

** Diferem estatisticamente a 10% pelo teste de Dunnett em relação ao tratamento controle (sem aplicação de micronutrientes). **Observações:** Controle = NPK+S; Zn= 10 kg ha⁻¹; Mn= 10 kg ha⁻¹; Cobre= 10 kg ha⁻¹; B= 3 kg ha⁻¹; Mo= 2 kg ha⁻¹; Completo = Zn + Mn + Cobre + B + Mo; TCH= toneladas de colmos por hectare; ATR= açúcar total recuperável; TAH= toneladas de açúcar por hectare ([TCH*ATR]/1000); **Fontes:** Mo (Molibdato de amônio); B (Bórax); Zn, Cu e Mn (Sulfatos).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O fluxograma de trabalho para a avaliação da produtividade e da qualidade tecnológica da soqueira de cana-de-açúcar submetida a duas fontes de fósforo aplicadas no solo e micronutrientes aplicados via foliar é apresentado na Figura 22.

Figura 22. Fluxograma de trabalho.

O presente estudo foi desenvolvido em 5 etapas distintas. Na etapa 1, foram realizados os trabalhos de escolha do local e caracterização química e física do solo da área experimental. Na etapa 2, foram estabelecidas as fontes e as doses de fósforo e micronutrientes a serem testados, seguido da implantação do experimento no campo. A etapa 3, foi constituída pela coleta de folhas para a verificação o estado nutricional do canavial e dos níveis de fertilidade do solo após aplicação dos tratamentos; Na etapa 4 foi realizada a colheita e pesagem do experimento para verificação da produtividade das parcelas experimentais e a separação de amostras de colmos de cana-de-açúcar para análise da qualidade tecnológica; Na etapa 5, o conjunto de dados gerados (análise do solo, folha, produção e variáveis tecnológicas) nas unidades experimentais foi submetido à análise estatística para as devidas comparações e verificação das hipóteses formuladas.

3.1 Escolha e caracterização química e física da área experimental (Etapa1)

A escolha e caracterização do local para a implantação do experimento constituiu uma das etapas mais importantes do projeto e permitiu que a expressão de cada uma das variáveis resposta fosse, em sua maior parte, modulada pelo efeito direto dos tratamentos. Para isso, foram estabelecidos os seguintes requisitos: (i) solos de textura média com baixos teores de fósforo e micronutrientes; (ii) implantada com variedade de cana-de-açúcar representativa dentro do manejo varietal das usinas de açúcar e álcool; (iii) Em ciclo produtivo de 3ª ou 4ª soca; (iv) área de colheita mecânica e sem a queima prévia da palhada; (v) manejada tradicionalmente sem o uso de fósforo e vinhaça na soqueira. Para contemplar esses requisitos, o experimento foi instalado e conduzido em área de soqueira de cana pertencente à Usina Ferrari, no município de Casa Branca (SP), localizada a 21°48'26,92" de latitude sul e 47°5'2,24" de longitude oeste. O clima do local foi classificado como tropical chuvoso com inverno seco (Aw), segundo o sistema Köppen.

A variedade utilizada foi a RB 86-7515, na 3ª soqueira e em área de colheita mecânica sem queima da palhada e sem aplicação anterior de fósforo na soqueira. A produtividade média esperada para a área era de 80 t ha⁻¹ de colmos. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico. A caracterização química e física (Tabela 9) foi realizada no laboratório de solos da Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos FZEA/USP utilizando os métodos descritos por RAIJ *et al.*(2001).

Tabela 9. Características químicas e físicas do solo da área experimental.

Prof.	pH	MO ¹	P ²	S	K ²	Ca ²	Mg ²	Al ³	B ⁴	Cu ⁵
cm	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³			mmol _c dm ⁻³				mg dm ⁻³
0-20	5,2	18	8	5	0,9	16	9	1	0,2	0,5
20-40	5	16	5	5	0,8	13	8	1	0,2	0,4
Fe ⁵	Mn ⁵	Zn ⁵	H+Al ⁶	SB ⁷	T ⁸	V ⁹	m ¹⁰	Areia	Silte	Argila
mg dm ⁻³			mmol _c dm ⁻³			%			g kg ⁻¹	
18	4,1	0,7	20	26	46	56	3	852	18	130
14	1,2	0,6	23	22	45	49	4	812	46	142

¹Oxidação com íons dicromato; ² Resina trocadora de íons (RAIJ *et al.*, 2001); ³ KCl 1mol L⁻¹; ⁴ Água quente; ⁵ DTPA pH=7,3 (Abreu *et al.*, 2001); ⁶ Acidez potencial; ⁷ Soma de bases; CTC a pH 7,0; ⁹ Saturação por bases; ¹⁰ % de saturação por alumínio.

3.2 Preparação dos tratamentos e implantação do experimento (Etapa 2)

Os tratamentos foram preparados de modo que fosse possível testar em uma mesma área e ciclo de produção as diferentes hipóteses formuladas no projeto. Para tanto, foram definidos 2 grupos de tratamento: grupo 1 (tratamentos principais) e grupo 2 (tratamentos secundários). Para o primeiro grupo de tratamentos verificou-se a resposta produtiva da soqueira de cana-de-açúcar a aplicação de fósforo e a diferença entre as duas fontes utilizadas. No segundo grupo avaliou-se a resposta da soqueira com a aplicação de micronutrientes via foliar

O grupo dos tratamentos principais correspondeu as fontes de fósforo aplicadas no solo das parcelas experimentais, sendo dividido em quatro

níveis: T₁– controle (sem adubação), T₂– 495 kg ha⁻¹ de 21-00-14; T₃– 495 kg ha⁻¹ de 21-07-14 (superfosfato triplo); T₄– 495 kg ha⁻¹ de 21-07-14 (YaraMila™). Para a definição e preparação destes tratamentos foram utilizados os seguintes critérios: produtividade esperada na soqueira de cana-de-açúcar e os teores médios de fósforo e potássio presentes no solo da área experimental. Assim, para uma produtividade média de 80 t ha⁻¹ de colmos, considerando as características químicas do solo, foi estabelecida a aplicação de 30 e 110 kg ha⁻¹ de fósforo e potássio, respectivamente, de acordo com as recomendações de adubação fosfatada e potássica para a cana-soca propostas por RAIJ *et al.* (1996).

Para o nitrogênio, foi estabelecida a relação de 1,30 kg ha⁻¹ de N por tonelada de colmos a serem colhidos em área de colheita sem queima, perfazendo um total de 104 kg ha⁻¹ N. Em função desses valores referenciais (104-30-110) foi utilizada a dose de 495 kg ha⁻¹ da fórmula comercial 21-07-14 YaraMila™ como fonte de polifosfatos e de relação N-P-K mais próxima da recomendação estabelecida pelos critérios acima descritos (3,46 – 01 – 3,66). Com base no tratamento 4 (T₄) foram elaborados os demais (T₁, T₂ e T₃) utilizando as mesmas fontes de nitrogênio e potássio de modo que fosse possível comparar apenas as fontes de fósforo (polifosfatos para T₄ e superfosfato triplo para o T₃), sem a interferência dos demais componentes da fórmula (Tabela 10).

Tabela 10. Tratamentos principais (Fontes de fósforo para soqueira de cana-de-açúcar).

Trat.	Fórmula	Fontes	Dose (Kg ha ⁻¹)	Nutrientes (kg ha ⁻¹)		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O
T ₁	Controle	-	0	0	0	0
T ₂	2100-14	NAM + KCl	495	104	0	70
T ₃	21-07-14	NAM + SPT + KCl	495	104	35	70
T ₄	21-07-14	NAM + Poli-P + KCl	495	104	35	70

NAM: Nitrato de Amônio (34% N).

SPT: Superfosfato triplo (46 % P₂O₅).

KCl: Cloreto de potássio (60% K₂O).

Poli-P: Polifosfatos (20-30% polifosfatos + 70-80% Ortofosfatos)

T₂ e T₃: Mistura de grânulos; T₄: Fertilizante complexo (NPK no mesmo grânulo).

As fontes para a formulação dos tratamentos foram pesadas separadamente e misturadas em uma betoneira até a homogeneização completa da mistura de grânulos. Posteriormente, o material foi retirado e acondicionado em sacos plásticos para a posterior aplicação manual sobre a linha de plantio da cana-soca (Figura 23). Os Tratamentos foram aplicados no campo dia 26/12/2010.

Figura 23. a) Produto final da mistura de grânulos N-P-K (NAM + SPT + KCl). b) Produto acondicionado em sacos plásticos para aplicação no campo. c) Aspecto da área experimental no momento da aplicação dos tratamentos.

Os tratamentos do grupo 2 permitiram o estudo da resposta da 3ª soca de cana-de-açúcar aplicação de micronutrientes via foliar. Para isso, foi preparada uma solução (300 L ha⁻¹) contendo 4 fertilizantes comerciais (linha YaraVita™) como fonte de micronutrientes (

Tabela 11). A aplicação foi realizada dia 30/12/2010 utilizando-se pulverizador agrícola costal Jacto™ modelo PJH com capacidade de 20 litros e dotado de bico pulverizador tipo “leque”.

Tabela 11. Produto comercial, doses e fontes dos micronutrientes utilizados na 3ª soqueira de cana-de-açúcar.

Produto comercial	Densidade kg L ⁻¹	Dose L ha ⁻¹	N	P ₂ O ₅	Cu	Mn	Zn	B	Mo
Níveis de garantia (%)									
Mancozim	1,749	1,0	3,5	-	6,3	18,9	4,8	-	-
Zintrac	1,734	1,0	1,0	-	-	-	40	-	-
Bortrac	1,372	1,0	4,7	-	-	-	-	10,9	-
Molytrac	1,680	0,2	-	15,5	-	-	-	-	15,5
Fontes			N	P ₂ O ₅	Cu	Mn	Zn	B	Mo
Nutrientes (g.ha ⁻¹)									
Óxidos de Cobre e Zinco + Carbonato de Mn			61	-	110	331	84	-	-
Óxidos de Zinco			17	-	-	-	694	-	-
Borato de monoetanolamina			64	-	-	-	-	150	-
Molibdato de sódio			-	52	-	-	-	-	52
Total (g ha ⁻¹)			143	52	110	331	778	150	52

Os tratamentos principais (T₁, T₂, T₃, e T₄) foram aplicados na área total das parcelas, cada uma composta por 6 ruas de cana de 20 m de comprimento e espaçadas 1,4 m (Figura 24a). Posteriormente, as parcelas foram subdivididas em duas sendo que cada uma recebeu um dos tratamentos secundários (Figura 24b).

Figura 24. a) Parcela experimental. b) Subparcela experimental

3.3 Coletas de folhas e solo (Etapa 3)

A coleta de folhas nas unidades experimentais foi realizada no dia 20 de abril de 2011, aproximadamente, quatro meses após a aplicação dos tratamentos. Foram coletas 5 folhas (+ 3) em cada uma das 4 linhas de cana da área útil das subparcelas (Figura 25).

No laboratório de solos da FZEA-USP, as folhas foram preparadas (retirada da nervura central, lavagem, secagem e moagem) para as determinações analíticas dos teores de macro e micronutrientes.

Figura 25. Distribuição da área experimental

Para a amostragem do solo nas 3 profundidades estudadas (0–5;10 –15; 15 – 20 cm) foi projetada uma sonda composta por 4 anéis de 5 cm de comprimento perfeitamente ajustados no interior de um cilindro de aço inox. A sonda era posicionada verticalmente sobre os pontos de coleta (linha de plantio da soqueira) e enterrada até 20 cm de profundidade (Figura 26a). Após sua retirada do solo (Figura 26b), os anéis no interior da sonda foram removidos através de um embolo que deslocava todo o conjunto de 4 anéis (Figura 26c). Posteriormente, com o auxílio de uma espátula os anéis foram separados em 0-5 e 5-10 cm para formar as duas primeiras profundidades de coleta e os dois últimos anéis (10-15 e 15-20 cm) foram somados para formar a profundidade de 10-20 cm (Figura 26c).

Figura 26. Processo de coleta de solos estratificada. a) Sonda coletando na linha de plantio. b) Sonda + êmbolo. c) Conjunto de anéis contendo solo coletado em 4 profundidades.

Foram coletados 4 pontos por subparcela sendo 1 ponto por rua de 10 m nas 4 ruas centrais da cana (excluídas as 2 ruas de bordadura) para formar uma amostra composta por profundidade e por subparcela. A coleta de solos foi realizada no dia 06/05/2011, aproximadamente 120 dias após a aplicação dos tratamentos principais e secundários.

A rotina analítica para a determinação dos teores de macro e micronutrientes foliares assim como dos atributos químicos das amostras de solo seguiu as recomendações descritas por de MALAVOLTA *et al* (1997). A distribuição dos tratamentos na área experimental é apresentada da Figura 27.

Figura 27. Croqui da área experimental.

3.4 Colheita da cana-de-açúcar (Etapa 4)

A colheita da cana soca foi realizada no dia 23 de agosto de 2011, 10 meses após a rebrota da soqueira e 9 meses da aplicação dos tratamentos. A cana-de-açúcar foi colhida (Figura 28) e amontoada manualmente dentro da área útil das subparcelas (Figura 29). Posteriormente, o material de cada subparcela foi pesado utilizando-se para isso uma carregadora de cana (Motocana) na qual se adaptou um dinamômetro entre a garra e o braço de içamento do trator (Figura 30). Após a pesagem de cada unidade experimental, foi recolhido um feixe contendo 10 canas despalhadas por unidade (Figura 31) os quais foram enviados para o laboratório de análise tecnológica da Usina Ferrari para a determinação das variáveis tecnológicas (Pol, Pureza, Fibra e ATR).

Figura 28. Colheita manual das unidades experimentais

Figura 29. Separação das parcelas.

Figura 30. Pesagem das parcelas.

Figura 31. Feixe de colmos de cana-de açúcar para análise tecnológica.

3.5 Processamento dos dados e análise estatística (Etapa 5)

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados (DBC) com parcelas subdivididas, permitindo a avaliação dos efeitos dos tratamentos principais (fontes de fósforo no solo na parcela), dos secundários (com e sem aplicação de micronutrientes via foliar nas subparcelas) e da interação entre eles.

Os resultados obtidos (produtividade, variáveis tecnológicas, teores de macro e micronutrientes no solo e nas folhas) foram submetidos a análise de variância mediante o uso do software SAS 9.3 e nos casos em que o teste F foi significativo segundo nível de significância considerado (P-valor), as médias dos tratamentos e/ou das interações entre eles, foram comparadas por meio de contrastes ortogonais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação da produtividade da cana-de-açúcar

A análise de variância indicou efeito significativo apenas dos tratamentos principais na produtividade média da soqueira de cana-de-açúcar (Tabela 12).

Tabela 12. Análise de variância para os dados de produtividade média obtidos na 3ª soqueira de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais, secundários e interação entre eles.

Fonte de Variação	GL	P-valor
Blocos	4	0,4381 ^{ns}
Tratamentos principais (A)	3	0,0001 ^{***}
Tratamentos secundários (B)	1	0,0620 ^{ns}
Interação (A x B)	3	0,7997 ^{ns}

ns: Não significativo; ***significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Na Tabela 13 são apresentadas os valores médios de produtividade obtidos na 3ª soqueira de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais e secundários.

Tabela 13. Produtividade média (t ha⁻¹) da 3ª soqueira de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais e secundários.

Tratamentos	Com Foliar	Sem Foliar	Média
T₁:Controle	44,3	46,9	45,6
T₂: 21-00-14	48,6	50,5	49,6
T₃: 21-07-14 (SPT)	53,7	54,7	54,2
T₄: 21-07-14 (YaraMila)	56,3	60,1	58,2
Média	50,7	53,1	

SPT: Superfosfato triplo.

Considerando o efeito apenas dos tratamentos principais, a análise comparativa entre as médias dos tratamentos foi feita por meio de contrastes ortogonais (Tabela 14).

Tabela 14. P- valor da estatística F para os contrastes de médias da produtividade da soqueira de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais.

Contrastes	P-Valor
T ₁ vs T ₂	0,0191*
T ₁ vs T ₂ +T ₃ +T ₄	<0,0001***
T ₁ +T ₂ vs T ₃ + T ₄	<0,0001***
T ₃ vs T ₄	0,0193*

Notas: T₁: controle (sem adubação); T₂: 495 kg ha⁻¹ de N-K; T₃: 495 kg ha⁻¹ de N-P-K (superfosfato triplo); T₄: 495 kg ha⁻¹ de N-P-K (YaraMila).

De acordo com os resultados houve resposta significativa da soqueira de cana-de-açúcar a utilização de nitrogênio e potássio (NK), com incremento médio na produtividade de 4,0 t ha⁻¹ em relação ao controle sem adubação (contraste: T₁ vs T₂; Figura 32a). Todavia, ao se incluir o fósforo na adubação (NPK), independente da fonte, o ganho médio foi de 8,4 t ha⁻¹, ou seja, mais de 18% em relação ao controle (contraste: T₁ vs T₂+T₃+T₄; Figura 32b). Da mesma forma, comparando-se a produtividade média da soqueira para os tratamentos que utilizaram fósforo (T₃ e T₄), o ganho médio de produtividade foi de 8,6 t ha⁻¹ em relação à média dos tratamentos sem o elemento (contrastes: T₁+T₂ vs T₃+T₄; Figura 32c).

Em relação as fontes de fósforo, houve diferença significativa entre as produtividades obtidas. O tratamento 4, composto por polifosfatos, proporcionou ganho médio de 4,0 t ha⁻¹ em relação ao tratamento 3 que utilizou como fonte de fósforo o superfosfato triplo (contraste: T₃ vs T₄; Figura 32d).

Figura 32. Contrastes de médias para a produtividade média da soqueira de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais.

A maior eficiência agrônômica apresentada pela formulação 21-07-14 contendo como fonte de P os polifosfatos (YaraMila) em relação ao tratamento 3 (21-07-14 -superfosfato triplo) está associada a natureza química dos sais de P associados aos polifosfatos. O fertilizante YaraMila contém um mistura de 20-30% do P na forma de polifosfatos (pirofosfato - $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, tripolifosfato - $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ e trimetafosfato - $\text{Na}_3\text{P}_3\text{O}_9$) e 70-80% do P na forma de ortofosfatos. Enquanto que a fração correspondente aos ortofosfatos se solubiliza rapidamente, a fração dos polifosfatos tem uma hidrólise mais lenta, liberando gradativamente o P na solução do solo. Com isso, a fração de P relativa aos polifosfatos pode ter mantido o fator intensidade (P-solução do solo) menor, porém mais constante ao longo do ciclo da cultura, conferindo efeito residual à fonte; além disso, à liberação mais lenta de P na solução do solo faz com que as reações de adsorção e fixação do P atuem de forma menos acentuada, mantendo mais constante o estoque de P-lábil do solo (fator quantidade). Embora os teores médios de P presentes no solo 120 dias após a aplicação dos tratamentos não tenham diferido em função das fontes (Tabela 15), o efeito residual do polifosfatos presentes no T₄ podem ter favorecido

maior disponibilidade de P durante o restante da permanência do canavial na área até a colheita (cerca de 110 dias após a análise de solo) ocasionando maior média produtiva. Esse fato é particularmente importante na cultura da cana-de-açúcar que absorve o fósforo de forma gradual ao longo de todo o ciclo produtivo da cultura. A solubilidade dos polifosfatos ao longo do tempo parece ser o principal fator envolvido nas maiores respostas quanto a utilização dos mesmos.

Tabela 15. Teores médios de fósforo no solo 120 dias após a aplicação dos tratamentos 3 e 4.

Tratamentos	Profundidade		
	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm
	Teor de P (mg dm ⁻³ de solo)		
T ₃	22,0	17,6	13,7
T ₄	21,9	16,7	11,6
P-Valor	0,9623 ^{ns}	0,1776 ^{ns}	0,5347 ^{ns}

Nota: Médias na mesma coluna maiores que onde P-valor > 0,05 não diferem entre si segundo teste F.

Diversos autores estudaram a solubilidade diferencial dos polifosfatos. Dick e Tabatabai (1987) verificaram que as diferentes formas de P associadas aos polifosfatos fazem com que suas taxas de hidrólise e grau de adsorção às partículas do solo sejam variáveis, afetando a eficiência com que as plantas podem utilizar o elemento. Segundo McBeath et al. (2007a), os polifosfatos de amônio (forma de P predominante nos fertilizantes YaraMila) são composto por misturas de fósforo em diferentes formas (P-ortofosfato, P-pirofosfato e P-tripolifosfato) cujo produto final da solubilização são íons ortofosfato (H₂PO₄⁻). De acordo com McBeath et al. (2007b), no solo a proporção de cada espécie de P não permanece constante devido as reações de hidrólise, onde formas químicas de P mais condensadas reagem com a água originando formas menos condensadas. Dentre os principais fatores que controlam a hidrólise dos polifosfatos estão incluídos: a concentração do polifosfato, ambiente iônico, a temperatura e o pH. Segundo os autores, o efeito do pH sobre a hidrólise do P-tripolifosfato em solução a 25° C mostrou uma meia vida de 34 dias a pH 2,3 e de 174 dias para um pH de 5,4, indicando que a degradação hidrolítica dos polifosfatos em soluções aquosas à temperatura ambiente por ser muito lenta.

Torres-Dorante *et al.* (2005), demonstraram que em solução aquosa o P-pirofosfato solubilizou-se completamente em 15 dias, enquanto que o P-trimetafosfato solubilizou-se apenas 30% após um período de 90 dias.

Para o cálculo do índice de eficiência agrônômica (IEA) das fontes de fósforo foram utilizados os conceitos propostos por Goedert *et al.* (1986), no qual o IEA é dado pela seguinte expressão:

$$IEA = \left(\frac{Y_2 - Y_1}{Y_3 - Y_1} \right) \cdot 100 \quad \text{Eq.}$$

Onde:

Y_1 = Produção obtida pela parcela onde não houve aplicação de fósforo;

Y_2 = Produção obtida pela fonte que está sendo testada, com a dose x;

Y_3 = Produção obtida pela fonte de referência (SPT) na mesma dose x de P total aplicado.

Dessa forma, substituindo as variáveis da equação pelos valores de produtividade obtidos no ensaio, obtém-se o seguinte valor de IEA:

$$IEA = \left(\frac{Y_2 - Y_1}{Y_3 - Y_1} \right) \cdot 100 = \left(\frac{58,2 - 45,6}{54,2 - 45,6} \right) \cdot 100 = 146,5\%$$

Esses resultados demonstraram que os polifosfatos tiveram maior eficiência em fornecer fósforo comparativamente ao SPT considerado referência (100%).

Em relação aos micronutrientes, a análise de variância indicou efeito não significativo da aplicação de micronutrientes via foliar na produtividade média da 3ª soqueira de cana-de-açúcar. Dessa forma, a média geral entre as subparcelas com e sem aplicação de micronutrientes via foliar não diferiu estatisticamente (Figura 33).

Figura 33. Produtividade média da 3ª soqueira de cana-de-açúcar em função dos tratamentos secundários.

A ausência de resposta à aplicação de micronutrientes pode ser associada ao solubilidade das fontes, forma de aplicação e teores de micronutrientes presentes no solo.

Em relação às fontes, os óxidos de Cu e Zn, e o carbonato de Mn são consideradas insolúveis em água. No caso dos óxidos, as formulações testadas são apresentadas como suspensões verdadeiras, formadas pelos óxidos de Cu e Zn finamente moídos. Embora a granulometria fina aumente a reatividade em água (aumento da superfície específica), essas fontes não são apropriadas para aplicações foliares que exigem produtos de alta solubilidade em água.

Com respeito a forma de aplicação, a utilização de todas as fontes de micronutrientes juntas para o preparo de uma mesma solução de aplicação no campo pode ter favorecido a ocorrência de interação entre os elementos no momento da absorção foliar. Segundo Malavolta (2006), o cobre e/ou o boro, quando presentes na mesma solução, inibem a absorção de zinco.

Outro fator importante são os teores de boro, cobre, manganês e zinco presentes no solo 120 dias após aplicação dos tratamentos. Comparando os resultados de solos nas subparcelas com e sem aplicação de micronutrientes (Tabela 16), observa-se que os teores de boro, o manganês e zinco encontram-se dentro da faixa considerada média para a cana-de-açúcar segundo por Raij et al (1996) (Tabela 17). Além disso, no pH médio do solo encontrado nas subparcelas, cerca de 4,9 com exceção do molibdênio, os demais micronutrientes metálicos (Fe, Cu, Mn e Zn) tem sua disponibilidade máxima, fornecendo uma parte considerável dos elementos exigidos para as produtividades alcançadas.

Tabela 16. Teores médios de micronutrientes presentes no solo (média para as 3 profundidades amostradas) das subparcelas 120 dias após a aplicação dos tratamentos.

Subparcelas	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg dm ⁻³ de solo				
Com foliar	0,31	1,54	34,47	2,05	1,07
Sem foliar	0,29	1,48	34,32	1,82	1,10

B: Água quente; Cu, Fe, Mn e Zn: DTPA

Tabela 17. Limites de interpretação de teores de micronutrientes no solo para a cultura da cana-de-açúcar. Fonte: Raij et al. (1996).

Teor	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	mg dm ⁻³ de solo				
Baixo	0-0,2	0-0,2	0-0,4	0-1,2	0-0,5
Médio	0,21-0,6	0,3-0,8	5 -12	1,3-5	0,6-1,2
Alto	> 0,6	> 0,8	>12	> 5	>1,2

B: Água quente; Cu, Fe, Mn e Zn: DTPA

4.2 Parâmetros químicos de avaliação de nutrientes nas folhas coletadas 120 dias após a aplicação dos tratamentos.

4.2.1 Macronutrientes (nitrogênio, fósforo e potássio).

Os resultados apresentados na análise de variância (Tabela 18) indicaram efeito significativo dos tratamentos principais (T_1 , T_2 , T_3 e T_4) e sobre os teores foliares de nitrogênio (N), efeito dos tratamentos principais e secundários sobre os teores foliares de potássio (K) e interação entre eles sobre os teores de fósforo (P).

Tabela 18. Análise de variância para os teores foliares de N, P e K presentes nas folhas da soqueira de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais, secundários e interação entre eles.

Fontes de variação	N	P	K
	P-valor		
Blocos	0,2943 ^{ns}	0,0150 ^{***}	0,0510 ^{ns}
Tratamentos Principais (A)	0,0058^{***}	0,0029 ^{***}	0,0001^{***}
Tratamentos Secundários (B)	0,0520 ^{ns}	0,0378 ^{***}	0,0023^{***}
Interação A x B	0,1742 ^{ns}	0,0069[*]	0,081 ^{ns}

Notas: Tratamentos principais: T_1 = Controle - sem aplicação de N-P-K; T_2 = 495 kg ha⁻¹ de 21-00-14; T_3 = 495 kg ha⁻¹ de 21-07-14 (SPT); T_4 = 495 kg ha⁻¹ de 21-07-14 (YaraMila); Tratamentos secundários (Com e sem aplicação de micronutrientes via foliar) ^{ns}: Não significativo; ^{***} Significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

Na Tabela 19 é apresentada a comparação das médias de N e K entre os tratamentos principais, utilizando contrastes ortogonais entre as médias dos tratamentos que utilizaram N e K na formulação (T_2 , T_3 e T_4) versus o controle sem aplicação desses elementos (T_1).

Tabela 19. Contrastes de médias para os teores foliares de nitrogênio e potássio em função dos tratamentos principais.

Contrastes	Nitrogênio	Potássio
	P-valor	
T ₁ vs T ₂	0,0090**	<0,0001**
T ₁ vs T ₂ + T ₃ +T ₄	0,0008**	<0,0004**

ns: não significativo; ** significativo a 1% de probabilidade segundo teste F.

O teor médio de nitrogênio foliar aumentou significativamente nas parcelas que receberam o elemento na forma de nitrato de amônio. O Teor médio de N foliar nas parcelas do T₁ (controle: sem aplicação de N-P-K) foi menor tanto em relação ao T₂ quanto em relação à média conjunta dos tratamentos T₂, T₃ e T₄ (Figura 34). Esse aumento pode ser atribuído ao efeito direto da aplicação do elemento no solo, uma vez que cada um dos tratamentos (T₂, T₃ e T₄) forneceu aproximadamente 104 kg ha⁻¹ de N. Entretanto, todos os tratamentos tiveram o teor de N foliar abaixo da faixa considerada adequada por Malavolta *et al* (1997) na soqueira de cana-de-açúcar, ou seja, de 20 a 22 g de N kg⁻¹ de folhas.

Figura 34. Contrastes de média para os teores de nitrogênio foliar em função dos tratamentos principais.

Em relação aos tratamentos secundários, a média geral de N foliar nas subparcelas com e sem aplicação de micronutrientes não diferiu (Figura 35).

Figura 35. Contrastes de média para os teores de nitrogênio foliar em função dos tratamentos secundários.

Em relação ao potássio, o teor médio do elemento aumentou significativamente nas parcelas que receberam adubação na forma de cloreto de potássio. O Teor médio de K nas folhas das parcelas que receberam o tratamento 1 (controle: sem aplicação de N-P-K) foi menor tanto em relação ao tratamento 2 (495 ha⁻¹ de 21-00-14) quanto em relação à média conjunta dos tratamentos T₂, T₃ e T₄ (21-07-14 kg ha⁻¹ de N-P-K). Esse aumento pode ser atribuído ao efeito da aplicação do elemento no solo, uma vez que cada um dos tratamentos (T₂, T₃ e T₄) forneceu, aproximadamente, 70 kg ha⁻¹ de K₂O (Figura 36).

Figura 36. Contrastes de média para os teores de potássio foliar em função dos tratamentos principais.

Para os tratamentos secundários, a média geral de K foliar das subparcelas com aplicação de micronutrientes foi superior às parcelas sem aplicação (Figura 37). A maior absorção de potássio pelas plantas das subparcelas onde foram aplicados micronutrientes pode ser explicada,

indiretamente, pelo conjunto de interações (sinergismo e antagonismo) que ocorrem entre macronutrientes e entre macro e micronutrientes.

Figura 37. Contrastes de média para os teores de potássio foliar em função dos tratamentos secundários

O maior teor de potássio foliar nas subparcelas com aplicação de micronutrientes pode estar associado ao efeito conjunto da aplicação de nitrogênio na parcela. O teor de N foliar nas subparcelas com aplicação de micronutrientes foi superior às parcelas sem aplicação. Uma possível explicação para isso foi à presença de Mn e do Mo e suas funções dentro do metabolismo proteico. O nitrogênio e o potássio são os nutrientes absorvidos em maiores quantidades pela maior parte das culturas, sendo que a absorção de um eleva a demanda pelo outro (MAÇÃS, 2008). Assim, o aumento na absorção de N mediante o papel do Mn e do Mo faria com que a demanda por K também aumentasse, estabelecendo efeito interativo positivo. Isso seria necessário porque o K exerce juntamente com o N importantes reações fisiológicas e metabólicas como a ativação enzimática, fotossíntese, translocação de fotoassimilados, absorção de nitrogênio e síntese proteica (MARSCHNER, 1995).

Considerando os níveis de suficiência de K foliar em soqueira de cana-de-açúcar propostos por Malavolta *et al.* (1997), ou seja, de 13 a 15 g de K kg⁻¹ de folhas, apenas o tratamento T₂ ficou dentro da faixa adequada enquanto que os demais (T₁ e a média entre T₂+T₃+T₄) ficaram abaixo. O mesmo ocorreu para a média geral de K foliar nas subparcelas com e sem aplicação de micronutrientes, ficando ambas um pouco abaixo dos níveis adequados.

Os teores de fósforo foliar variaram em função da interação entre os tratamentos principais e secundários. Assim, para o estudo da concentração

desses nutrientes nas folhas foi realizado o desdobramento da interação, estudando os níveis dos tratamentos principais dentro de cada nível dos tratamentos secundários (Tabela 20).

Tabela 20. Contrastes de médias para o desdobramento da interação que compara os níveis dos tratamentos principais dentro dos níveis dos tratamentos secundários.

Interação A*B	P-valor
(T ₁ +T ₂ vs T ₃ +T ₄) – Com foliar	0,0103**
(T ₃ vs T ₄) – Com foliar	0,9414 ^{ns}
(T ₁ +T ₂ vs T ₃ +T ₄) – Sem foliar	0,3559 ^{ns}
(T ₃ vs T ₄) – Sem foliar	0,1750 ^{ns}

ns: não significativo; *** significativo a 1% de probabilidade segundo teste F

Nas subparcelas onde foram aplicados micronutrientes (Figura 38a), os níveis de P foliar foram maiores nos tratamentos que forneceram o elemento ao solo (contraste T₁+T₂ vs T₃+T₄) em relação aos tratamentos sem P (contraste T₁+T₂). Com respeito às fontes, para as mesmas subparcelas, tanto o superfosfato triplo (T₃) quanto o polifosfato presente no fertilizante YaraMila (T₄) proporcionaram o mesmo teor de P foliar. Nas subparcelas sem aplicação de micronutrientes, os teores foliares de P não diferiram entre os tratamentos que utilizaram ou não fósforo (contraste T₁+T₂ vs T₃+T₄) e entre as fontes (T₃ vs T₄).

Considerando o erro padrão da média de 0,019 g de P kg⁻¹ de folha, todos os tratamentos e/ou combinações entre eles encontram-se dentro da faixa de P foliar considerada adequada, ou seja, de 1,8 a 2,0 g de P kg⁻¹ de folha (MALAVOLTA *et al.*, 1997) (Figura 38b).

Figura 38. Contrastes de médias para os teores de P foliar em função da interação entre os tratamentos principais e os secundários.

4.2.2 Micronutrientes (boro, cobre, ferro, manganês e zinco)

Na Tabela 21 são apresentados os resultados da análise de variância para os teores de B, Cu, Fe, Mn e Zn presentes nas folhas da 3ª soca de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais, secundários e interação entre eles.

Tabela 21. Análise de variância para os teores de micronutrientes foliares na soqueira de cana-de-açúcar (4ª corte) em função dos tratamentos principais e secundários.

Fontes de variação	Boro	Cobre	Ferro	Manganês	Zinco
	P-valor				
Blocos	0,0218**	0,0172**	0,0181**	0,0048**	0,0498**
Trat. Principais (A)	0,0809 ^{ns}	0,7303 ^{ns}	0,7865 ^{ns}	0,3445 ^{ns}	0,0183**
Trat. Secundários (B)	0,5404 ^{ns}	0,8821 ^{ns}	0,2133 ^{ns}	0,2412 ^{ns}	0,0002***
Interação (A x B)	0,6020 ^{ns}	0,8163 ^{ns}	0,8016 ^{ns}	0,9049 ^{ns}	0,0767**

ns: Não significativo; ***, ** significativo a 1 e 10% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

De acordo com os resultados, os teores de B, Cu, Fe e Mn presentes nas folhas da soqueira da cana-de-açúcar (3ª soca) não variaram em função dos tratamentos principais, secundários e da interação entre eles (Figura 39).

Figura 39. Teores de boro, cobre, ferro e manganês presentes nas folhas da soqueira de cana-de-açúcar (4ª corte) 120 dias após a aplicação dos tratamentos.

Em relação ao Zn, os teores foliares desse elemento variaram em função da interação entre os tratamentos principais e os tratamentos secundários. Assim, para o estudo das concentração desse elemento nas folhas, os graus de liberdade foram desdobrados em níveis do fator B (tratamentos secundários) dentro de cada nível do fator A (tratamentos principais) conforme Tabela 22.

Tabela 22. Análise de variância para o desdobramento da interação que compara os níveis do tratamento secundário dentro de cada nível dos tratamentos principais

Fontes de variação	Zinco
	P-valor
(Com e sem foliar) x T ₁	0,0003***
(Com e sem foliar) x T ₂	0,0170**
(Com e sem foliar) x T ₃	0,4309 ^{ns}
(Com e sem foliar) x T ₄	0,1371 ^{ns}

ns: Não significativo; ***, ** significativo a 1 e 5% , respectivamente, pelo teste F.

O desdobramento da interação indicou que para os tratamentos T₁ e T₂, os maiores teores de zinco foram encontradas nas subparcelas que receberam aplicação de micronutrientes. Para as demais combinações (tratamentos T₃ e T₄ com e sem aplicação de micronutrientes), os teores do elemento não apresentaram diferença significativa (Figura 40).

Figura 40. Teores médios de zinco em função da interação entre os tratamentos principais e os secundários

As maiores concentrações de zinco nos tratamentos principais T₁ e T₂ dentro das subparcelas com aplicação de micronutrientes pode ser explicada em

parte pela interação entre os nutrientes. De acordo com Malavolta (2006), os nutrientes apresentam interações, ou seja, o efeito da adição de um elemento ou a ausência de um pode aumentar ou diminuir o teor do nutriente nas folhas das plantas. A interação P e Zn é descrita na literatura principalmente pela influência negativa do fósforo na absorção de zinco (BÜLL, 1993); isso é explicado em parte pela interação P-Zn na raiz e ou nos vasos condutores da planta, com consequente redução na translocação de zinco para a parte aérea da planta. Outro possível mecanismo seria explicado por uma desordem metabólica causada pelo desbalanço desses dois nutrientes (STUKENHOLTZ *et al.*, 1996; BOAWN e BROWN, 1968; EDWARDS e KAMPRATH, 1974; EPSTEIN, 1975; MALAVOLTA, 1989).

Nos tratamentos T₁ e T₂ não houve aplicação de fósforo no solo dentro das parcelas. Isso pode ter reduzido as interações P-Zn nas raízes e nos vasos condutores da planta, aumentando o transporte de zinco para as folhas. Esse fato somado a aplicação de micronutrientes contendo zinco (subparcela) podem ter favorecido o maior acúmulo desse elemento nas folhas das cana-de-açúcar das subparcelas T₁ – Com foliar e T₂ – Com foliar.

Comparando-se esses resultados com as faixas de suficiência aceitas pela literatura, (Figura 41) observa-se que em todos os tratamentos principais e secundários ou na combinação entre eles, os teores de B, Zn, Cu, Fe e Mn encontram-se dentro da faixa considerada adequada por Raij *et al.* (1996).

Figura 41. Faixas de micronutrientes consideradas adequadas para a cultura da cana-de-açúcar Fonte: Adaptado de Raij *et al.* (1996).

4.3 Parâmetros químicos do solo 120 dias após a aplicação dos tratamentos.

Na Tabela 23 são apresentados os resultados da análise de variância e na Tabela 24 os valores médios para os atributos químicos do solo coletado 120 dias após a aplicação dos tratamentos.

Tabela 23. Análise de variância para os atributos químicos do solo coletado 120 dias após a aplicação dos tratamentos.

FONTES DE VARIAÇÃO	GL	pH	MO	P	S	K	Ca	Mg	H +Al	Al
		P-valor								
Blocos	4	0,3811 ^{ns}	0,4426 ^{ns}	0,0001 ^{***}	0,9541 ^{ns}	0,3788 ^{ns}	0,3369 ^{ns}	0,1538 ^{ns}	0,1741 ^{ns}	0,0835 ^{ns}
Trat. Principais (A)	3	0,3243 ^{ns}	0,0009^{***}	0,0001 ^{***}	0,4938 ^{ns}	0,8499 ^{ns}	0,0002^{***}	0,2004 ^{ns}	0,1287 ^{ns}	0,0021^{***}
Trat. Secundários (B)	1	0,0360^{**}	0,0900 ^{ns}	0,6359 ^{ns}	0,0359 ^{ns}	0,3609 ^{ns}	0,4313 ^{ns}	0,0298 ^{ns}	0,9581 ^{ns}	0,0439^{**}
Interação (A x B)	3	0,3670 ^{ns}	0,4784 ^{ns}	0,1301 ^{ns}	0,0014^{***}	0,0687 ^{ns}	0,8926 ^{ns}	0,2797 ^{ns}	0,6837 ^{ns}	0,3145 ^{ns}
Profundidade de coleta (C)	2	0,0001^{***}	0,3190 ^{ns}	0,0001^{***}	0,6253 ^{ns}	0,0034 ^{***}	0,0001^{***}	0,0001^{***}	0,0004^{***}	0,0047^{***}
Interação (A x C)	6	0,3003 ^{ns}	0,0007^{***}	0,0001^{***}	0,7092 ^{ns}	0,3886 ^{ns}	0,0344 ^{ns}	0,0846 ^{ns}	0,7197 ^{ns}	0,9190 ^{ns}
Interação (B x C)	2	0,8773 ^{ns}	0,4292 ^{ns}	0,0653 ^{ns}	0,4866 ^{ns}	0,8554 ^{ns}	0,8354 ^{ns}	0,2489 ^{ns}	0,8149 ^{ns}	0,6339 ^{ns}
Interação (A x B x C)	6	0,0777 ^{ns}	0,5045 ^{ns}	0,4708 ^{ns}	0,258 ^{ns}	0,9019 ^{ns}	0,5904 ^{ns}	0,2058 ^{ns}	0,7166 ^{ns}	0,8000 ^{ns}

FONTES DE VARIAÇÃO	GL	B	Cu	Fe	Mn	Zn	CTC	SB	V	m
		P-valor								
Blocos	4	0,5268 ^{ns}	0,4468 ^{ns}	0,3615 ^{ns}	0,9193 ^{ns}	0,9948 ^{ns}	0,2207 ^{ns}	0,2265 ^{ns}	0,9343 ^{ns}	0,2663 ^{ns}
Trat. Principais (A)	3	0,0544 ^{ns}	0,001^{***}	0,0084^{***}	0,0109 ^{***}	0,0001^{***}	0,0001^{***}	0,0015^{***}	0,0001^{***}	0,2626 ^{ns}
Trat. Secundários (B)	1	0,2503 ^{ns}	0,3332 ^{ns}	0,7097 ^{ns}	0,0503 ^{ns}	0,3258 ^{ns}	0,6464 ^{ns}	0,6018 ^{ns}	0,0018^{***}	0,1883 ^{ns}
Interação (A x B)	3	0,0149^{***}	0,9163 ^{ns}	0,0001^{***}	0,8906 ^{ns}	0,0037^{***}	0,0796 ^{ns}	0,8962 ^{ns}	0,1639 ^{ns}	0,1361 ^{ns}
Profundidade de coleta (C)	2	0,7272 ^{ns}	0,1308 ^{ns}	0,3094 ^{ns}	0,0042^{***}	0,1744 ^{ns}	0,0001^{***}	0,0001^{***}	0,0005^{***}	0,1372 ^{ns}
Interação (A x C)	6	0,7449 ^{ns}	0,6001 ^{ns}	0,0075^{***}	0,0569 ^{ns}	0,0005^{***}	0,007 ^{ns}	0,0014^{***}	0,1963 ^{ns}	0,5565 ^{ns}
Interação (B x C)	2	0,8152 ^{ns}	0,8087 ^{ns}	0,7253 ^{ns}	0,5878 ^{ns}	0,2604 ^{ns}	0,5367 ^{ns}	0,9555 ^{ns}	0,7995 ^{ns}	0,4652 ^{ns}
Interação (A x B x C)	6	0,5010 ^{ns}	0,7680 ^{ns}	0,9897 ^{ns}	0,5261 ^{ns}	0,5689 ^{ns}	0,1788 ^{ns}	0,7349 ^{ns}	0,8842 ^{ns}	0,7507 ^{ns}

Tabela 24. Quadro de médias para os atributos químicos do solo coletado 120 dias após a aplicação dos tratamentos

Tratamentos	pH	M.O	P	S	K	Ca	Mg	H +Al	Al
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³			mmol _c dm ⁻³			
Média ± Erro Padrão									
T ₁	4,97 ± 0,06	22,03 ± 0,45	8,65 ± 0,79	8,67 ± 0,28	0,76 ± 0,06	20,92 ± 0,76	4,71 ± 0,08	22,74 ± 0,62	1,69 ± 0,10
T ₂	5,03 ± 0,06	20,75 ± 0,45	8,78 ± 0,79	9,10 ± 0,28	0,76 ± 0,05	19,05 ± 0,76	4,57 ± 0,08	24,22 ± 0,62	2,18 ± 0,14
T ₃	4,90 ± 0,06	22,42 ± 0,45	15,81 ± 0,79	8,78 ± 0,28	0,79 ± 0,04	22,59 ± 0,76	4,71 ± 0,08	24,94 ± 0,62	2,35 ± 0,18
T ₄	4,89 ± 0,06	21,60 ± 0,45	14,15 ± 0,79	8,50 ± 0,28	0,82 ± 0,06	15,71 ± 0,76	4,49 ± 0,08	24,46 ± 0,62	2,47 ± 0,21
Com Foliar	4,97 ± 0,03	21,51 ± 0,24	11,90 ± 0,56	8,47 ± 0,19	0,76 ± 0,04	19,87 ± 0,53	4,52 ± 0,06	24,11 ± 0,44	2,35 ± 0,12
Sem Foliar	4,92 ± 0,03	21,89 ± 0,24	11,80 ± 0,56	9,06 ± 0,19	0,81 ± 0,04	19,26 ± 0,53	4,72 ± 0,06	24,07 ± 0,44	2,00 ± 0,12
00-05 cm	5,13 ± 0,03	21,74 ± 0,40	11,65 ± 0,68	8,62 ± 0,23	0,70 ± 0,05	16,99 ± 0,65	4,06 ± 0,07	22,41 ± 0,54	1,78 ± 0,14
05-10 cm	4,92 ± 0,03	22,43 ± 0,40	11,65 ± 0,68	8,75 ± 0,23	0,91 ± 0,05	18,99 ± 0,65	4,70 ± 0,07	24,23 ± 0,54	2,43 ± 0,14
10-20 cm	4,78 ± 0,03	21,63 ± 0,40	12,24 ± 0,68	8,92 ± 0,23	0,73 ± 0,05	22,74 ± 0,65	5,10 ± 0,07	25,64 ± 0,54	2,30 ± 0,14
Tratamentos	B	Cu	Fe	Mn	Zn	CTC	SB	m	V
	mg dm ⁻³				mmol _c dm ⁻³				%
T ₁	0,27 ± 0,02	1,75 ± 0,07	33,26 ± 0,39	1,59 ± 0,11	0,99 ± 0,03	44,56 ± 0,88	23,71 ± 0,80	7,69 ± 0,54	50,58 ± 1,00
T ₂	0,30 ± 0,02	1,62 ± 0,07	34,90 ± 0,39	2,05 ± 0,11	1,16 ± 0,03	48,64 ± 0,88	25,02 ± 0,80	7,48 ± 0,54	50,40 ± 1,00
T ₃	0,30 ± 0,02	1,37 ± 0,07	35,17 ± 0,39	1,88 ± 0,11	1,19 ± 0,03	53,85 ± 0,88	27,91 ± 0,80	7,98 ± 0,54	52,30 ± 1,00
T ₄	0,34 ± 0,02	1,28 ± 0,07	34,27 ± 0,39	2,23 ± 0,11	0,99 ± 0,03	47,83 ± 0,88	21,98 ± 0,80	8,97 ± 0,54	44,39 ± 1,00
Com Foliar	0,31 ± 0,01	1,54 ± 0,05	34,47 ± 0,28	2,05 ± 0,08	1,07 ± 0,02	48,93 ± 0,63	24,87 ± 0,56	8,39 ± 0,38	50,34 ± 1,00
Sem Foliar	0,29 ± 0,01	1,48 ± 0,05	34,32 ± 0,28	1,82 ± 0,08	1,10 ± 0,02	48,51 ± 0,63	24,44 ± 0,56	7,65 ± 0,38	49,20 ± 1,00
00-05 cm	0,31 ± 0,02	1,41 ± 0,06	35,05 ± 0,49	2,15 ± 0,10	1,06 ± 0,02	45,24 ± 0,77	21,64 ± 0,69	7,66 ± 0,46	47,47 ± 0,65
05-10 cm	0,31 ± 0,02	1,56 ± 0,06	34,29 ± 0,49	1,97 ± 0,10	1,06 ± 0,04	48,17 ± 0,77	23,35 ± 0,69	8,80 ± 0,46	48,39 ± 1,06
10-20 cm	0,29 ± 0,02	1,55 ± 0,06	33,85 ± 0,49	1,68 ± 0,10	1,13 ± 0,03	52,75 ± 0,77	28,98 ± 0,69	7,62 ± 0,46	52,40 ± 0,82

4.3.1 Macronutrientes

- **Potássio (K)**

Os resultados da análise de variância indicaram não haver diferença significativa entre os teores de K do solo (considerando a média das 3 profundidades de solo amostradas) em função dos tratamentos principais e dos tratamentos secundários. Dessa forma, o teor médio de potássio no solo 120 dias após a aplicação dos tratamentos não diferiu entre aqueles que forneceram K (T₂, T₃ e T₄) e o controle sem adubação (Figura 42).

Figura 42. Teores de potássio presentes no solo (média para as 3 camadas de amostradas), 120 dias após a aplicação dos tratamentos.

Entretanto, houve efeito significativo das profundidades de coleta sobre os teores de K no solo (Tabela 24). Dessa forma, a comparação entre os teores médios de potássio em função das profundidades foi realizada mediante o uso de contrastes ortogonais (Tabela 25).

Tabela 25. Contrastes de média para os teores de K no solo em função das profundidades de coleta

Fontes de variação	Contrastes	P-valor
Profundidades	0-5 vs 5-10 cm	0,8979 ^{ns}
	0-5 vs 10-20 cm	0,0051 ^{***}
	5-10 vs 10-20 cm	0,0167 ^{***}

^{ns}: Não significativo; ^{***} Significativo a 1% de probabilidade segundo teste F.

De acordo com os resultados, os teores de K entre as duas primeira camadas de solo não diferiram entre si e foram menores que os teor presente na última camada amostrada (Figura 43). Isto era esperado considerando que o K é um íon bastante móvel no solo, principalmente nos de textura média a arenosa. Dessa forma, após 120 dias da aplicação dos fertilizantes em superfície ocorreu o carregamento do K e o enriquecimento da última camada de solo em relação as primeiras.

Figura 43. Teores de K no solo em função das profundidades de coleta, 120 dias após a aplicação dos tratamentos.

- **Fósforo (P)**

Os resultados da análise de variância indicaram efeito significativo dos tratamentos principais (T₁, T₂, T₃ e T₄), das profundidades de coleta de solo (0-5, 5-10 e 10 -20 cm) e da interação entre os dois fatores, sobre os teores médios de P no solo coletado 120 dias após a aplicação dos tratamentos.

Para o estudo das concentrações de P nas diferentes camadas de solo, foi realizado o desdobramento da interação, analisando os efeitos dos tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo (Tabela 26).

Tabela 26. Análise de variância para o desdobramento da interação: efeito dos tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo sobre os teores de P.

Fontes de variação: Desdobramento da interação A (C).	P-valor
(T ₁ , T ₂ , T ₃ e T ₄) x 0-5 cm	<0,0001***
(T ₁ , T ₂ , T ₃ e T ₄) x 5-10 cm	<0,0001***
(T ₁ , T ₂ , T ₃ e T ₄) x 10-20 cm	<0,0001***

*** Significativo a 1% de probabilidade segundo teste F.

De acordo com os resultados, houve efeito significativo dos tratamentos principais em todas as camadas de solo. Dessa forma, para a comparação entre as médias dos tratamentos dentro das camadas de solo amostradas, foram realizados contrastes ortogonais (Tabela 27).

Tabela 27. Contrastes de médias para os valores de P entre os tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo.

Fonte de variação	P-valor
(T ₁ +T ₂ vs T ₃ +T ₄) 0-5 cm	<0,0001***
(T ₁ vs T ₂) 0-5 cm	0,2052 ^{ns}
(T ₃ vs T ₄) 0-5 cm	0,9623 ^{ns}
(T ₁ +T ₂ vs T ₃ +T ₄) 5-10 cm	<0,0001***
(T ₁ vs T ₂) 5-10 cm	0,5035 ^{ns}
(T ₃ vs T ₄) 5-10 cm	0,1776 ^{ns}
(T ₁ +T ₂ vs T ₃ +T ₄) 10-20 cm	<0,0001***
(T ₁ vs T ₂) 10-20 cm	0,2032 ^{ns}
(T ₃ vs T ₄) 10-20 cm	0,5347 ^{ns}

^{ns}: Não Significativo; *** Significativo a 1% de probabilidade segundo teste F.

Considerando a interação A (C), os resultados demonstraram que para a profundidade de solo de 0-5 cm os teores de P nas parcelas que não receberam adubação fosfatada (T₁ e T₂) foram iguais entre si e menores que os tratamentos que receberam (T₃ e T₄) que por sua vez também não diferiram entre si (Figura 44). Neste caso, a aplicação de P em superfície aumentou em 86,9% o teor de fósforo na camada de 0-5 cm de solo em relação aos tratamentos T₁ e T₂. Nas camadas subsequentes, os resultados foram semelhantes. Para a profundidade de 5-10 cm os teores de P nas parcelas que não receberam adubação fosfatada (T₁ e T₂) foram iguais entre si e menores que os tratamentos que receberam (T₃ e T₄) que por sua vez também não

diferiram entre si. Neste caso, o efeito a aplicação superficial de P aumentou em 78,6% o teor de fósforo nesta camada quando comparado ao teor médio nos tratamentos T₁ e T₂. Da mesma forma, os teores de P na camada de 10-20 cm das parcelas que não receberam adubação fosfatada (T₁ e T₂) foram iguais entre si e menores que os tratamentos que receberam (T₃ e T₄) que por sua vez também não diferiram entre si. Estes, proporcionaram acréscimo no teor de P no solo de 53,7% em relação aos tratamentos T₁ e T₂.

Figura 44. Teor médio de fósforo dentro de cada uma das camadas de solo amostradas em função dos tratamentos.

Os resultados permitiram concluir que o P aplicado em superfície promove, independente da fonte, aumentos significativos nos teores do solo. Os incrementos nos teores de P com a aplicação dos tratamentos T₃ e T₄ decrescem da superfície até a última camada analisada (86,7%, 78,6% e 53,7%, respectivamente para 0-5, 5-10 e 10-20 cm), porém são sempre superiores aos tratamentos sem a utilização do elemento (T₁ e T₂).

Todavia, além do efeito direto da aplicação dos fertilizantes contendo P (T₃ e T₄), alguns parâmetros químicos do solo como o pH, teor de matéria orgânica, acidez potencial (H+Al) e acidez trocável (Al³⁺) têm correlação forte com o P presente no solo e ajudam a explicar o comportamento do elemento,

tanto em relação aos tratamentos principais quanto ao longo das três profundidades de solo analisadas.

- **pH (CaCl₂)**

Os valores de pH (CaCl₂) variaram em função das profundidades de coleta do solo (Tabela 24). Para o estudo do pH (CaCl₂) ao longo do perfil do solo foram realizados contrastes ortogonais das médias de pH entre as profundidades (Tabela 28).

Tabela 28. Contrastes de medias para os valores de pH nas diferentes camadas de solo amostradas 120 dias após a aplicação dos tratamentos.

Fontes de variação	Contrastes	P-valor
Profundidades	0-5 vs 5-10 cm	0,0001***
	0-5 vs 10-20 cm	0,0001***
	5-10 vs 10-20 cm	0,0001***

*** Significativo a 1% de probabilidade segundo teste F.

De acordo com os resultados, o pH (CaCl₂) do solo reduziu de forma significativa ao longo das três camadas de solo (Figura 45).

Figura 45. pH médio do solo ao longo das 3 camadas de solo amostradas.

Sendo o pH (CaCl₂) uma medida da acidez ativa do solo e representado pelo inverso da concentração de H⁺, a medida em que se diminui o pH do solo

aumenta-se a concentração de H^+ em solução, tendo esse fenômeno impacto direto na disponibilidade de fósforo. De acordo com Novais e Smyth (1999), o desenvolvimento de cargas elétricas nos solos tropicais é fortemente dependente do pH; assim, o excesso de H^+ em solução tende a reagir com a interface de óxidos de Fe e Al (argilominerais) presentes no solo gerando carga variável positiva. A medida que os óxidos se tornam mais eletropositivos passam a adsorver íons fosfatados da solução do solo, diminuindo sua disponibilidade para a planta (Figura 46).

Figura 46. Geração de carga elétrica variável na interface de óxidos de ferro e adsorção de íons fosfato.

Dessa forma, a diferenças de pH ($CaCl_2$) entre as camadas de solo pode ter contribuído para a variação nos teores de P encontrados entre as camadas de solo, independente da aplicação ou não dos tratamentos.

- **Matéria orgânica (MO)**

Os teores de MO variaram significativamente em função dos tratamentos principais (T_1 , T_2 , T_3 e T_4) e da interação entre eles e as profundidades de coleta de solo (Tabela 29)

Dessa forma, para o estudo da variação da matéria orgânica ao longo das camadas de solo amostradas, foi realizado o desdobramento da interação tratamentos principais x profundidades de solo, analisados os efeitos dos tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo.

Tabela 29. Análise de variância para o desdobramento da interação: efeito os tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solos sobre os teores de MO.

Fontes de variação: Desdobramento da interação A [C].	P-valor
(T ₁ , T ₂ , T ₃ e T ₄) x 0-5 cm	0,7583 ^{ns}
(T ₁ , T ₂ , T ₃ e T ₄) x 5-10 cm	0,0006***
(T ₁ , T ₂ , T ₃ e T ₄) x 10-20 cm	0,0001***

^{ns}: Não significativo*** Significativo a 1% de probabilidade segundo teste F.

De acordo com os resultados, houve efeito significativo da interação entre os tratamentos principais e as camadas de solo a 5-10 e 10-20 cm. Para a comparação entre as médias dos tratamentos dentro de cada camada foram realizados contrastes ortogonais (Tabela 30).

Tabela 30. Contrastes de médias para os valores de MO entre os tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo.

Fonte de variação	P-valor
(T ₁ vs T ₂ +T ₃ +T ₄)x 5- 10 cm	0,5230 ^{ns}
(T ₁ +T ₂ vs T ₃ +T ₄) x 5-10 cm	0,0285**
(T ₁ vs T ₂) x 5-10 cm	0,4280 ^{ns}
(T ₃ vs T ₄) x 5-10 cm	0,0003***
(T ₁ vs T ₂ +T ₃ +T ₄) x 10 -20 cm	0,3807 ^{ns}
(T ₁ +T ₂ vs T ₃ +T ₄) x 10-20 cm	0,0050***
(T ₁ vs T ₂) x 10-20 cm	0,0026***
(T ₃ vs T ₄) x 10-20 cm	0,0001***

^{ns}: Não significativo*** Significativo a 1% de probabilidade segundo teste F.

Observou-se que na camada de solo de 0-5 cm não houve diferença entre os tratamentos em relação aos teores de MO do solo (Figura 47a). Essa condição de igualdade em relação a MO é importante para isolar o efeito dos tratamentos principais sobre os teores de P do solo. Isso ocorre por que segundo Sá (1999) em alguns tipos de solo, o P- ligado a matéria orgânica pode representar mais de 70% do P total extraível em resina.

Na camada 5-10 cm, as parcelas que receberam o Tratamento 3 (21-07-14 - SPT) apresentaram maior teor de MO em relação aos demais tratamentos, que por sua vez não diferiram entre si (Figura 47b). Quando se compara teor

médio de MO entre os tratamentos T₃ e T₄, percebeu-se uma diferença de 4,32 g de MO dm⁻³ de solo ou o equivalente a 8.640 kg MO ha⁻¹ (1ha = 2000 m³ de solo). Dessa forma, por menor que seja o teor de P presente nesta fração da matéria orgânica, ela pode ter sido responsável pela diferença numérica (não estatística) entre os teores de P entre os tratamentos T₃ (17,6 mg dm⁻³ de solo) e T₄ (16,7 mg dm⁻³ de solo) nessa profundidade de solo amostrada. O mesmo ocorreu na camada de 10-20 cm, onde o solo das parcelas que receberam o T₃ apresentaram maior teor de MO que as parcelas que receberam o T₄ (Figura 47c).

Conforme discutido para a camada de 5-10 cm, esse diferencial no teor de MO do solo pode ter contribuído para que o valor numérico de P no tratamento 3 (13,7 mg dm⁻³ de solo) fosse maior que no tratamentos 4 (11,6 mg dm⁻³ de solo). De qualquer forma, para todas as camadas de solo amostradas, os teores de P no solo foram maiores nas parcelas que receberam adubação fosfatada, independente do teor de MO.

Figura 47. Teores de matéria orgânica presentes nas 3 camadas de solo amostradas 120 dias após a aplicação dos tratamentos principais.

- **Acidez trocável (Al^{3+})**

Os resultados da análise de variância para os valores de acidez trocável, demonstraram efeito significativo dos tratamentos principais, tratamentos secundários e das profundidades de coleta sobre os valores desta variável. Para a comparação das medias entre os valores dos tratamentos principais, foram realizados contrastes ortogonais (Tabela 31).

Tabela 31. Contrastes de medias para os valores de acidez trocável do solo (média para as 3 camadas amostradas), em função dos tratamentos principais 120 dias após a aplicação dos tratamentos.

Contrastes	P-valor
T1 vs T2	0,0002***
T1 + T2 vs T3 + T4	0,0079***
T1 vs T2	0,0089***
T3 vs T4	0,6613 ^{ns}

^{ns}: não significativo; *** Significativo a 1% de probabilidade segundo teste F.

De acordo com os resultados a acidez trocável nas parcelas que não receberam adubação (controle) foi menor que nas demais, que por sua vez não diferiram entre si (Figura 48a). Em relação aos tratamentos secundários, as subparcelas que não receberam adubação foliar com micronutrientes apresentaram menor acidez trocável (Figura 48b). Segundo Alvarez *et al.* (1999), valores de acidez trocável entre 2 e 5 $mmol_c\ dm^{-3}$ são considerados baixos.

Figura 48. Valores médios de acidez trocável do solo (média para as 3 camadas amostradas), 120 dias após a aplicação dos tratamentos a) Tratamentos principais b) Tratamentos secundários.

Em relação às profundidades de coleta de solos, para a comparação entre os valores observados ao longo das três profundidades, foram realizados contrastes ortogonais (Tabela 32).

Tabela 32. Contrastes de medias para os valores de acidez trocável nas diferentes camadas de solo amostradas 120 dias após a aplicação dos tratamentos.

Fontes de variação	Contrastes	P-valor
Profundidades	0-5 vs 5-10 cm	0,0001***
	0-5 vs 10-20 cm	0,0001***
	5-10 vs 10-20 cm	0,0001***

*** Significativo a 1% de probabilidade segundo teste F.

De acordo com os resultados, o valor da acidez trocável na camada de solo superior (0-5 cm) foi menor que o observado nas camadas subsequentes (Figura 49).

Figura 49. Acidez trocável presente nas 3 camadas de solo amostradas 120 dias após aplicação dos tratamentos.

De acordo com Lopes e Guilherme (2004), a acidez trocável representa, basicamente, os íons Al^{3+} adsorvidos eletrostaticamente as superfícies do coloides minerais e orgânicos presentes no solo. Considerando que o valor médio da acidez potencial na camada superficial do solo foi cerca de 33% menor que a acidez média entre demais camadas, Isso pode ter contribuído

para que o teor de P na primeira camada de solo fosse maior que nas demais, independente da aplicação ou não do elemento. Isso porque segundo Novais e Smyth (1999), o alumínio em solução (semelhante aos íons Fe^{2+}) pode causar precipitação de fosfatos adicionados ao solo de acordo com a equação 3:

3.3.2 Micronutrientes presentes no solo 120 dias após a aplicação dos tratamentos

Na Tabela 23 e Tabela 24 foram apresentados os resultados da análise de variância e os teores médios dos micronutrientes presentes no solo 120 dias após a aplicação dos tratamentos.

- **Boro (B)**

Os teores de B no solo variaram em função da interação entre os tratamentos principais e os tratamentos secundários (Tabela 23). Para o estudo da variação nos teores do elemento no solo, foi realizado o desdobramento da interação, analisados os efeitos dos tratamentos secundários (Com e sem foliar) dentro de cada um dos tratamentos principais (Tabela 33)

Tabela 33. Análise de variância para o desdobramento da interação: efeito os tratamentos secundários dentro de cada nível dos tratamentos principais.

Fontes de variação: Desdobramento da interação A x B	P-valor
Com e sem foliar x T ₁	0,0980 ^{ns}
Com e sem foliar x T ₂	0,0207 ^{**}
Com e sem foliar x T ₃	0,6482 ^{ns}
Com e sem foliar x T ₄	0,0288 ^{ns}

^{ns}: Não significativo; ^{**} Significativo a 5% de probabilidade segundo teste F.

De acordo com os resultados, os teores de B no solo variaram significativamente entre os tratamentos T₁ e T₃ considerando as subparcelas. No T₂, as subparcelas com aplicação de micronutrientes foliares apresentaram maior teor de boro no solo. Todavia, no T₄ ocorre o inverso com as subparcelas sem aplicação de foliar apresentando maior teor de B no solo (Figura 50). Considerando o limite de interpretação proposto Raij *et al.*, (1996), ambas as

combinações A x B possuem os teores de B no solo considerados médios para a cultura da cana-de-açúcar.

Figura 50. Teores médios de B no solo (média para as 3 camadas de solo amostradas), 120 dias após a aplicação considerando a interação entre os tratamentos principais e tratamentos secundários.

- **Cobre (Cu)**

Em relação aos teores de Cu no solo, a análise de variância indicou efeito significativo apenas dos tratamentos principais sobre os teores de do elemento no solo. Para a comparação dos teores médios de Cu no solo em função dos tratamentos principais foram realizados contrastes ortogonais Tabela 34.

Tabela 34. Contrastes de medias para os teores de Cu no solo (média para as 3 camadas de solo amostradas), em função dos tratamentos principais 120 dias após a aplicação dos tratamentos.

Contrastes	P-valor
T ₁ + T ₂ vs T ₃ + T ₄	0,0001***
T ₁ vs T ₂	0,1902 ^{ns}
T ₃ vs T ₄	0,3461 ^{ns}

ns: não significativo; *** Significativo a 1% de probabilidade segundo teste F.

De acordo com os resultados, os teores médios de Cu no solo entre os tratamentos T₁ e T₂ não diferiram e foram maiores que os encontrados nos

tratamentos T₃ e T₄ que por sua vez não diferiram entre si (Figura 51). Uma possível explicação para menor disponibilidade de cobre nas parcelas adubadas com fósforo (T₃ e T₄) seria a formação de fosfato de cobre (P-Cu), o que acarretou redução na disponibilidade do elemento. Todavia, de acordo com Raij *et al.*, (1999), valores de Cu no solo acima de 0,8 mg dm⁻³ de solo são considerados altos.

Figura 51. Teores médios de Cu no solo (média para as 3 camadas de solo amostradas), 120 dias após a aplicação dos tratamentos, em função dos tratamentos principais

• Ferro (Fe)

Os teores de Fe no solo variaram em função da interação entre os tratamentos principais e tratamentos secundários (A x B) e entre os tratamentos principais e as profundidades de coleta de solo (A x C). Para o estudo dos teores de Fe no solo em função da interação A x B foi realizado o desdobramento dos níveis dos tratamentos secundários (Com e Sem foliar) dentro de cada um dos níveis dos tratamentos principais (Tabela 35).

Tabela 35. Análise de variância para o desdobramento da interação: efeito dos tratamentos secundários dentro de cada nível dos tratamentos principais.

Fontes de variação: Desdobramento da interação A x B	P-valor
Com e sem foliar x T ₁	0,0350**
Com e sem foliar x T ₂	0,3080 ^{ns}
Com e sem foliar x T ₃	0,0026***
Com e sem foliar x T ₄	0,0001***

^{ns}: não significativo; *** Significativo a 1% de probabilidade segundo teste F.

A análise dos resultados indicou que dentro dos tratamentos T₁ e T₃ as subparcelas com aplicação de micronutrientes via foliar apresentaram maior

teor de ferro no solo em comparação às subparcelas em aplicação. No T₄ ocorreu o inverso com as subparcelas sem aplicação de micronutrientes via foliar apresentando maior teor de ferro no solo. Para o T₂ não ocorreram diferenças significativas (Figura 52).

Figura 52. Teores médios de ferro no solo (média para as 3 camadas amostradas) 120 dias após a aplicação dos tratamentos considerando a interação entre os tratamentos principais e tratamentos secundários.

Para o estudo da interação tratamentos principais x profundidades de coleta de solo, foi realizada a análise de variância para o desdobramento da interação: os níveis dos tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo (Tabela 36).

Tabela 36. Análise de variância para o desdobramento da interação: efeito os tratamentos principais dentro de cada profundidade de coletada de solos.

Fontes de variação: Desdobramento da interação A(C).	P-valor
(T ₁ , T ₂ , T ₃ e T ₄) x 0-5 cm	0,0501 ^{ns}
(T ₁ , T ₂ , T ₃ e T ₄) x 5-10 cm	0,0004 ^{***}
(T ₁ , T ₂ , T ₃ e T ₄) x 10-20 cm	0,5065 ^{ns}

^{ns}: não significativo; ^{***} Significativo a 5 e 1% de probabilidade segundo teste F.

Para a comparação entre as médias dos tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solos foram realizados contrastes ortogonais (Tabela 37).

Tabela 37. Contrastes de médias para os teores de Fe no solo em função dos tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo.

Fontes de variação	P-valor
(T ₁ vs T ₂ +T ₃ +T ₄) x 0-5 cm	0,0383**
(T ₁ +T ₂ vs T ₃ +T ₄) x 0-5 cm	0,7186 ^{ns}
(T ₁ vs T ₂) x 0-5 cm	0,0059***
(T ₃ vs T ₄) x 0-5 cm	0,9474 ^{ns}
(T ₁ vs T ₂ +T ₃ +T ₄) x 5-10 cm	0,0038***
(T ₁ +T ₂ vs T ₃ +T ₄) x 5-10 cm	0,0008***
(T ₁ vs T ₂) x 5-10 cm	0,2346 ^{ns}
(T ₃ vs T ₄) x 5-10 cm	0,0099***

ns: Não significativo;*** Significativo a 1% de probabilidade segundo teste F.

De acordo com os resultados, na camada de 0-5 cm os teores ferro entre os tratamentos T₄, T₃ e T₁ não diferiram entre si e foram ambos menores que o observado para o T₂ (Figura 53a). Para a camada e 5 -10 cm os maiores valores foram obtidos no T₃, seguido pelo T₄ e pelos T₁ e T₂ que por sua vez não diferiram (Figura 53b). Na camada de 10 -20 cm, os tratamentos não diferiram em relação aos teores e ferro no solo (Figura 53c). Em ambas as interações analisadas, os valores encontram-se acima da faixa considerada alta por Raij *et al.* (1999).

Figura 53. Teores médios de Fe presentes no solo, 120 dias após a aplicação dos tratamentos, em função da interação entre os tratamentos principais e as profundidade de coleta de solo.

- **Zinco**

Os teores de Zn no solo variaram em função da interação entre os tratamentos principais e tratamentos secundários (A x B) e entre os tratamentos principais e as profundidade de coleta de solo (A x C) (Tabela 33).

Para o estudo dos teores de zinco presentes no solo no em função da interação A x B foi realizado o desdobramento os níveis dos tratamentos secundários (com e sem foliar) dentro de cada um dos níveis dos tratamentos principais (Tabela 38).

Tabela 38. Análise de variância para o desdobramento da interação: efeito os tratamentos secundários dentro de cada nível dos tratamentos principais.

Fontes de variação: Desdobramento da interação A x B	P-valor
Com e sem foliar x T ₁	0,6148 ^{ns}
Com e sem foliar x T ₂	0,0007***
Com e sem foliar x T ₃	0,4864 ^{ns}
Com e sem foliar x T ₄	0,1163 ^{ns}

^{ns}: não significativo; *** Significativo a 1% de probabilidade segundo teste F.

Os resultados da análise de variância indicaram diferença significativa nos teores de Zn do solo apenas no tratamento T₂ dentro das subparcelas sem aplicação de micronutrientes via foliar (Figura 54). Nas demais combinações, os teores de Zn no solo não diferiram.

Figura 54. Teores médios de Zn no solo, 120 dias após a aplicação dos tratamentos, considerando a interação entre os tratamentos principais e tratamentos secundários.

Para o estudo da interação tratamentos principais x profundidades de coleta de solo, foi realizada a análise de variância para o desdobramento da interação: os níveis dos tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo (Tabela 39).

Tabela 39. Análise de variância para o desdobramento da interação: efeito dos tratamentos principais dentro de cada profundidade de coletada de solo.

Fontes de variação: Desdobramento da interação A [C].	P-valor
(T ₁ , T ₂ , T ₃ e T ₄) x 0-5 cm	0,0001***
(T ₁ , T ₂ , T ₃ e T ₄) x 5-10 cm	0,0219**
(T ₁ , T ₂ , T ₃ e T ₄) x 10-20 cm	0,2005 ^{ns}

^{ns}: não significativo; *** Significativo a 5 e 1% de probabilidade segundo teste F.

Para a comparação entre as médias dos tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo foram realizados contrastes ortogonais (Tabela 40).

Tabela 40. Contrastes de médias para os teores de Zn no solo entre os tratamentos principais dentro de cada profundidade de coleta de solo.

Fontes de variação	P-valor
(T ₁ vs T ₂ +T ₃ +T ₄) x 0-5 cm	0,0001***
(T ₁ +T ₂ vs T ₃ +T ₄) x 0-5 cm	0,8587 ^{ns}
(T ₁ vs T ₂) x 0-5 cm	0,0001***
(T ₃ vs T ₄) x 0-5 cm	0,0170**
(T ₁ vs T ₂ +T ₃ +T ₄) x 5-10 cm	0,1353 ^{ns}
(T ₁ +T ₂ vs T ₃ +T ₄) x 5-10 cm	0,3266 ^{ns}
(T ₁ vs T ₂) x 5-10 cm	0,2528 ^{ns}
(T ₃ vs T ₄) x 5-10 cm	0,0062***

^{ns}: não significativo; *** Significativo a 1% de probabilidade segundo teste F.

Os resultados indicaram que na camada de 0-5 cm do solo os teores de Zn foram iguais entre os tratamentos T₄, T₃ e T₂, sendo ambos superiores ao tratamento T₁ (Figura 55a). Na camada 5-10 cm apenas o tratamento T₃ foi superior aos demais que por sua vez não diferiram entre si (Figura 55b). Para a camada de 10 a 20 cm, todos os tratamentos apresentaram a mesma concentração de Zn no solo (Figura 55c).

Figura 55. Teores médios de Zn presentes no solo, 120 dias após a aplicação dos tratamentos, em função da interação entre os tratamentos principais e as profundidades de coleta de solo.

4.4 Avaliação dos atributos qualitativos da cana-de-açúcar

A análise de variância para os atributos qualitativos obtidos na soqueira de cana-de-açúcar (4º corte) indicou não haver resposta significância para os efeitos dos tratamentos principais, tratamentos secundários e interação entre eles para as variáveis: Pol, Pureza, Fibra e ATR (Tabela 41).

Tabela 41. Análise de variância para os atributos qualitativos obtidos na terceira soca de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais e secundários.

Fontes de variação	GL	Pol	Pureza	Fibra	ATR
Blocos	4	0,0807 ^{ns}	0,4405 ^{ns}	0,0278 ^{ns}	0,1128 ^{ns}
Trat. Principais (A)	3	0,7426 ^{ns}	0,3354 ^{ns}	0,1097 ^{ns}	0,6016 ^{ns}
Trat. Secundários (B)	1	0,9863 ^{ns}	0,5272 ^{ns}	0,3228 ^{ns}	0,8630 ^{ns}
Interação (A x B)	3	0,7979 ^{ns}	0,9140 ^{ns}	0,6253 ^{ns}	0,9254 ^{ns}

^{ns}: Não significativo.

A utilização de fósforo não influenciou a variável tecnológica pureza, Pol, fibra e ATR de modo que as médias dos tratamentos que receberam fósforo (T₃ e T₄) não diferiram da média dos demais (T₁ e T₂) (Figura 56).

Figura 56. Variáveis tecnológicas obtidas na 3ª soqueira de cana-de-açúcar de em função dos tratamentos principais. (a) Pureza (b) Pol (c) Fibra (d) ART.

Da mesma forma, a média geral para cada uma das variáveis considerando os tratamentos que receberam ou não a aplicação de micronutrientes nas subparcelas também não diferiu (Figura 57).

Figura 57. Variáveis tecnológicas obtidas na terceira soqueira de cana-de-açúcar em função dos tratamentos secundários. (a) Pureza, Fibra e Pol. (b) ART.

Os resultados desse experimento não demonstraram efeito da aplicação de fósforo e micronutrientes em soqueira sobre a qualidade tecnológica da cana. Entretanto como já descrito anteriormente, canaviais bem nutridos apresentam matéria prima de melhor qualidade mediante a evidente participação dos nutrientes no desenvolvimento fisiológico normal da cultura.

De qualquer forma, algumas observações interessantes puderam ser feitas a partir dos resultados obtidos no experimento. A análise das correlações entre as variáveis tecnológicas mostrou uma correlação linear positiva e altamente significativa entre Pol (Pol % caldo) e ATR e correlação linear negativa entre fibra e o ATR (Tabela 42). Isso decorre do fato de que a fórmula para o cálculo do ATR contém duas variáveis cujos componentes dependem tanto do teor de fibra quanto do Pol do caldo. Assim, reduzindo o teor de fibra e aumentando-se o Pol do caldo, aumenta-se automaticamente quantidade de açúcar recuperável por tonelada de cana moída.

Tabela 42. Correlações de Person entre os atributos tecnológicos obtidos na terceira soca de cana-de-açúcar em função dos tratamentos principais e secundários.

	Pol	Pureza	Fibra	ATR
Pol	1,000000	0,162886	-0,364349	0,986245
P-valor		0,532200	0,150500	<0,00010
Pureza		1,000000	0,101786	0,110820
P-valor			0,697500	0,762000
Fibra			1,000000	-0,419919
P-valor				0,093300
ATR				1,000000

Valores de P-valor menores que 0,10 têm correlação entre si; se negativo, são inversamente proporcionais; se positivo, diretamente proporcionais.

5 CONCLUSÕES

- A soqueira de cana-de-açúcar responde significativamente a aplicação de P e a diferentes fontes do elemento.
- Os polifosfatos (T4) foram mais eficientes em aumentar a produtividade em comparação ao superfosfato triplo (T3).
- A utilização de fósforo, independente da fontes, foi eficiente em promover o aumento nos teores do elemento ao longo da 3 profundidades de solo amostradas.
- A utilização de fósforo não alterou as características tecnológicas soqueira de cana-de-açúcar.
- A Produtividade e os parâmetros qualitativos da soqueira de cana-de-açúcar não foram afetados significativamente pelas fontes de micronutrientes utilizadas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, C. A.; ABREU, M. F.; ANDRADE, J. C. Determinação de cobre, ferro, manganês, zinco, cádmio, cromo níquel e chumbo em solos usando solução DTPA em pH 7,3. In: RAIJ, B. van et al. (Eds.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001b. p. 240-250.

_____. Determinação do boro em água quente, usando aquecimento com microondas. In: RAIJ, B. van et al. (Eds.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001b. p. 231-239.

ALVAREZ, V.H. et al. Interpretação dos resultados de análise de solo. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.H. (eds.). **Recomendações de adubação de calagem para o Estado de Minas Gerais**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais (CFSEMG), 1999. p.25-34.

ANUÁRIO DA AGRICULTURA BRASILEIRA. **Agrianual 2012**. São Paulo: Informa Economics FNP, 2012.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES (ANFAVEA). **Anuário da indústria automobilística brasileira 2013**. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br>>. Acesso em: 25 jun. 2013.

BOAWN, L. C.; BROWN, J. C. Further evidences for a P xZn imbalance in plants. **Soil Science Society of American Proceeding**, Madison, v. 32, p. 94-97, 1968.

BULL, L.T. Nutrição mineral do milho. In: BULL, L.T.; CANTARELLA, H. **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: PATAFOS, 1993. p.63-145.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento de safra brasileira:** cana-de-açúcar, segundo levantamento. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2013.

COSTA et al. Difusão de fósforo em solos de Alagoas influenciada por fontes do elemento e pela umidade do solo. **Revista Caatinga**. Universidade Federal Rural do Semiárido.v.22, n.3, p.229-235, 2009.

DEMATTE, J. L. I. Recuperação e manutenção da fertilidade do solo. Piracicaba: **Patafós**, 2005. 24 p. (Encarte técnico, 111).

DICK, R.P; TABATABAI, M.A. Polyphosphate as sources of phosphorus for plant. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v.12, p.107-118, 1987.

DUTRA, C. V; FORMOSO, M. L. L. Considerações sobre os elementos terras-raras em apatitas. **Geochimica Brasiliensis**, Rio de Janeiro v. 9, n. 2, p.185-199, 1995.

EDWARDS, J. H.; KAMPRATH, E. J. Zinc accumulation by corn seedlings as influenced by phosphorus, temperature and light intensity. **Agronomy Journal**, Madison, v. 66, p. 479-482, 1974.

Engelstad, O. P.; Terman, G. L.(1980). Agronomic effectiveness of phosphate fertilizers. In: KHASAWNEH, F.; SAMPLE, E.; KAMPRATH, E. The Role of phosphorus in agriculture. Madison: Wisconsin. p. 559–589.

EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas:** princípios e perspectivas.Trad. e notas de E. Malavolta. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. e Editora da Universidade de São Paulo, 1975. 34p.

FRANCO, H. C. J. et al. Acúmulo de nutrientes pela cana-planta. **STAB**: açúcar, álcool e subprodutos, Piracicaba, v. 26, p. 47-51, 2008.

GOEDERT, W.J.; SOUZA, M.G.; REIN, T.A. Principais metodologias para avaliação agronômica de fontes de fósforo. Planaltina, EMBRAPA- CPAC, 1986. 23p.

GOMES, J.F.F. **Produção de colmos e exportações de macronutrientes primários por Cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*)**. 2003. 65 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/>>. Acesso em: 24 jun. 2013.

KORNDORFER, G.H. et al. Avaliação de três variedades de cana (*saccharum officinarum*) submetidas à adubação com micronutrientes. **STAB**: açúcar, álcool e subprodutos, Piracicaba, v. 14, n.1,1995. p. 23-26.

KORNDORFER, G.H. Fósforo na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ADDALLA, S. R. S. (Eds.). Fósforo na agricultura brasileira. Piracicaba: Patafós, 2004. p. 291-304.

LÁPIDO LOUREIRO, F. F. V.; MELAMED, R. O fósforo na agroindústria brasileira. In: LÁPIDO LOUREIRO, F. F. V.; MELAMED, R.; FIGUEIREDO NETO, J. (Eds.). **Fertilizantes**: agroindústria e sustentabilidade. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009. 645 p.

LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. Boletim Técnico nº 2: Interpretação de análise de solo - Conceitos e Aplicação. Associação nacional para difusão de adubos (ANDA). São Paulo, 2004. 50p.

LORENZETTI, J. M. et al. Uso de calcário e gesso em soqueira de cana-de-açúcar. **STAB: açúcar, álcool e subprodutos**, Piracicaba, v. 10, n. 3, p. 14-18, 1992.

MAÇÃS, J. E. S. **Nitrogênio nítrico e amoniacal no desenvolvimento da parte aérea de milho cultivado em Argissolo**. 2008. 59 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.

MacBEATH, T. M. et al. Polyphosphate-fertilizer solution stability with time, temperature, and pH. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 170, p. 387-391, 2007b.

MacBEATH, T. M. et al. Pyrophosphate and orthophosphate addition to soil: sorption, cation concentrations, and dissolved organic carbon. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 45, p. 237-245, 2007a.

MALAVOLTA, E. **Abc da adubação**. 5 ed. São Paulo: Ceres, 1989. 292 p.

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

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

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. San Diego: Academic Press, 1995. 889 p.

MELLIS, E. V. et al. Efeito residual da aplicação de micronutrientes em cana-de-açúcar. In: FERTIBIO 2010, Guarapari- ES. **Anais...** Guarapari, 2010. 1 CD-ROM.

MORELLI, J.; NELLI, E.; DAMATTÊ, J. L.; Efeito do gesso e do calcário nas propriedades químicas de solos arenosos álicos e na produção de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB- SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 8. 1987, Recife. **Anais...** Recife, 1987. p. 24-31.

Niemeyer, R. (1999). Cyclic condensed metaphosphates in plants and the possible correlations between inorganic polyphosphates and other compounds. In: Schröder, H. C.; Müller, W. G. (Eds.). Progress in molecular and sub cellular biology. Heidelberg: Springer- Verlag,. v. 23, p. 83-90.

NOVAIS, R & SMYTH, T.J. Fósforo em Solo e Plantas em Condições Tropicais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

OLIVEIRA, E. C. A. et al. Extração e exportação de nutrientes por variedades de cana-de-açúcar Cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 34, p. 1343-1352, 2010.

ORLANDO FILHO, J. Calagem e adubação da cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G. M. S.; OLIVEIRA, E. A. M. (Eds.). **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: FEALQ/USP, 1993. p.133-146.

ORLANDO FILHO, J.; MACEDO, N.; TOKESHI, H. Seja doutor do seu canavial. Piracicaba: PATOFOS, 1994. 16 p. (Arquivo do agrônomo, 6).

ORLANDO FILHO, J.; ROSSETTO, R.; CASAGRANDE, A.A. Cana-de-açúcar. In: FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P.; RAIJ, B.; ABREU, C.A. (Eds.). **Macronutrientes e elementos tóxicos na agricultura**. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/PATAFOS, 2001. P.355-369.

ORLANDO FILHO, J.; ROSSETTO, R.; GERALDI, R. N. Adubação potássica em cana-de-açúcar: II- Análise química do solo e diagnose foliar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB- SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 5. 1993, Águas de São Pedro. **Anais...** Águas de São Pedro: STAB, 1993. p .50-54.

Philen, O.; Lehr, J. (1967). Reactions of ammonium polyphosphates with soil minerals. Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 31, p. 196–199.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J. A., (Eds.) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônômico, 2001b. p.240-250.

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A.M.C. **Boletim técnico 100**. Campinas, Instituto Agrônômico, 1997.285 p.

RESENDE, R.H. et al. Termofosfato Yoorin na produção agrícola, absorção de fósforo e qualidade do caldo da cana-soca.In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 29. 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto, 2003. 1CD-ROM.

ROSSETTO, R. et al. Eficiência agrônômica do fosfato natural na cultura da cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB- SOCIEDADE DOS TECNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 8. 2002, Recife. **Anais...** Recife, 2002. p. 276-282.

ROSSETTO, R. et al. Potássio. In: MIRANDA-DINARDO, L. L. VASCONCELOS, A. C. M; LANDELL, M. G. A. (Eds.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2008. p.289-312.

SÁ, J.C.de M. Manejo da fertilidade do solo em sistema de plantio direto. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIM, V.; FURTINI NETO, A.E. E CARVALHO, J.G. (eds.). Interrelação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas. Lavras: SBCS. 1999. P.267-319.

SILVA, G. M. A. Controlar custos para aumentar renda. **Agroanalysis**, São Paulo, p. 16-19, jun. 2006. Caderno Especial UNICA.

SOUSA, R. T. X.; KORNDORFER, G. H. Efeito da aplicação de fertilizantes fosfatados na produtividade e variáveis tecnológicas da cana-de-açúcar. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 7, n. 12, 2012.

STUKENHOLTZ, D. P. et al. On the mechanism of phosphorus-zinc interaction in corn nutrition. **Soil Science Society of America Proceeding**, Madison, v. 30, p. 759-763, 1996.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed.2009.848p.

TASSO JUNIOR, L.C. et al. Extração de macronutrientes em cinco variedades de cana-de-açúcar na região centro-norte do estado de São Paulo. **STAB: açúcar, álcool e subprodutos**, Piracicaba, v. 25, n. 6, p. 38-42. 2007.

TORRES-DORANTE, L.O; CLAASSEN, N; STEINGROBE, B; OLFS, H.W. Hydrolysis rates of inorganic polyphosphates in aqueous solution as well as in soils and effects on P availability. **Plants Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v.168, p.352-358, 2005.

VALDERRAMA, M. et al. Doses e fontes de fósforo convencional e polimerizado na cultura do milho. In: FERTIBIO 2010, Guarapari, ES. **Anais...** Guarapari, ES, 2010. 1 CD-ROM.

VALE, F.; ARAUJO, M. A. G.; VITTI, G. C. Avaliação do estado nutricional dos micronutrientes em áreas com cana-de-açúcar. In: FERTIBIO 2008, Londrina, PR. **Anais...** Londrina, PR, 2008. 1 CD-ROM.

VILLANI, E.M.A.; BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. **Efeito de diferentes fontes de fósforo sobre sua difusão em solos**. In: Congresso Brasileiro de ciências do solo, 24.; Goiânia, 1993. Resumos. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciências do solo, 1993. P.53-54.