

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

JACQUELINE APARECIDA MALVESTITI

**EXTRATOS VEGETAIS DE CANA CRUA E A ATENUAÇÃO DA
TOXIDEZ POR ALUMÍNIO NO CRESCIMENTO INICIAL DE CANA-
DE-AÇÚCAR**

**Araras
2014**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

JACQUELINE APARECIDA MALVESTITI

**EXTRATOS VEGETAIS DE CANA CRUA E A ATENUAÇÃO DA
TOXIDEZ POR ALUMÍNIO NO CRESCIMENTO INICIAL DE CANA-
DE-AÇÚCAR**

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente (PPGAA) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Agricultura e Ambiente**.

ORIENTADOR: *Prof. Dr.* JOSÉ CARLOS CASAGRANDE

**Araras
2014**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

M262ev

Malvestiti, Jacqueline Aparecida.

Extratos vegetais de cana crua e a atenuação da toxidez por alumínio no crescimento inicial de cana-de-açúcar / Jacqueline Aparecida Malvestiti. -- São Carlos : UFSCar, 2014.
77 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2014.

1. Cana-de-açúcar. 2. Extrato vegetal. 3. Cana-de-açúcar - colheita mecanizada. 4. Toxidez por alumínio. 5. Compostos orgânicos. I. Título.

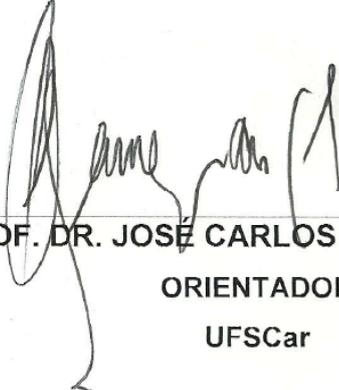
CDD: 633.61 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
DE

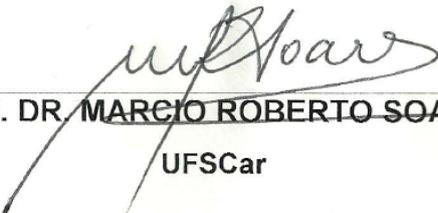
JACQUELINE APARECIDA MALVESTITI

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA
E AMBIENTE, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM *04 de
fevereiro de 2014.*

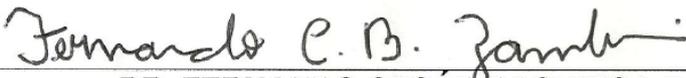
BANCA EXAMINADORA:



PROF. DR. JOSÉ CARLOS CASAGRANDE
ORIENTADOR
UFSCar



PROF. DR. MARCIO ROBERTO SOARES
UFSCar



DR. FERNANDO CESAR BACHIEGA ZAMBROSI
IAC

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela força e presença marcante e constante em minha vida.

À minha família, principalmente meus pais, minha irmã, cunhado e sobrinhos, que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando, dando suporte e incentivo.

Aos técnicos do laboratório de Química e Fertilidade do solo, João, Campanha e Roberto, pela ajuda e auxílio.

Ao meu orientador Dr. José Carlos Casagrande, pela amizade, experiência e conhecimentos transmitidos durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Marcio Roberto Soares, pela amizade, companheirismo, paciência e incentivo durante todos estes anos de convivência.

As professoras Elma Carrilho e Simone Daniela Sartorio, que colaboraram para a conclusão deste projeto.

A todos os grandes amigos do Programa de Pós-graduação em Agricultura e Ambiente da UFSCar, Paulo Vinicius da Silva, Alexandre Ferreira; Luis Felipe Arjonila, Lucas Sanglade e Ana Mayumi Hayashi. Em especial, minhas companheiras Elisângela Xavier, Carina Souza; Vivian Zambon; Fabiane Godoy e Larissa Marques Viglio, pela família que nos tornamos, compartilhando nossas vidas, nossos sonhos, nossos medos e nossos erros.

Ao Pedro Bacellar, que além de estar ao meu lado, me apoiou e incentivou para a conclusão desta etapa de minha vida.

Agradeço principalmente à Larissa Marques Viglio, com quem dividi todas as dificuldades no decorrer de nossos experimentos, que esteve sempre ao meu lado, compartilhando alegrias e angústias, pela admiração, aprendizado e grande amizade que foi construída.

À Fundação de amparo à pesquisa do estado de São Paulo, FAPESP, pelo apoio financeiro.

A todas as pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

EXTRATOS VEGETAIS DE CANA CRUA E A ATENUAÇÃO DA TOXIDEZ POR ALUMÍNIO NO CRESCIMENTO INICIAL DE CANA-DE-AÇÚCAR

RESUMO

Cerca de 70% das áreas cultivadas com cana-de-açúcar no Brasil estão sobre solos ácidos, caracterizados por possuírem severas limitações em termos de fertilidade. Os ácidos orgânicos provenientes da decomposição da palhada de cana-de-açúcar, decorrente da colheita mecanizada sem o uso de fogo, são capazes de interagir com elementos da solução do solo. Este projeto de pesquisa teve por objetivo principal a investigação da influência da adição de extratos vegetais de palhada de cana-de-açúcar na complexação do Al fitotóxico e na expansão do sistema radicular da cultura. O experimento foi conduzido em condições de laboratório e casa-de-vegetação, com os seguintes objetivos específicos: (a) caracterizar quimicamente e determinar quantitativa e qualitativamente os ácidos orgânicos presentes nos extratos vegetais da palhada de cana-de-açúcar colhida mecanicamente para selecionar o extrato vegetal com maior capacidade de neutralização do Al; (b) testar dosagens de extratos vegetais da palhada para complexação de Al tóxico; (c) determinar a profundidade de desenvolvimento radicular de variedades de cana-de-açúcar submetidas ao estresse pelo Al; (d) verificar se os extratos vegetais aplicados em colunas preenchidas com solo naturalmente ácido, cultivadas com cana-de-açúcar foram capazes de promover a elevação do pH deste solo. Os resultados das análises laboratoriais indicaram maior poder de transporte de cátions trocáveis e de neutralização do Al fitotóxico para o extrato vegetal da palhada da variedade RB867515. Os resultados do experimento em casa-de-vegetação indicaram, que as variedades de cana-de-açúcar diferiram quanto à tolerância ao Al do solo, quanto ao acúmulo de biomassa e de alumínio da parte aérea e do sistema radicular, assim como no aprofundamento das raízes. A aplicação do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 teve efeito positivo no desenvolvimento radicular das variedades, promoveu a elevação do pH do solo, amenização da toxicidade do Al e, a disponibilidade de cátions básicos até às subcamadas das colunas de solo. A dosagem do extrato vegetal, que proporcionou melhora efetiva nos atributos do solo, foi o equivalente a 21 tha^{-1} . As variedades foram classificadas, quanto a tolerância ao Al, da seguinte forma: RB966928 > RB855453 > RB867515.

Palavras-chave: extratos vegetais, cana-de-açúcar, colheita mecanizada, toxidez por Al, compostos orgânicos.

PLANT EXTRACT FROM GREEN CANE AND ATTENUATION OF TOXIC ALUMINUM IN INITIAL GROWTH OF SUGARCANE

ABSTRACT

About 70% of the area cultivated with sugarcane in Brazil are on acid soils, characterized by having severe limitations in terms of fertility. Organic acids from residues decomposition of sugarcane, due to mechanized harvest without the use of fire, are able to interact with elements of the soil solution. This research project was aimed at investigating the influence of the addition of plant extracts residue of sugarcane in the complexation of Al phytotoxic and expansion of the root system of the crop . The experiment was conducted in laboratory and greenhouse, with the following specific objectives: (a) characterize chemically and determine qualitatively and quantitatively the organic acids present in plant extracts of the residue of sugarcane harvested mechanically to select the plant extract with greater neutralizing capacity of Al; (b) test doses of plant extracts of of sugarcane for complexation of toxic Al; (c) determine the depth of root development of varieties of sugarcane under conditions of high Al saturation; (d) verify that the plant extracts applied on columns filled with soil naturally acid, cultivated with sugar cane were able to promote the elevation of the pH of soil. The results of laboratory analyzes of plant extracts showed greater power to carry exchangeable cations along the soil profile and neutralizing Al phytotoxic to the plant extract of the residue variety RB867515. The results of the experiment at home a greenhouse indicated that the varieties of sugarcane differed in Al tolerance of the soil, on the accumulation of biomass and aluminum aerial part and root system, as well as deepening the roots. The plant extract residue of variety RB867515 had a positive effect on root development of varieties, in raise soil pH, alleviating Al toxicity and the availability of basic cations to the sublayers of the soil columns. The dosage of the plant extract, which promoted effective improvement in soil properties, was the equivalent of 21 tha^{-1} . The varieties were classified as tolerance to Al, as follows : RB966928 > RB855453 > RB867515.

Keywords: plant extracts, sugarcane, mechanized harvest, Al toxicity, organic compounds.

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Constantes de estabilidade entre alguns ácidos orgânicos e alumínio..... | 29 |
| Tabela 2. Resultados das análises química e granulométrica do LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico usado no experimento..... | 35 |
| Tabela 3. Adubações de plantio e de cobertura de colunas de LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico cultivadas com variedades de cana-de-açúcar..... | 38 |
| Tabela 4. Dosagens de extratos vegetais adicionadas às colunas de solo equivalentes a quantidades crescentes de deposição de palhada de cana-de-açúcar no campo..... | 39 |
| Tabela 5. Tratamentos envolvendo as variáveis dose de extrato vegetal e profundidade da coluna de solo cultivada com as variedades..... | 40 |
| Tabela 6. Quadro de análise de variância da biomassa de variedades de cana-de-açúcar submetidas à adição de extratos vegetais de palhada de colheita mecanizada em colunas de solo com alta saturação por Al fitotóxico..... | 41 |
| Tabela 7. Volumes de NaOH consumidos na titulação, teores de cátions hidrossolúveis, somatório de cátions e valores de pH e de condutividade elétrica (CE) nos extratos dos resíduos vegetais de três variedades de cana-de-açúcar..... | 44 |
| Tabela 8. Médias do conteúdo de ácidos málico, acético, fumárico, succínico, cítrico e transaconítico presentes nos extratos vegetais de três variedades de cana-de-açúcar..... | 45 |
| Tabela 9. Resumo da análise de variância (ANOVA) do pH, teores de cátions e Al da solução do solo nas diferentes camadas (0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm) (LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico) submetido à dosagens do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515..... | 47 |
| Tabela 10. Índice de tolerância de variedades de cana-de-açúcar ao alumínio fitotóxico..... | 47 |
| Tabela 11. Resumo da análise de variância (ANOVA) de altura média, matéria seca e teor de alumínio da parte aérea de variedades de cana-de-açúcar, cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 de cana-de-açúcar colhida mecanicamente..... | 48 |
| Tabela 12. Altura média de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens de extrato vegetal de palhada de cana-de-açúcar..... | 48 |
| Tabela 13. Produção de matéria seca da parte aérea de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens de extrato vegetal de palhada de cana-de-açúcar..... | 48 |
| Tabela 14. Teor de alumínio na parte aérea de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens de extrato vegetal de palhada de cana-de-açúcar, em função da interação entre as variedades testadas e as dosagens de extrato vegetal aplicadas nas colunas..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Tabela 15. Resumo da análise de variância (ANOVA) de produção de matéria seca, volume e teor de alumínio do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar (camada 0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm), cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 de cana-de-açúcar colhida mecanicamente | 49 |
| Tabela 16. Produção de matéria seca do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens de extrato vegetal de palhada de cana-de-açúcar..... | 50 |
| Tabela 17. Volume do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar (camada 0-20; 20-40; 40-60 e 60-80cm), cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens de extrato vegetal de palhada de cana-de-açúcar | 50 |
| Tabela 18. Teor de alumínio do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens de extrato vegetal de palhada de cana-de-açúcar | 50 |
| Tabela 19. Resumo da análise de variância (ANOVA) do COD, pH, teores de cátions e ânions da solução do solo nas diferentes camadas (0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm) (LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico) submetido à dosagens do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 de cana-de-açúcar colhida mecanicamente..... | 51 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Sistema radicular de uma planta jovem de cana-de-açúcar, mostrando raízes crescendo a partir dos toletes e raízes emergindo da base dos brotos novos (adaptado de Vasconcelos; Garcia, 2005)..... | 20 |
| Figura 2. Sistema radicular de uma touceira de cana-soca bem estabelecida (adaptado de Beauclair; Scarpari, 2007)..... | 21 |
| Figura 3. (A) Representação da distribuição do sistema radicular de cana planta comparada à distribuição em cana-soca (B)..... | 22 |
| Figura 4. Formas de complexação do Al com a matéria orgânica do solo: (a) pontes de água; (b) atração eletrostática; (c) troca de ligantes; e (d) quelação (adaptado de Vance et al., 1995)..... | 27 |
| Figura 5. Obtenção do extrato vegetal da palhada de cana de açúcar: (a) obtenção de palhada de cana-de-açúcar logo após a colheita; (b) material vegetal moído e passado em peneira de malha de 1 mm; (c) material vegetal peneirado; (d) solução Material vegetal + água destilada; (e) Filtragem da solução em papel filtro quantitativo; e (f) obtenção do extrato vegetal..... | 31 |
| Figura 6. Cromatograma do padrão de ácidos orgânicos, sendo 1- oxálico, 2-málico, 3-acético, 4-cítrico, 5-succínico, 6-fumárico e, 7-trans-aconítico..... | 34 |
| Figura 7. A) Mini-toletes das variedades de cana-de-açúcar. B) Pré-germinação dos mini-toletes de cana-de-açúcar em bandejas contendo vermiculita expandida média..... | 35 |
| Figura 8. A) Ilustração esquemática do cilindro de cultivo para avaliação das variedades submetidas ao estresse por Al do solo. B) Disposição dos cilindros na casa-de-vegetação..... | 37 |
| Figura 9. A) Aferição da altura média das plantas antes da realização do corte. B) Aferição da altura média das plantas após o corte..... | 42 |
| Figura 10. Corte da parte aérea das variedades de cana-de-açúcar..... | 42 |
| Figura 11. Processo de desmontagem das colunas (A), separação das raízes (B, C, D e E) e medidas de biomassa e do volume do sistema radicular das variedades de cana-de-açúcar (F, G e H)..... | 43 |
| Figura 12 A, B e C. Cromatogramas dos ácidos orgânicos presentes no extrato vegetal da variedade RB855453 (A), RB966928 (B) e RB867515 (C)..... | 46 |
| Figura 13 A e B. Teor de Carbono orgânico dissolvido (A) e pH da solução do solo (B) nas diferentes camadas (0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm) (LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico) submetido à dosagens do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 de cana-de-açúcar colhida mecanicamente..... | 52 |
| Figura 14 A, B e C. Teores de K (A), Ca (B) e Mg (C) da solução do solo nas diferentes camadas (0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm) (LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico) submetido à dosagens do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 de cana-de-açúcar colhida mecanicamente..... | 53 |
| Figura 15. A e B. Teor de Al (A) e H + Al (B) da solução do solo nas diferentes camadas (0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm) (LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico) submetido à dosagens do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 de cana-de-açúcar colhida mecanicamente..... | 54 |

SUMÁRIO

_Toc385092699

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 HIPÓTESES | 16 |
| 1.2 OBJETIVOS | 17 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 17 |
| 2.1 A cana-de-açúcar | 17 |
| 2.1.1 Aspectos gerais..... | 17 |
| 2.1.2 Variedades..... | 18 |
| 2.1.3 Sistema radicular da cana-de-açúcar..... | 19 |
| 2.2 Acidez do solo e o efeito do alumínio (Al) sobre o desenvolvimento vegetal | 22 |
| 2.3 Sistema de produção conservacionista da cana-de-açúcar..... | 24 |
| 2.4 Resíduos vegetais na atenuação da acidez do solo e na complexação do Al tóxico..... | 26 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 29 |
| 3.1 Caracterização química dos extratos vegetais..... | 29 |
| 3.1.1 Escolha das variedades de cana-de-açúcar..... | 30 |
| 3.1.2 Obtenção e caracterização química dos extratos vegetais..... | 30 |
| 3.1.3 Determinações analíticas dos compostos hidrossolúveis presentes nos extratos vegetais..... | 31 |
| 3.2 Efeitos da aplicação de extrato vegetal no desenvolvimento da cana-de-açúcar..... | 34 |
| 3.2.1 Condução do experimento..... | 34 |
| 3.2.2 Pré-germinação dos mini-toletes de cana-de-açúcar com gema única..... | 35 |
| 3.2.3 Incubação do solo..... | 36 |
| 3.2.4 Determinação da capacidade de campo | 36 |
| 3.2.5 Preparo e montagem das colunas | 37 |
| 3.2.6 Plantio e adubação..... | 38 |
| 3.2.7 Monitoramento da umidade do solo..... | 38 |
| 3.2.8 Dosagens de extratos vegetais da palhada de cana-de-açúcar..... | 39 |
| 3.2.9 Tratamentos..... | 40 |
| 3.2.10 Delineamento experimental..... | 40 |
| 3.2.11 Avaliações | 41 |
| 4. RESULTADOS | 44 |

| | |
|---|----|
| 4.1 Caracterização química e determinação dos ácidos orgânicos presentes nos extratos vegetais de variedades de cana-de-açúcar..... | 44 |
| 4.1.1 Ácidos orgânicos tituláveis (AOT), soma de cátions (Σ Ca, Mg e K), pH e condutividade elétrica (CE)..... | 44 |
| 4.1.2 Análise de ácidos orgânicos por cromatografia líquida de alta eficiência | 44 |
| 4.2 Efeitos da aplicação de extrato vegetal no desenvolvimento da cana-de-açúcar..... | 47 |
| 4.2.2 Parte aérea | 47 |
| 4.2.2 Sistema radicular | 49 |
| 4.2.7 Solução do solo | 51 |
| 4.2.7.1 COD, pH, cátions e Al | 51 |
| 5. DISCUSSÃO | 55 |
| 5.1 Caracterização química e determinação dos ácidos orgânicos presentes nos extratos vegetais de variedades de cana-de-açúcar..... | 55 |
| 5.1.2 Análise de ácidos orgânicos por cromatografia líquida de alta eficiência | 57 |
| 5.2 Efeitos da aplicação de extrato vegetal no desenvolvimento da cana-de-açúcar..... | 58 |
| 5.2.1 Índice de tolerância ao alumínio | 58 |
| 5.2.2 Parte Aérea e Sistema radicular | 58 |
| 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS | 64 |
| 7. CONCLUSÕES | 65 |
| 8. REFERÊNCIAS | 66 |

1. INTRODUÇÃO

O atual cenário econômico tem gerado uma demanda crescente por fontes renováveis de energia, ao mesmo tempo em que mostra a falta de sustentabilidade do uso de combustíveis fósseis. Além de ser o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), o Brasil é o único país do mundo a implantar um combustível alternativo ao petróleo em larga escala (CRESPI et al., 2011).

De acordo com o último levantamento da Companhia Nacional de Abastecimento (2013), as estimativas apontam para uma produção de cerca de 594,1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, registrando aumento de 11,5% em relação à safra anterior. Espera-se um aumento de 6,88% na produção de açúcar. A previsão é que serão produzidos na safra atual cerca de 40,97 milhões de toneladas. A produção de etanol terá aumento de 14,99% em relação à safra anterior. Para o ciclo atual, estão estimados 27,17 bilhões de litros, contra 22,7 bilhões de litros na safra anterior (CONAB, 2013).

Para atender às perspectivas de crescimento na produção da cultura, de demanda de novas fontes de energia renovável (biomassa e biocombustível) e do mercado de carbono, as áreas de produção de cana-de-açúcar continuam com progressivo aumento.

As regiões de expansão do plantio de cana-de-açúcar (Centro-Sul e Centro-Oeste do país) abrangem tanto territórios com ambientes de produção adequados quanto áreas de difícil manejo da cultura, com solos de baixa fertilidade e períodos de deficiência hídrica bastante pronunciada.

O conhecimento dos fatores edáficos é fundamental para julgar o potencial de produção agrícola e para alocar de maneira mais eficiente as variedades de cana-de-açúcar nos ambientes mais promissores (LEPSCH, 1987; LANDELL et al., 2003).

Nas regiões tropicais, os atributos químicos do solo são os componentes que mais interferem na produtividade das culturas. Principalmente nas condições de Cerrado, região em que se espera maior expansão da canavicultura, os solos se caracterizam por possuírem severas limitações em termos de fertilidade e por apresentarem reação ácida, que promove a remoção de cátions básicos do solo e sua substituição por Al^{3+} e H^+ . Disto resultam a alta saturação por Al (m%), a toxidez por Al, Mn e H, a baixa reserva de nutrientes (baixa saturação por bases (V%)), a baixa capacidade de troca de cátions (CTC), a deficiência de N, K, Ca, Mg, Mo e a baixa disponibilidade de P, devido a adsorção do fosfato por oxihidróxidos de Fe e Al, que limitam a produtividade agrícola (SOBRAL; GUIMARÃES, 1992;

ABREU; MURAOKA; LAVORANTE, 2003; LANDELL et al., 2003; ROSSETTO et al., 2004).

A política pública de proibição da despalha à fogo e o desenvolvimento de máquinas colhedoras têm proporcionado um crescimento no Brasil da cana colhida "crua", com manutenção da palhada sobre a superfície, reduzindo a erosão e aumentando o teor de matéria orgânica do solo (MOS) (VASCONCELOS, 2002). O sistema possui certa similaridade com a prática do plantio direto (MARTINS et al., 1999), com reduzido revolvimento de solo. Apesar da sulcagem do solo, o reduzido preparo, contando com a presença de palhada como cobertura e o menor trânsito de maquinário, garantem melhores produtividades e pouca degradação do solo (GARBIATE et al., 2011), além de reduzir a erosão, minimizar a perda da matéria orgânica e conservar a umidade, contribuindo para a sustentabilidade da produtividade agrícola.

O aumento no teor de matéria orgânica do solo, devido ao ambiente menos oxidativo e ao menor contato dos resíduos vegetais com o solo altera profundamente vários processos químicos, influenciando o pH, a capacidade de troca de cátions, a adsorção de fósforo, a toxidez por Al e a mobilidade de cátions polivalentes. A redução da toxidez de Al por ácidos orgânicos de resíduos vegetais ocorre por hidrólise devido ao aumento de pH e complexação por ácidos orgânicos, oriundos da decomposição do material vegetal.

1.1 HIPÓTESES

A adição de resíduos vegetais provenientes da colheita mecanizada da cana-de-açúcar traz evidentes benefícios para a conservação do solo. Por tratar-se de prática agrícola recente no setor sucroenergético, ainda não estão esclarecidos os prováveis efeitos sobre os atributos químicos do solo decorrentes da colheita sem despalha a fogo. Nesse sentido, as hipóteses deste trabalho foram:

- i) As variedades de cana-de-açúcar apresentam diferenças quanto a composição e conteúdo de ácidos e substâncias orgânicas responsáveis pela movimentação de cátions básicos no perfil do solo, pelo aumento do pH e pela atenuação do efeito fitotóxico do Al^{3+} .
- ii) Em um solo ácido e com alta saturação por Al (m%), a adoção de um sistema de manejo que promova o aumento dos teores de matéria orgânica em superfície, pode levar à complexação do Al trocável na solução do solo pelos ácidos orgânicos liberados durante sua

decomposição, diminuindo assim, o impedimento químico ao desenvolvimento radicular das plantas.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste estudo foram: (a) caracterizar quimicamente e determinar quantitativa e qualitativamente os ácidos orgânicos presentes nos extratos vegetais da palhada de cana-de-açúcar colhida mecanicamente para selecionar o extrato vegetal com maior capacidade de neutralização do Al; (b) testar dosagens de extratos vegetais da palhada para complexação de Al tóxico; (c) determinar a profundidade de desenvolvimento radicular de variedades de cana-de-açúcar submetidas ao estresse pelo Al; (d) verificar se os extratos vegetais aplicados em colunas preenchidas com solo naturalmente ácido, cultivadas com cana-de-açúcar foram capazes de promover a elevação do pH e a mobilização de cátions ao longo do perfil do solo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A cana-de-açúcar

2.1.1 Aspectos gerais

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é uma planta tropical pertencente à família das gramíneas ou poáceas, com habilidade única de estocar sacarose nos colmos. Possui metabolismo fotossintético do tipo C4, o que lhe confere maior eficiência de aproveitamento de luz, água e nitrogênio do que plantas com metabolismo fotossintético do tipo C3.

De forma geral, a planta é constituída de um sistema radicular, de colmos, onde a sacarose é predominantemente estocada, e das folhas dispostas ao redor da cana, nos nódulos inter colmos e também na parte superior da planta onde se localiza a gema apical (palmito) (MANTELATTO, 2005).

A parte morfológica da cana-de-açúcar de interesse comercial é o colmo, que possui sacarose industrializável. A composição química dos colmos é extremamente variável em função de diversos fatores como: genótipo ou variedade, idade fisiológica, condições climáticas durante o desenvolvimento e maturação, propriedades físicas, químicas e

microbiológicas do solo, tipo de cultivo, entre outros (MARQUES M.O.; MARQUES T.O.; TASSO JÚNIOR, 2001).

As características inerentes à cada genótipo definem o número de colmos por planta, assim como a altura e o diâmetro do colmo, o comprimento e a largura das folhas e a arquitetura da parte aérea (RODRIGUES, 1995).

As regiões típicas da canavieira são Sudeste, Centro-Oeste, Sul e Nordeste, permitindo ao país duas safras ao ano e, conseqüentemente, produção de açúcar e etanol para os mercados interno e externo.

A relevância da cana-de-açúcar no agronegócio brasileiro é indiscutível. Considerando toda a receita com as exportações de açúcar, etanol e melaço, a agroindústria canavieira eleva sua participação no total exportado pelo país a cada ano.

2.1.2 Variedades

Dentre os fatores de produção da cana-de-açúcar, a variedade ocupa lugar de destaque, já que é o único fator capaz de proporcionar aumentos significativos na produtividade industrial, sem aumentos nos custos de produção (ALONSO, 2009).

Na cultura da cana-de-açúcar, um ambiente para cultivo de uma variedade pode ser considerado como sendo o conjunto de diversos fatores (ano de plantio, local, mês de plantio, mês de corte, etc.) que influenciam na sua produtividade agrícola e industrial (CALHEIROS; BARBOSA, 1996).

As variedades não são descritas exclusivamente a partir de suas características morfológicas, mas também por características agroindustriais, como: precocidade, capacidade de brotação e de perfilhamento, adaptabilidade à época de plantio, restrição ao ambiente de produção, tolerância à seca, produtividade e qualidade. Muitas dessas características exercem e/ou sofrem influência de atributos do sistema radicular da cultura.

Após estudar a interação de seis cultivares de cana-de-açúcar em diferentes ambientes (solo x clima), Dias (1997) constatou que, em solo eutrófico, com variação textural no perfil e com regime hídrico não limitante ao desenvolvimento das plantas, todas as variedades estudadas expressaram plenamente o potencial genético. Entretanto, em solo álico, sem relação textural e com elevada drenagem que conduziu a regime hídrico limitante, os cultivares estiveram muito aquém de seu potencial genético de produtividade.

Atualmente, o Brasil possui quatro principais Programas de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar [Programa de Melhoramento Genético da Cana-de-Açúcar (PMGCA) da

Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA) - variedades RB; Centro de Tecnologia Canavieira (CTC - antiga Copersucar) – variedades SP/CTC; Instituto Agrônomo de Campinas – variedades IAC; CanaVialis – variedades CV], que disponibilizam as atuais e as futuras variedades para cultivo e que detêm importantes informações sobre seu potencial de produção, tais como os aspectos fitotécnicos (altura, diâmetro de colmo, brotação, perfilhamento, fechamento, florescimento, tombamento, resistência à pragas e doenças, etc.) e variáveis tecnológicas (teores de sacarose e de fibras) (HOFFMAN et al., 2008). No entanto, abordam com muita superficialidade os fatores ligados aos atributos do solo, baseando-se em frágeis aproximações para ambientes de produção, empregando os termos “ambiente favorável e desfavorável”, “baixa-média-alta exigência em ambientes”, “baixa-média-alta exigência em fertilidade do solo”, etc..

2.1.3 Sistema radicular da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar possui um sistema radicular bem amplo e desenvolvido, do tipo fasciculado, que permite a exploração das camadas mais profundas do solo, diferentemente das culturas anuais. Trata-se de uma cultura semi-perene com ciclo de 5 a 7 anos, cujo desenvolvimento radicular em maior profundidade é fundamental para o acréscimo de produtividade em solos de baixa fertilidade e de baixa retenção de umidade (BALL-COELHO, 1992; DEMATTÊ, 2005; BEAUCLAIR; SCARPARI, 2007).

O desenvolvimento do sistema radicular tem influência direta sobre alguns fatores determinantes para a produtividade final, tais como: resistência à seca, eficiência na absorção dos nutrientes do solo, tolerância ao ataque de pragas do solo, capacidade de germinação e/ou brotação, porte, tolerância à movimentação de máquinas, etc. (VASCONCELOS et al., 2003; COSTA et al., 2007).

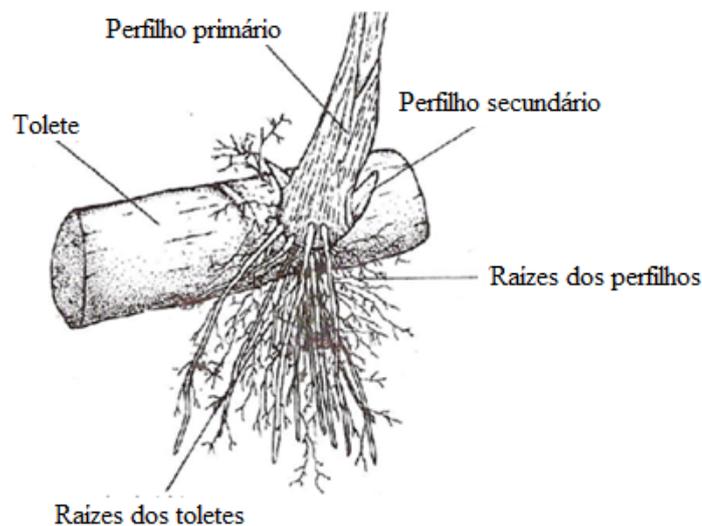
Condições desfavoráveis do solo que restringem o desenvolvimento de raízes constituem a razão mais comum pela qual as culturas não conseguem expressar todo seu potencial genético de produtividade.

O estresse químico deve-se à deficiência de nutrientes, ao desbalanço nutricional ou à presença de elementos tóxicos na solução do solo. Alterações estruturais nas raízes em resposta à seca são permanentes e o restabelecimento do crescimento após a rehidratação envolve, usualmente, a formação de novas raízes laterais. Além disso, o sistema radicular de cana-de-açúcar é essencial para a regeneração das soqueiras após a colheita (ALVAREZ; CASTRO; NOGUEIRA, 2000).

As primeiras raízes que se desenvolvem após o plantio da cana-de-açúcar são as de fixação, originadas dos primórdios radiculares situados na zona radicular do tolete plantado (BACCHI, 1983; CASTRO; KLUGE, 2001). Durante aproximadamente 30 dias de brotação das gemas, a planta vive das reservas de nutrientes contidas no tolete e, parcialmente, do suprimento de água e nutrientes proporcionados por essas raízes de fixação (BACCHI, 1983; BLACKBURN, 1984). As raízes do tolete têm alongação inicial de poucos mm d^{-1} , podendo alcançar 20 mm d^{-1} em poucos dias após a germinação, sob condições favoráveis. Raízes dos brotos crescem mais rapidamente, com taxas máximas de alongação de 80 mm d^{-1} , mas em curtos períodos. As taxas de crescimento médio para raízes dos brotos após 10 dias são de 40 mm d^{-1} , em solos arenosos, e de 28 mm d^{-1} em solos argilosos (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005).

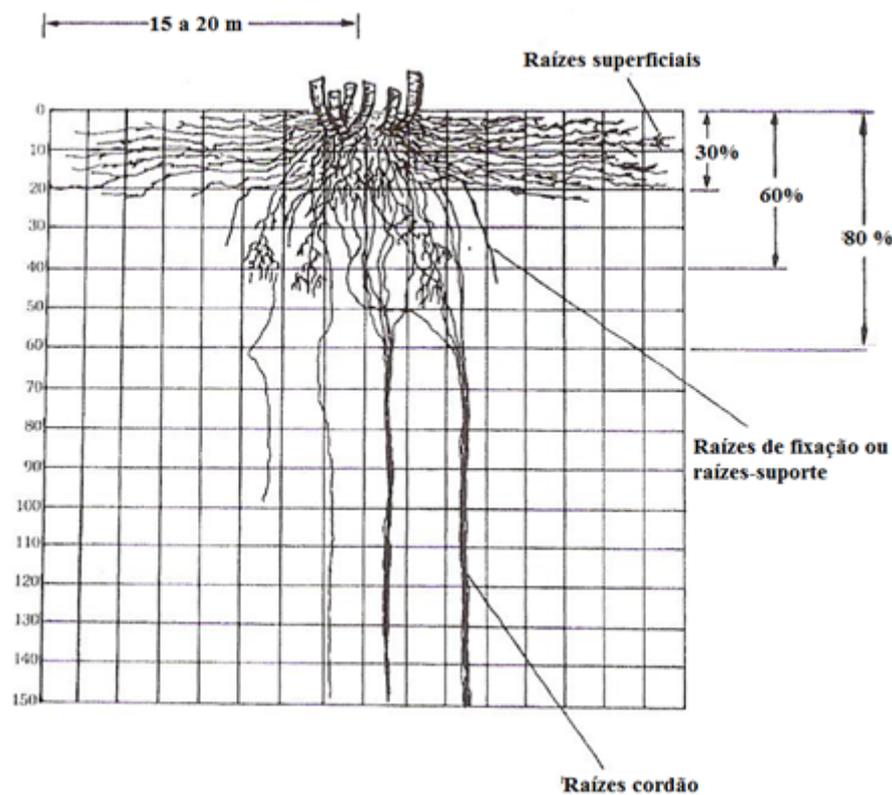
As raízes dos colmos emergem de uma região radicular da gema ou nó, localizada acima da cicatriz da bainha da folha no colmo (THORBURN, 2003). Normalmente são finas e altamente ramificadas, sustentando o crescimento da planta nas primeiras semanas após a germinação, continuando a crescer por um período de 6 a 15 dias após o plantio. A maioria entra em senescência, desaparecendo por volta de 60 a 90 dias (THORBURN, 2003). O segundo tipo de raízes são as raízes dos perfilhos, que emergem da base do novo perfilho 5 a 7 dias após o plantio, sendo mais grossas e pontiagudas que as raízes do colmo (Figura 1).

Figura 1. Sistema radicular de uma planta jovem de cana-de-açúcar, mostrando raízes crescendo a partir dos toletes e raízes emergindo da base dos brotos novos (adaptado de Vasconcelos; Garcia, 2005)



Nos primeiros 30 a 40 cm do perfil do solo concentram-se as raízes superficiais ou fibrosas, que são bem ramificadas e extremamente absorventes (Figura 2). As raízes de fixação suprirão os rebentos que brotarão das gemas (ALVAREZ; CASTRO; NOGUEIRA, 2000) e atingirão profundidades maiores, ultrapassando facilmente 50 cm de profundidade. Finalmente, atingindo maiores profundidades, estão as raízes-cordão, as quais são muito importantes na absorção de água e justificam a exigência de solos profundos para o cultivo da cana-de-açúcar (SMITH; LAWN; NABLE, 1999).

Figura 2. Sistema radicular de uma touceira de cana-soca bem estabelecida (adaptado de Beauclair; Scarpari, 2007)



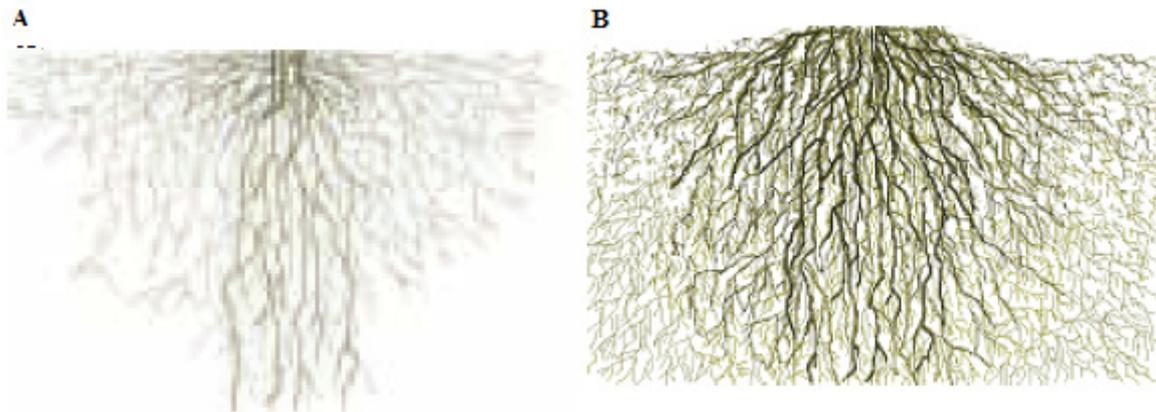
Todos os fatores que favorecem a expansão do sistema radicular são importantes para aumentar a produtividade da cana-de-açúcar, já que seu caráter semi-perene permite e exige que a planta explore maior volume de solo em maiores profundidades.

De acordo com Ball-Coelho *et al.* (1992), aproximadamente 50% da massa seca das raízes ficam nos primeiros 25 cm de profundidade e 90% nos primeiros 60 cm. Segundo Câmara (1993), a cana planta em idade de corte apresenta cerca de 70% do sistema radicular concentrado nos primeiros 50 cm do solo, constituído por raízes tipicamente fibrosas. Na cana

soca, entre 62% e 69% da matéria seca de raízes localizam-se nos primeiros 50 cm, com 38% a 48% das raízes vivas nos primeiros 30 cm (BALL-COELHO et al., 1992). Já Korndörfer; Primavesi; Deuber (1989), encontraram de 85 a 92% das raízes de cana soca na camada de 0 a 40 cm de solo.

Segundo Ball-Coelho *et al.* (1992), a massa total radicular e o comprimento das raízes vivas na cana soca são superiores aos da cana planta (Figura 3). Similarmente, Vasconcelos (2002) constatou um desenvolvimento acumulativo do sistema radicular, com aumento da massa seca de raízes ao longo dos ciclos da cultura.

Figura 3. (A) Representação da distribuição do sistema radicular de cana planta comparada à distribuição em cana-soca (B)



Fonte: Vasconcelos; Garcia, 2005.

2.2 Acidez do solo e o efeito do alumínio (Al) sobre o desenvolvimento vegetal

A acidez do solo é um dos fatores que mais limita a produtividade das culturas em várias partes do mundo. Estimativas sugerem que aproximadamente 50% dos solos disponíveis em todo mundo para a produção agrícola sejam ácidos (KOCHIAN et al., 2002).

Os solos tropicais e subtropicais caracterizam-se pelo alto grau de intemperismo, devido à elevada precipitação e excelente capacidade de infiltração de água no perfil, e pela pobreza do material de origem (caulinita e/ou óxidos de ferro e alumínio). Devido ao elevado regime de precipitação, nutrientes solúveis como cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e outros elementos básicos são facilmente lixiviados. Quando a remoção de cátions básicos é maior que sua taxa de liberação pelo intemperismo do material de origem, o pH do solo diminui, tornando-se ácido (ECHART; CAVALLI-MOLINA, 2001; CUSTÓDIO et al., 2002;

FREITAS et al., 2006). Com isso, o hidrogênio (H^+) passa a atuar sobre a estrutura cristalina dos minerais liberando íons de alumínio (Al^{3+}) na solução do solo, ficando disponível para as plantas e podendo causar toxidez (ARAÚJO, 2003; MALAVOLTA, 2006).

O efeito da acidez do solo sobre as plantas provém principalmente das alterações químicas, o que inclui a solubilização do Al, do Mn e do Fe na solução do solo, atingindo níveis tóxicos, e a complexação de alguns elementos essenciais, sendo o fósforo (P) o mais limitado (KOCHIAN, 1995). A mineralização da matéria orgânica por microrganismos do solo resulta na liberação de nitrato e hidrogênio, ocasionando também a diminuição do pH.

O território brasileiro é composto por cerca de 70% de solos ácidos e, em 40% desta área, a produtividade das culturas está reduzida à metade (QUAGGIO, 2000). Em seu estudo, Abreu Jr.; Muraoka; Lavorante, (2003) mostraram que 75% dos valores de pH da camada superficial de solos de 26 regiões brasileiras estiveram entre 3,78 e 5,52 e que o Al^{3+} foi o cátion trocável predominante em mais de 30% dos solos com pH inferior a 5,6.

O Al é um constituinte natural do solo, sendo que a maior parte está presente na fase sólida, na forma de minerais secundários, como aluminossilicatos ou óxidos e hidróxidos (SPOSITO, 1996). Em solos ácidos, hidrogênio (H^+) atua sobre os minerais liberando íons Al, ou seja, os hexahidratos de Al ($Al(H_2O)_6^{3+}$), normalmente denominados Al^{3+} livre (DRISCOLL; SCHECHER, 1988; WRIGHT, 1989; ŠČANČAR; MILAČIČ, 2006), tornando-o disponível para as raízes em concentrações elevadas que resultam em injúrias para as plantas (KOCHIAN, 1995).

O Al trivalente permanece retido pelas cargas negativas dos colóides do solo, em equilíbrio com o Al^{3+} em solução. Dessa forma, a quantidade de Al^{3+} em solução aumenta com a acidez do solo (BOHNEN, 1995). Outro fator que afeta o crescimento das plantas é a atividade de H^+ na solução do solo, a qual é alta em solos ácidos. Esta situação é refletida pelo baixo valor do pH (usualmente entre 4,5 e 5,5) e pela alta porcentagem de saturação de Al no complexo de troca, o que é prejudicial para o crescimento do sistema radicular (ECHART; CAVALLI-MOLINA, 2001).

Por ser um elemento de pouca mobilidade dentro da planta (EPSTEIN, 1974), os efeitos do Al são mais evidentes no sistema radicular, onde provoca a má formação da estrutura das raízes, induzindo ao sintoma inicial mais drástico da toxidez (CAMBRAIA et al., 1990; SANDERSON; STAIR; HUSSEY, 1997; ILLÉS et al., 2006).

O principal local da ação tóxica do Al é o ápice da raiz (CONCEIÇÃO, 2006; WANG et al., 2006; HARTWIG, et al., 2007), nas paredes celulares da epiderme (PEIXOTO et al., 2007), na coifa e na mucilagem radicular (GUIMARÃES et al., 2006; FINATTO et al., 2007).

Assim, a parte mais sensível da raiz é a região meristemática, o que compromete o alongamento celular, sendo este o primeiro local onde a toxidez do Al induz injúrias na planta (CHAFFAI; MARZOUK; FERJANI, 2005; ROSSIELLO; JACOB NETTO, 2006), devido à redução da divisão celular (KOCHIAN, 1995; ECHART; CAVALLI-MOLINA, 2001; SILVA et al., 2007).

Kofler (1986) comparou a profundidade do sistema radicular de diversas culturas em diferentes partes do mundo, observou que no Brasil a profundidade do sistema radicular da cana-de-açúcar atinge 60 cm, contra 160-200 cm em outros países. Em um LATOSSOLO VERMELHO Álico, isto é, com saturação por Al maior do que 50% ($m\% > 50$), Alvarez; Castro; Nogueira (2000), encontraram 90% da biomassa radicular da cana-de-açúcar nos primeiros 30 cm, aos 10,6 meses do plantio.

Há relatos de grande variação entre os cultivares com respeito à capacidade de expansão e aprofundamento do sistema radicular, principalmente em resposta ao estresse causado pelo Al (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN 2005; VASCONCELOS; GARCIA, 2005).

2.3 Sistema de produção conservacionista da cana-de-açúcar

Na agricultura tradicional, o cultivo da cana-de-açúcar inicia-se com o preparo do solo, que consiste no revolvimento das camadas superficiais para o controle das plantas daninhas e quebra da compactação. O revolvimento do solo promove aeração intensa e imediata, acelerando a decomposição e resultando em declínio da concentração da MOS (LAL, 2004). Com isso, há o comprometimento da reestruturação do solo, bem como o desencadeamento de rearranjos erráticos de agregados que irão favorecer o aumento da resistência do solo à penetração (NEVES; FELLER; KOUAKOUA, 2006).

Durante muito tempo, quase toda a área cultivada com cana-de-açúcar esteve submetida à queima da biomassa foliar, visando facilitar as operações de corte, carregamento e transporte dos colmos. A queima acarreta emissões de gases como CO₂, CH₄ e N₂O, principais responsáveis pelo efeito estufa. Esta prática também libera fuligem, que causa incômodo e possíveis danos à saúde das populações circunvizinhas da lavoura (CANÇADO et al., 2006).

Motivado pela legislação ambiental, o manejo da cultura de cana-de-açúcar passou por muitas transformações nos últimos anos, especialmente no Estado de São Paulo, que prevê a redução progressiva da queima dos canaviais até sua completa extinção em 2031, conforme

Lei Estadual 11241/02, regulamentada pelo Decreto Estadual 47.700/03 (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE, 2013). Em 2007, o governo do Estado de São Paulo assinou o Protocolo Agro-Ambiental, com o objetivo de antecipar o fim das queimadas para 2014 nas áreas mecanizáveis, e para 2017 em 100% dos canaviais, incluindo as áreas não mecanizáveis (UNICA, 2013).

A mudança no sistema de colheita da cana queimada e manual para a cana colhida mecanicamente e sem queima prévia, desencadeia uma série de mudanças no solo, especialmente em suas propriedades químicas. Neste novo sistema de colheita, as folhas, bainhas, ponteiro, além de quantidade variável de pedaços de colmo, são cortados, triturados e lançados sobre a superfície do solo, formando uma cobertura de resíduo vegetal (*mulch*) denominada palha ou palhada.

A palhada deixada sobre a superfície aumenta a proteção do solo contra a erosão, diminui o impacto direto da gota de chuva sobre a superfície do solo e o escoamento superficial, reduz a amplitude térmica nas camadas superficiais do solo, aumenta a atividade biológica e as taxas de infiltração de água no solo, reduz a evaporação, controla parcialmente plantas daninhas, recicla nutrientes (principalmente N, P, K, Ca, Mg, S e micronutrientes), aumenta os teores de matéria orgânica, melhora a capacidade de retenção de água, melhora o enraizamento superficial e reduz a compactação devido à mecanização (ROSSETO et al., 2008).

Considerando que a colheita mecanizada da cana-de-açúcar pode gerar em média 11% da biomassa produzida em resíduos (CRUTZEN; ANDREA, 1990), a quantidade de palhada que poderá ser depositada sobre o solo vai depender de uma série de fatores, entre os quais a eficiência da máquina que está realizando a colheita e as condições de manejo do canavial. A idade da lavoura e a variedade cultivada (SOUZA et al., 2005) implicam em diferentes produções de biomassa total do canavial, podendo variar de 10 a 30 t ha⁻¹ de matéria seca (TRIVELIN; RODRIGUES; VICTORIA, 1996).

Ripoli; Mialhe; Brito, (1990), utilizando resultados obtidos por vários autores, encontraram que a produção de 70 t ha⁻¹ de cana-de-açúcar resultou na deposição de 7 t ha⁻¹ da palhada. Estudando diferentes variedades, idades das plantas e local da cultura, Page; Glanville; Truong, (1986) encontraram deposições de 22,8 t ha⁻¹, 13,4 t ha⁻¹ e 6 t ha⁻¹. Abramo Filho *et al.* (1993), avaliando a palhada depositada após o terceiro corte mecanizado do canavial sem queima, encontraram 15 t ha⁻¹ de massa seca de palhada, formando uma camada de 8 a 10 cm de espessura, possibilitando uma diminuição da temperatura de 5° C na superfície do solo abaixo da palhada, em comparação com a temperatura ambiente.

Segundo Urquiaga *et al.* (1991) e Furlani Neto (1994), esta massa vegetal forma uma camada de cerca de 10-15 cm de espessura por hectare, que pode permanecer depositada sobre o solo e agir de maneira positiva na proteção e conservação dos solos, já que sua decomposição afeta o ciclo do carbono e a dinâmica da matéria orgânica (LUCA *et al.*, 2008).

Trabalhando com cana-de-açúcar colhida mecanicamente com e sem prévia despalha pelo fogo, durante o ciclo da terceira soca, Orlando Filho *et al.* (1998) encontraram diferenças nas características de um LATOSSOLO VERMELHO, em função da manutenção da palhada residual da colheita de cana-de-açúcar, 11 meses após a instalação dos tratamentos. Na presença da palhada, observaram-se maior umidade e maiores teores de MOS, P, Ca, Mg e S. Ainda em seu trabalho, Orlando Filho *et al.*, (1998) relataram que, após um ano de decomposição, são liberados para o solo 85% do K, 44% do Ca e 39% do Mg presentes na palhada de cana após a colheita mecanizada.

As alterações do ambiente edáfico devidas à presença da palhada sobre o solo podem alterar a dinâmica de Ca e de Al, dois elementos que exercem grande efeito no desenvolvimento do sistema radicular (VASCONCELOS, 2002).

2.4 Resíduos vegetais na atenuação da acidez do solo e na complexação do Al tóxico

O calcário é comumente utilizado como corretivo agrícola, para elevar o pH do solo e neutralizar a acidez. Outra técnica que vem sendo estudada nos últimos anos para este fim é a aplicação de resíduos orgânicos na forma de esterco de animais, compostagem (resíduos orgânicos com fermentação controlada) e resíduos vegetais (MIYAZAWA; PAVAN; FRANCHINI, 2000).

Nos solos altamente intemperizados dos trópicos, a MOS desempenha um importante papel na produtividade, uma vez que tem papel determinante no reservatório e fonte de nutrientes para as plantas, a capacidade de troca catiônica (CTC), a capacidade de troca de ânions (CTA) e a estrutura do solo (DOU; ZHANG; LI, 2008).

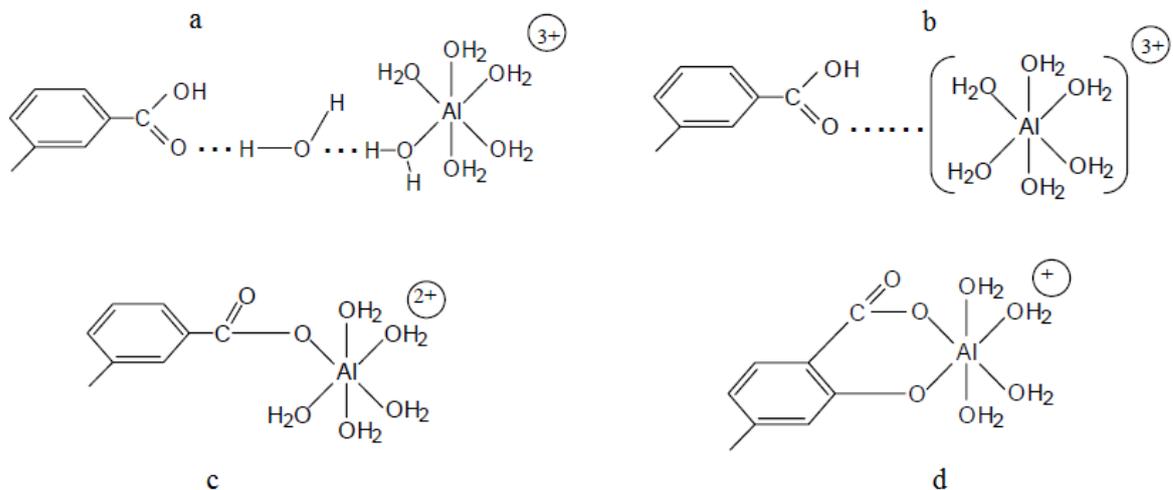
Os resíduos vegetais, quando mantidos sobre a superfície do solo, liberam, durante sua decomposição, compostos orgânicos que, em última análise, são ácidos orgânicos de baixo peso molecular (FRANCHINI *et al.*, 2001), representados por moléculas alifáticas e aromáticas que possuem grupos carboxílicos e hidroxílicos. Essas moléculas orgânicas formam complexos estáveis com metais, desempenham importante papel na mobilização de nutrientes e na amenização dos efeitos tóxicos de Al, chumbo (Pb), cobre (Cu) e de outros

metais pesados através do aumento de cargas negativas no solo (OLIVEIRA; CARVALHO; MORAES, 2002; EVANGELOU; EBEL; SCHAEFFER, 2007).

A intensidade dos efeitos tem sido relacionada com as características do material vegetal utilizado. De modo geral, as leguminosas proporcionam maior aumento de pH e neutralização do Al no solo do que as gramíneas, sendo tal efeito relacionado com o teor de cátions básicos no material vegetal (HUE; AMIEN, 1989; BESSHO; BELL, 1992; MIYAZAWA et al., 1993).

A ligação do Al com os ligantes orgânicos pode ocorrer por pontes de água (Figura 4A), atração eletrostática (Figura 4B), troca de ligantes com apenas um grupo doador (Figura 4C) e quelação (mais de um grupo doador) (Figura 4D) (VANCE; STEVENSON; SIKORA, 1995).

Figura 4. Formas de complexação do Al com a matéria orgânica do solo: (a) pontes de água; (b) atração eletrostática; (c) troca de ligantes; e (d) quelação (adaptado de Vance et al., 1995)



Logo após a deposição de resíduos orgânicos de plantas no solo, os ácidos orgânicos atingem concentrações mais elevadas (STEVENSON, 1967). Após isso, há redução na concentração desses ácidos. Com a manutenção dos resíduos de plantas na superfície do solo, e também com o seu constante aporte, é possível ocorrer produção contínua de compostos orgânicos de baixa massa molecular, sendo seu efeito contínuo na fertilidade (MIYAZAWA; PAVAN; FRANCINI, 2000).

Além da concentração, a eficiência dos ácidos orgânicos em aumentar a disponibilidade de nutrientes no solo depende do pH, do tipo de ânion orgânico (JONES, 1998) e do número de grupos funcionais carboxílicos que competem pelos sítios de retenção

de nutrientes no solo, sendo os mais eficientes: tricarbóxicos > dicarbóxicos > monocarbóxicos (GUPPY et al., 2005).

Vários trabalhos já foram realizados no Brasil, com o intuito de comparar o efeito dos resíduos de várias plantas no pH do solo e na disponibilidade de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , bem como na complexação do Al (FRANCHINI et al., 1999b; MIYAZAWA; PAVAN; FRANCHINI, 2000; FRANCHINI et al., 2003; AMARAL et al., 2004). O efeito no pH do solo tem sido atribuído à adsorção de H^+ e Al^{3+} na superfície do material (HOYT; TURNER, 1975), à precipitação do Al pelo aumento do pH devido às reações de troca entre ânions orgânicos e OH^- terminais de óxidos de Fe e Al (HUE; AMIEN, 1989; HUE, 1992) e ao aumento do potencial de oxidação biológica de ânions orgânicos e suas associações com o H^+ no solo. A complexação de Al^{3+} e de outros metais por ácidos orgânicos (HUE et al., 1986; MIYAZAWA; PAVAN; CALEGARI, 1993; FRANCHINI et al., 1999a), parece ser a reação mais importante sob ponto de vista da redução da fitotoxidez, uma vez que essa reação tende a ser mais duradoura do que o efeito no pH do solo (SALET, 1998). A disponibilidade de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ se deve ao aumento do conteúdo de cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+) adicionados pelos materiais vegetais (BESSHO; BELL, 1992).

Algumas das principais alterações químicas ocorrem principalmente na camada de 0 a 20 cm, como a elevação do pH e do teor de Ca (HUE; AMIEN, 1989; BESSHO; BELL, 1992). Contudo, estas alterações podem se estender à subsuperfície do solo (WATT et al., 1991; PAVAN, 1994; OLIVEIRA; PAVAN, 1996).

Miyazawa *et al.* (1993) avaliaram resíduos vegetais de natureza diversa quanto à capacidade de neutralização do H^+ da solução em experimento de laboratório. Observaram que os resíduos de adubos verdes apresentaram maior capacidade da neutralização de H^+ do que os resíduos pós-colheita. Cassiolo *et al.* (1999) avaliaram a neutralização da acidez potencial e trocável do solo por extratos vegetais. Entre os extratos avaliados, os de nabo forrageiro e de tremoço azul foram mais eficientes e o de milho foi o menos eficiente na neutralização da acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$) e trocável (Al). De acordo com HUE *et al.* (1986) e com Anghinoni (2007), o grau de amenização da toxicidade do Al depende principalmente da concentração e da estabilidade do complexo formado.

HUE et al. (1986) classificaram os principais ácidos orgânicos quanto à capacidade de amenização do Al-tóxico para plantas de algodão, separando-os em fortes moderados e fracos, citando como exemplo de ácidos fortes o ácido cítrico e oxálico, moderados os ácidos málico e malônico e como fracos succínico e acético.

Estão listadas abaixo as constantes de formação de complexos (K_1) entre os principais ácidos orgânicos presentes no solo e o Al^{3+} (25°C): (SPOSITO et al., 1982).

Tabela 1. Constantes de estabilidade entre alguns ácidos orgânicos e alumínio

| Ácido orgânico | K_1 |
|----------------------|-------|
| 2-hidroxiopropanóico | 4,26 |
| Acético | 1,51 |
| Butanóico | 1,58 |
| Cítrico | 7,98 |
| Fórmico | 0,56 |
| Lático | 2,38 |
| Málico | 5,34 |
| Oxálico | 6,1 |
| Propanóico | 1,69 |
| Succínico | 3,83 |

3. MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos dois experimentos, utilizando três variedades de cana-de-açúcar (RB966928, RB855453 e RB867515), sendo um em laboratório, para a seleção do extrato vegetal com maior capacidade de neutralização do Al, e o outro em casa-de-vegetação, para testar a eficiência deste extrato na complexação do Al tóxico, em colunas de solo com alta saturação por Al (m%).

3.1 Caracterização química dos extratos vegetais

As análises de ácidos orgânicos tituláveis, condutividade elétrica, pH e a determinação dos cátions presentes nos extratos vegetais das variedades estudadas foram realizadas no Laboratório de Química e Fertilidade do Solo, do Centro de Ciências Agrárias, *campus* de Araras-SP da Universidade Federal de São Carlos. A determinação dos ácidos orgânicos foi feita no laboratório Global Análise e Consultoria, em São Carlos-SP.

3.1.1 Escolha das variedades de cana-de-açúcar

A escolha das variedades de cana-de-açúcar se deu de acordo com o Censo Varietal (2013), sendo escolhidas as variedades mais plantadas no Brasil e, com potencial para expansão para as regiões de Cerrado, sendo a RB966928 (ciclo precoce), RB855453 (ciclo precoce/médio) e RB867515 (ciclo médio/tardio).

A descrição das características de cada variedade foi feita de acordo com o Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar, desenvolvido pela Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (2010):

- a) **RB966928:** maturação precoce, com colheita de maio a abril. Médio teor de sacarose aliada com a alta produtividade agrícola, excelente brotação em cana-planta e em soqueiras.
- b) **RB855453:** maturação precoce a média, com colheita de maio a julho. Alta produtividade agrícola, rápido desenvolvimento, canas eretas de excelente colheitabilidade.
- c) **RB867515:** maturação média a tardia, com colheita de julho a setembro. Alto teor de sacarose e alta produtividade agrícola, responsiva a maturador podendo ser cortada em início de safra. Excelente desenvolvimento, com boa brotação na planta e socas. Ótimo desempenho em solos de textura arenosa.

3.1.2 Obtenção e caracterização química dos extratos vegetais

Foram coletadas amostras de palhada das variedades RB966928, RB855453 e RB867515 de cana-de-açúcar em campo, imediatamente após a colheita, em área de Usina da região de Araras-SP. As amostras foram extraídas da entrelinha, e constituíram amostras compostas (Figura 5 A). Houve uma padronização da coleta da palhada, onde as áreas de cultivo das três variedades, se encontrava sob manejo de colheita mecanizada há três anos, e as variedades se encontravam na terceira soca (3º corte).

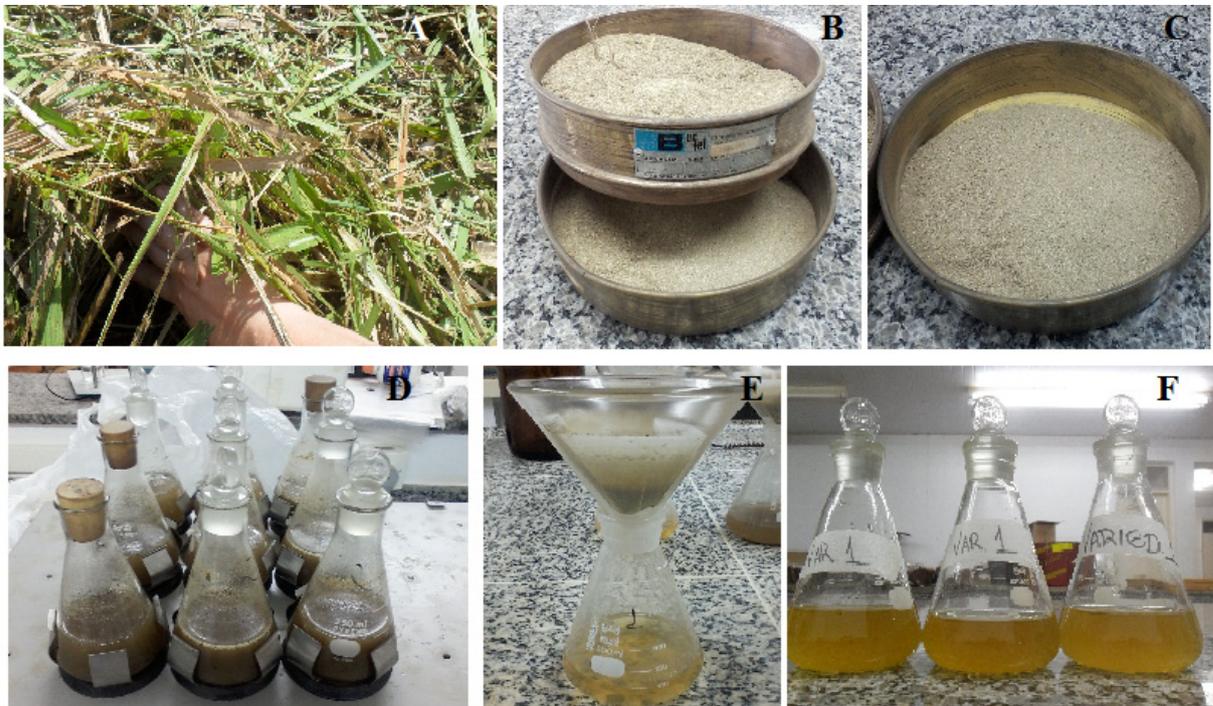
O material vegetal coletado foi seco em estufa a 65°C durante 48h, moído e passado em peneira de malha de 1 mm, sendo posteriormente armazenado em sacos de papel, seguindo-se a metodologia de Miyazawa *et al.* (1992a) (Figura 5 B e C).

Os extratos vegetais foram obtidos pelo seguinte procedimento: 3 g do material seco foram adicionados a 150 mL de água destilada, na proporção de 1:50 (Figura 5 D). As

soluções foram agitadas por quatro horas a 250 rpm e filtradas em papel filtro quantitativo (Figura 5 E e F).

Estas amostras foram utilizadas para análises dos compostos hidrossolúveis presentes nos extratos vegetais, seguindo-se as metodologias de Cassiolato *et al.*, (1999) e de Franchini *et al.* (2003). Todas as determinações foram realizadas com cinco repetições.

Figura 5. Obtenção do extrato vegetal da palhada de cana de açúcar: (a) obtenção de palhada de cana-de-açúcar logo após a colheita; (b) material vegetal moído e passado em peneira de malha de 1 mm; (c) material vegetal peneirado; (d) solução Material vegetal + água destilada; (e) Filtragem da solução em papel filtro quantitativo; e (f) obtenção do extrato vegetal



3.1.3 Determinações analíticas dos compostos hidrossolúveis presentes nos extratos vegetais

3.1.3.1 Ácidos Orgânicos Tituláveis (AOT) e pH

Este método determina os grupos funcionais R-COOH, R-OH e aminoácidos responsáveis pela neutralização de H^+ e Al^{3+} do solo (MIYAZAWA *et al.*, 1993; CASSIOLATO *et al.*, 1999), expressos através do volume de NaOH consumido para neutralizar os íons H^+ do extrato das plantas.

Os ácidos orgânicos foram estimados pela titulação potenciométrica em intervalo de pH 3,0 e 7,0. Esse intervalo foi utilizado admitindo-se que no pH 3,0 a maioria dos ânions orgânicos está na forma protonada, enquanto no pH 7,0 admitiu-se a forma ionizada (YOUNG et al., 1981).

Transferiram-se 25 mL da amostra para um becker de 150 mL, com posterior adição de 25 mL de H₂O. Acidificou-se o extrato vegetal com a solução de HCl 2,0 mol L⁻¹ para pH inferior a 3,0 e titulou-se com a solução de NaOH 0,1 molL⁻¹ padronizado, no intervalo de pH entre 3,0 e 7,0, utilizando pHmêtro com eletrodo combinado de vidro. A acidificação da solução com HCl evita solubilização do gás CO₂ da atmosfera na solução.

3.1.3.2 Condutivimetria

A condutividade elétrica (CE) é definida como sendo a habilidade que o solo tem em transmitir corrente elétrica (KITCHEN; SUDDUTH; DRUMMOND, 1996), sendo dependente de uma série de características e propriedades do solo, como o conteúdo de água, os teores de argila e de matéria orgânica, e a concentração de íons na solução do solo (CASTRO; MOLIN, 2004).

A partir do extrato vegetal, foi determinada a CE da solução por condutivimetria, em $\mu\text{S cm}^{-1}$, segundo metodologia descrita por Miyazawa; Pavan; Franchini (2000). Os valores da CE podem correlacionar-se com a soma dos cátions determinados por absorção atômica.

3.1.3.3 Soma de cátions (Σ Ca, Mg e K)

A determinação de teores Ca e Mg do extrato foi feita por absorção atômica e a de K por fotometria de chama. Os resultados foram expressos em mgL⁻¹, de forma individual para cada elemento e na forma de soma de cátions (Σ Ca, Mg e K).

A capacidade dos resíduos vegetais em mobilizar cátions em solos ácidos está intimamente relacionada com o teor de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como os ácidos cítrico e málico. Na planta, tais compostos estão na forma de ânions orgânicos para manutenção da eletroneutralidade química, devido à absorção de cátions básicos (PIERRE; BANWART, 1973); além disso, apesar da existência de ânions inorgânicos (NO₃⁻, SO₄²⁻, H₂PO⁻ e Cl⁻) no tecido vegetal, estes estão presentes em teores pouco significativos (CASSIOLATO et al., 2000; MIYAZAWA; PAVAN; FRANCHINI, 2000; MIYAZAWA; PAVAN; FRANCHINI, 2002; FRANCHINI; PAVAN; MIYAZAWA, 2004).

A determinação da soma de cátions solúveis pode indicar o potencial de mobilização de cátions e as quantidades de H^+ e Al^{3+} que podem ser neutralizadas pelos resíduos vegetais, correlacionando-se com os efeitos dos materiais vegetais no aumento do pH e do Ca trocável e na diminuição do Al trocável do solo (MIYAZAWA; PAVAN; CALEGARI, 1993; FRANCHINI et al., 1999a; MEDA et al., 2001; CASSIOLATO et al., 2002), visto que os cátions Ca, Mg e K ligados nos compostos orgânicos são substituídos por H^+ ou Al^{3+} , formando compostos estáveis protonados ou complexo Al-orgânico (MIYAZAWA; PAVAN; FRANCHINI, 2000).

3.1.3.4 Cromatografia líquida alta eficiência (CLAE)

O método instrumental mais utilizado para a determinação e quantificação dos ácidos orgânicos de baixo peso molecular é a cromatografia. Esta técnica tem sido amplamente utilizada na determinação de ácidos orgânicos, como ácido cítrico e oxálico, pois estes grupos tem importância em vários ramos da ciência (HUE; AMIEN, 1989).

A determinação dos ácidos orgânicos de baixa massa molecular solúveis em água, presentes nos extratos vegetais das variedades, foi realizada segundo metodologia descrita por Franchini et al. (2003), em que 3 g da amostra de matéria seca foi agitada em 250 mL de água destilada a 250 osc min^{-1} , durante quatro horas, com posterior passagem da suspensão por filtro de papel quantitativo.

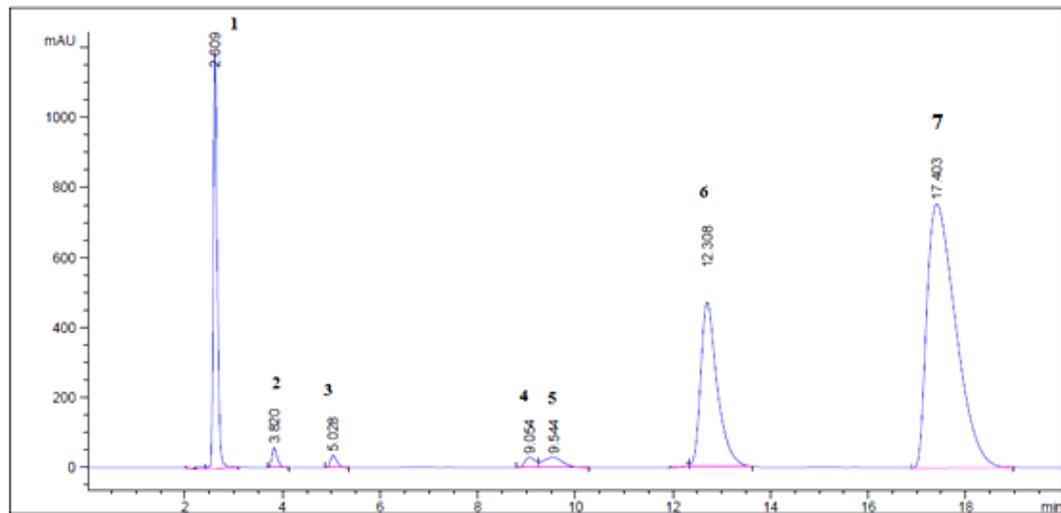
Os ácidos orgânicos foram extraídos com 10mL de acetato de etila, adicionado ao extrato e aquecido em chapa a 45 °C até o ponto de secura parcial, sendo então redissolvido em 1mL de água destilada.

Os ácidos orgânicos foram identificados e quantificados por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE) nas seguintes condições: coluna C-18, injeção de 20 μ L, UV a 230nm, fluxo de 1mL min^{-1} e fase móvel água com 1% de ácido fosfórico. Posteriormente, foi realizada a filtração final com filtro de membrana de nitrocelulose 0,45 μ m, para posterior injeção no HPLC. Os picos correspondentes a cada ácido foram identificados pelo tempo de retenção, utilizando-se como comparação os tempos de retenção dos padrões, sendo o ácido oxálico de 2,60 min, o ácido málico de 3,8 min, o ácido acético de 5,03 min, o ácido cítrico de 9,17 min, o ácido succínico de 9,59 min, o ácido fumárico de 12,30 min e o ácido trans-aconítico de 17,9 min. Padrões também foram utilizados para estimativa do fator de concentração de cada ácido através de elaboração da curva de concentração. Os padrões

utilizados foram os ácidos puros ou na forma protonada, com K ou Na, todos de marca comercial Sigma-Aldrich.

A Figura 6 mostra o cromatograma do padrão de ácidos orgânicos com os picos correspondentes a cada ácido identificados pelo tempo de retenção.

Figura 6. Cromatograma do padrão de ácidos orgânicos, sendo 1- oxálico, 2-málico, 3-acético, 4-cítrico, 5-succínico, 6-fumárico e, 7-trans-aconítico



3.1.3.5 Delineamento experimental

O delineamento experimental empregado foi o inteiramente casualizado, com cinco repetições. Os resultados foram submetidos à análise de variância e a diferença entre médias de tratamentos foi avaliada pelo teste de Tukey a 5 %.

3.2 Efeitos da aplicação de extrato vegetal no desenvolvimento da cana-de-açúcar

3.2.1 Condução do experimento

O experimento foi conduzido no Centro de Ciências Agrárias (CCA), *campus* Araras da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), em condições de casa-de-vegetação, em colunas de PVC preenchidas com amostras deformadas da camada 0-80 cm de um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico (LVAd) (EMBRAPA, 2011), textura média, coletadas em uma propriedade da Usina Iracema (Santa Gertrudes/ SP), para testar a

eficiência do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 na complexação do Al fitotóxico.

O LVAd foi escolhido em função de suas restrições em termos de fertilidade, sobretudo pelo elevado teor de Al e alta saturação por Al (m%) nas camadas subsuperficiais (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados das análises química e granulométrica do LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico usado no experimento

| Profundidade | P _{Resina} | MO | pH | K | Ca | Mg | H+Al | Al | SB | CTC _t | V | m | |
|--------------|--------------------------------|-------------------|-------------------|---|----|----|-------|------|-----|------------------|------|------|---|
| cm | mgdm ⁻³ | gdm ⁻³ | CaCl ₂ | -----mmol _c dm ⁻³ ----- | | | | | | | | % | % |
| 0-20 | 1 | 3 | 4,0 | 0,3 | 5 | 1 | 38 | 12,8 | 6,3 | 44,3 | 14,2 | 69,0 | |
| Profundidade | Argila | Areia | | | | | Silte | | | | | | |
| cm | ----- g kg ⁻¹ ----- | | | | | | | | | | | | |
| 0-20 | 160 | 790 | | | | | 50 | | | | | | |

3.2.2 Pré-germinação dos mini-toletes de cana-de-açúcar com gema única

A pré-germinação dos mini-toletes foi realizada em bandejas contendo vermiculita média expandida (Figura 7 A e B), acondicionadas em câmara de germinação à temperatura de 30°C e fotoperíodo ininterrupto, seguindo-se a metodologia de Oliveira (2012).

Figura 7. A) Mini-toletes das variedades de cana-de-açúcar. B) Pré-germinação dos mini-toletes de cana-de-açúcar em bandejas contendo vermiculita expandida média



Para a pré-germinação em vermiculita, uma camada de 4-5 cm de material previamente umedecido (relação vermiculita:água 1:0,8) foi colocada em bandeja para o plantio dos mini-toletes, os quais foram cobertos com uma fina camada de vermiculita. A umidade das bandejas foi monitorada diariamente, havendo necessidade de reposição por borrifamento de água a cada 48 horas. Após o período de 15 dias, procedeu-se a triagem de mini-toletes com uniformidade de desenvolvimento radicular, para posterior plantio nas colunas de solo dispostas no interior da casa de vegetação.

3.2.3 Incubação do solo

As amostras de solo foram secadas ao ar, passadas em peneira de abertura de malha 2 mm, homogeneizadas e caracterizadas química e fisicamente conforme métodos de Raij *et al.* (2001) e de Camargo *et al.* (2009) (Tabela 2).

Parte das amostras do solo recebeu calagem segundo o critério de recomendação do Boletim Técnico IAC nº100 (RAIJ *et al.*, 1996), que sugere a elevação da saturação por bases a 60% para a cultura da cana-de-açúcar. Esta parte das amostras de solo, foi utilizada para o preenchimento do primeiro anel das colunas de solo, já que estes anéis devem estar corrigidos. A incubação foi feita em sacos de polietileno durante 30 dias, onde houve a estabilização do V%. Após esse período, as amostras foram novamente secadas ao ar, passadas em peneira de malha de 2 mm e homogeneizadas.

Com a incubação de parte do solo, conseguiu-se atingir valores de $m\% = 0$ foram obtidos pela incubação conforme a recomendação técnica, para compor o primeiro anel das colunas do experimento, e, valores de $m\% = 70$ foram obtidos pelo uso da amostra sem incubação, para compor os demais anéis das colunas do experimento.

3.2.4 Determinação da capacidade de campo

A capacidade de campo (CC) foi determinada através do método de Richards (1947). Para sua determinação, coletaram-se amostras do solo na profundidade de 0-20 cm, utilizando-se coletores de alumínio, que foram devidamente identificados.

As amostras foram levadas para o Laboratório de Física do Solo, pesadas em balança analítica e colocadas em estufa à 105°C, onde permaneceram por um período de 24 horas, aferindo-se os valores de massa úmida e seca do solo. O cálculo da CC foi feito pela seguinte

equação: $U (\%) = [(mu - ms) \times 100]/ms$, onde mu : massa úmida e ms : massa seca. Obteve-se a média da CC em torno de 10%.

3.2.5 Preparo e montagem das colunas

Cada coluna foi constituída pela sobreposição de 4 anéis de PVC rígido, de 20 cm de diâmetro e 20 cm de altura, unidos externamente por fita adesiva e cola (Figura 8 A e B). As cores das fitas adesivas serviram para diferenciar os tratamentos. As paredes internas das colunas foram recobertas com parafina, visando evitar o escoamento preferencial lateral da água.

As colunas foram preenchidas com solo peneirado em malha de 2 mm e seco ao ar, até 15 cm da borda superior, formando uma coluna de 75 cm de altura e volume de $25,2 \text{ dm}^3$. Sendo os 3 anéis últimos anéis das colunas preenchidos com condições extremas de saturação por Al ($m\% = 70$), utilizando o solo natural, sem aplicação de calcário, e, o primeiro anel arranjados de forma a simular a camada arável (0-20 cm), devidamente corrigida com a aplicação de calcário para elevar a $V\%$ para 60, considerada ideal para a cana-de-açúcar.

Figura 8. A) Ilustração esquemática do cilindro de cultivo para avaliação das variedades submetidas ao estresse por Al do solo. B) Disposição dos cilindros na casa-de-vegetação



O solo foi colocado com auxílio de funil, fazendo-se movimentos circulares para a acomodação homogênea do mesmo, para evitar alterações na seção de infiltração. Além disso, o solo foi compactado homogeneamente nos anéis para atingir densidade de $1,35 \text{ gcm}^{-3}$,

considerada adequada para solos de textura média (CAMARGO; ALLEONI, 1997; TORRES; SARAIVA, 1999; KLEIN et al., 2004; EFFGEN, 2006) .

3.2.6 Plantio e adubação

As colunas de solo foram previamente umedecidas no dia anterior ao plantio dos mini-toletes, até próximo à capacidade de campo. Cada coluna continha 33,5 kg de solo ($6,3 \text{ dm}^3 \times 4$ anéis, com $d = 1,35 \text{ kgdm}^{-3}$), sendo 8,5 kg de solo adicionados a cada um dos três últimos anéis e 8 kg no primeiro. Sendo a capacidade de campo média de 10%, foram adicionados 3,35 L de água as colunas, um dia antes do plantio.

3.2.6.1 Adubação de plantio e de cobertura

Realizou-se a adubação de plantio nas colunas, na camada de 0-20 cm, seguindo-se o critério de recomendação do Boletim Técnico IAC nº100 (RAIJ et al., 1996). As quantidades calculadas de N, P_2O_5 e K_2O foram fornecidas nas formas de sulfato de amônio, superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente. Após 45 dias do plantio, realizou-se a adubação de cobertura com N e K_2O , utilizando-se o sulfato de amônio e cloreto de potássio (Tabela 3).

Tabela 3. Adubações de plantio e de cobertura de colunas de LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico cultivadas com variedades de cana-de-açúcar

| Adubo | Adubação de Plantio | Adubação de cobertura |
|-----------------------------------|---------------------------|-----------------------|
| | (g coluna ⁻¹) | |
| Sulfato de amônio ¹ | 0,350 | 0,525 |
| Superfosfato simples ² | 1,700 | _____ |
| Cloreto de potássio ³ | 0,500 | 0,120 |

⁽¹⁾ 21% de N; ⁽²⁾ 17% de P_2O_5 ; ⁽³⁾ 58% de K_2O .

3.2.7 Monitoramento da umidade do solo

Inicialmente, as colunas receberam 100 mL de água desionizada para fornecer umidade necessária à germinação e evitar, em parte, a lixiviação de íons, que poderiam alterar o efeito do Al nas camadas inferiores.

Diariamente foram adicionados pulsos de água, para manter a umidade e garantir a emergência dos perfilhos. Passado o período de germinação, a umidade do solo foi mantida a 70% da capacidade de campo, calculada conforme Casaroli; Van Lier (2008).

3.2.8 Dosagens de extratos vegetais da palhada de cana-de-açúcar

Após um ano de permanência da palhada no campo, há uma redução média de massa de 70% (JENKINSON; AYANABA, 1977; SIQUEIRA; FRANCO, 1988; OLIVEIRA et al. 1999; OLIVEIRA et al., 2002; CAMPOS; 2003). Dessa forma, considerou-se uma taxa de redução da matéria seca de 70% ao ano para o experimento.

É conhecido que após três anos de colheita mecanizada crua ocorre a estabilização no estoque da palhada, do carbono e do nitrogênio (CAMPOS, 2003). As quantidades de extratos vegetais aplicados nas colunas tiveram a finalidade de reproduzir a produção de palhada no campo e de avaliar o efeito da acumulação da palhada ao longo do tempo (1, 2 e 3 anos) na complexação do Al tóxico às plantas.

O acúmulo de palhada de cana-de-açúcar no campo é em média $15 \text{ tha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ de matéria seca, com redução anual de biomassa de 70%. Logo, as dosagens de 15 tha^{-1} , 19 tha^{-1} e de 21 tha^{-1} de matéria seca foram utilizadas para os 1º, 2º e 3º anos, respectivamente.

A quantidade de extrato aplicada foi calculada baseada na área interna da coluna (314 cm^2). As quantidades equivalentes de matéria seca foram agitadas com água na relação 1:50 (Tabela 4).

Tabela 4. Dosagens de extratos vegetais adicionadas às colunas de solo equivalentes a quantidades crescentes de deposição de palhada de cana-de-açúcar no campo

| Quantidade de palhada (tha^{-1} de matéria seca) | Equivalente (g) | Dosagem de extrato (mL) |
|---|--------------------|----------------------------|
| 15 | 47 | 2350 |
| 19 | 60 | 3000 |
| 21 | 66 | 3300 |

Os extratos foram agitados a 250 osc min^{-1} durante quatro horas, quando então foram filtrados e adicionados na superfície do solo das colunas, logo após o estabelecimento das plantas, que ocorreu com 1 mês após o plantio. As colunas de solo foram previamente umedecidas (dia anterior) até próximo a capacidade de campo para a aplicação dos extratos da palhada.

3.2.9 Tratamentos

A Tabela 5 contém a descrição dos tratamentos empregados para as variedades, realizados com três repetições.

Tabela 5. Tratamentos envolvendo as variáveis dose de extrato vegetal e profundidade da coluna de solo cultivada com as variedades.

| Variedade | Extrato vegetal (tha ⁻¹)* | Profundidade (m) |
|------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| RB966928, RB855453, RB867515 | 0 | 0 - 0,20 |
| | | 0,20 - 0,40 |
| | | 0,40 - 0,60 |
| | | 0,60 - 0,80 |
| RB966928, RB855453, RB867515 | 15* ¹ | 0 - 0,20 |
| | | 0,20 - 0,40 |
| | | 0,40 - 0,60 |
| | | 0,60 - 0,80 |
| RB966928, RB855453, RB867515 | 19* ² | 0 - 0,20 |
| | | 0,20 - 0,40 |
| | | 0,40 - 0,60 |
| | | 0,60 - 0,80 |
| RB966928, RB855453, RB867515 | 21* ³ | 0 - 0,20 |
| | | 0,20 - 0,40 |
| | | 0,40 - 0,60 |
| | | 0,60 - 0,80 |

*2350¹, 3000² e 3300³ mL de extrato vegetal.

Para cada variedade de cana-de-açúcar, foi conduzida uma coluna controle preenchida com solo corrigido (V%=60) e sem adição de resíduos vegetais, para verificação do aprofundamento máximo do sistema radicular. O resultado proveniente desta coluna foi considerado o denominador do índice de tolerância ao Al fitotóxico [(crescimento com Al/crescimento sem Al)*100] (CAMBRAIA et al., 1991).

3.2.10 Delineamento experimental

O delineamento experimental empregado foi o inteiramente casualizado, com três repetições, em esquema de parcelas subdivididas, com as parcelas sendo constituídas pelo esquema fatorial dos níveis de variedades (RB966928, RB855453 e RB867515) com as doses dos extratos vegetais (0, 15, 19 e 21 tha⁻¹ de palhada). As subparcelas foram constituídas

pelas profundidades (0-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60; 0,60-0,80 m). Os resultados foram submetidos à análise de variância (Tabela 6) e a diferença entre médias de tratamentos foi avaliada pelo teste de Tukey a 5 %.

Tabela 6. Quadro de análise de variância da biomassa de variedades de cana-de-açúcar submetidas à adição de extratos vegetais de palhada de colheita mecanizada em colunas de solo com alta saturação por Al fitotóxico

| Causas de variação | Graus de liberdade |
|---------------------|--------------------|
| Variedades (V) | 2 |
| Resíduo(a) | 6 |
| (Parcelas) | (8) |
| Dosagens (D) | 3 |
| Interação V x D | 6 |
| Resíduo (b) | 18 |
| Subparcelas | 35 |
| Profundidades (P) | 3 |
| Interação V x P | 6 |
| Interação D x P | 9 |
| Interação V x D x P | 18 |
| Resíduo (c) | 72 |
| Total | 143 |

3.2.11 Avaliações

3.2.11.1 Altura média das plantas

A colheita foi feita aos 120 dias após o plantio. Antecedendo a colheita, foi determinada a altura média das plantas (AMP), aferida desde o colo até a extremidade da folha mais alta (MACHADO et al., 2009) (Figura 9 A e B). Em seguida, foi realizado o corte da parte aérea, rente ao solo (Figura 10).

Figura 9. A) Aferição da altura média das plantas antes da realização do corte. B) Aferição da altura média das plantas após o corte



Figura 10. Corte da parte aérea das variedades de cana-de-açúcar



3.2.11.2 Separação de raízes e medidas de biomassa

As colunas foram desmontadas e os anéis separados individualmente, de cima para baixo (Figura 11A). O conteúdo de cada anel ($\cong 6,3 \text{ dm}^{-3}$) foi livrado em peneiras finas sobrepostas (malha de 2 mm sobre malha de 1 mm de diâmetro) de modo a evitar perda de material radicular de menor tamanho (Figura 11 B e C). Sobre as peneiras, cada anel recebeu sucessivos jatos de água, até que todo o solo aderido ao sistema radicular fosse removido (Figura 11 D e E). As raízes foram lavadas em água corrente e, posteriormente, enxaguadas em água deionizada. Após a separação, houve a quantificação da biomassa fresca de raízes (g dm^{-3}) (Figura 11 F e G). Foram comparadas as profundidades de enraizamento das variedades determinadas pelo volume do sistema radicular (Figura 11 H).

Para as medidas de biomassa do sistema radicular, após a secagem em estufa de circulação forçada de ar à temperatura de 65°C por 72 h, o material vegetal foi pesado em balança analítica de precisão.

Figura 11. Processo de desmontagem das colunas (A), separação das raízes (B, C, D e E) e medidas de biomassa e do volume do sistema radicular das variedades de cana-de-açúcar (F, G e H)



3.2.11.3 Extração da solução do solo

Para extração da solução do solo foi empregado o método do extrato aquoso (WOLT, 1994), utilizando uma relação solo:água 1:1. A extração da solução do solo se deu para as amostras de solo retiradas de todos os anéis que cumpunham as colunas. Foram tomados 20 g de terra em tubo de centrífuga de 50 mL, aos quais foram adicionados 20 g de água ultrapurificada. Posteriormente, os tubos foram colocados em mesa agitadora horizontal, agitando-se por 15 minutos a 150 rpm, permanecendo posteriormente em descanso por 1 h. Transcorrido esse período, a solução foi agitada novamente por mais 5 minutos (WOLT, 1994) e centrifugada durante 30 minutos a 1500 rpm.

Foram realizadas três extrações separadamente para obtenção dos extratos de cátions, ânions e carbono orgânico dissolvido (COD). A solução foi acidificada com uma gota de ácido nítrico concentrado e conservada em geladeira até a realização da leitura.

Para obtenção do extrato para leitura de cátions, a solução foi passada em membrana de celulose de 0,45 μm . O extrato para leitura de COD foi obtido após a passagem do extrato em filtro de microfibras de vidro, previamente calcinado a 500°C por seis horas e depois acondicionados em frascos submetidos ao mesmo processo de calcinação. Nesta última

extração, utilizou-se cerca de 0,1 mL de solução de HgCl_2 30 mmol L^{-1} para evitar o ataque de microrganismos ao COD das amostras.

Nas soluções, imediatamente após a centrifugação, foram determinados o pH e condutividade elétrica (CE). Os teores dos cátions (Ca, Mg e K) foram determinados no ICP-OES e o COD em analisador de carbono.

4. RESULTADOS

4.1 Caracterização química e determinação dos ácidos orgânicos presentes nos extratos vegetais de variedades de cana-de-açúcar

4.1.1 Ácidos orgânicos tituláveis (AOT), soma de cátions (Σ Ca, Mg e K), pH e condutividade elétrica (CE)

O volume de NaOH consumido na titulação, os teores de cátions, pH e condutividade elétrica dos extratos vegetais estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7. Volumes de NaOH consumidos na titulação, teores de cátions hidrossolúveis, somatório de cátions e valores de pH e de condutividade elétrica (CE) nos extratos dos resíduos vegetais de três variedades de cana-de-açúcar

| Extrato vegetal | NaOH | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | Σ Cátions | pH | C.E. |
|-----------------|--------|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|--------|-----------------------|
| | mL | ----- mg L ⁻¹ ----- | | | ----- | | $\mu\text{S cm}^{-1}$ |
| RB855453 | 10,0 b | 184,5 b | 4,5 b | 0,9 c | 188,9 b | 6,0 a | 792,3 b |
| RB966928 | 12,0 b | 176,7 c | 5,4 ab | 1,9 b | 184,0 c | 6,0 a | 678,8 c |
| RB867515 | 15,0 a | 197,8 a | 6,2 a | 3,2 a | 207,2 a | 6,1 a | 804,5 a |
| Fcal | 73,0** | 170,0** | 5,5* | 268,0** | 634,0** | 4,0 ns | 41243,0** |
| DMS | 1,2 | 3,6 | 1,8 | 0,3 | 193,3 | 0,1 | 1,5 |
| CV% | 4,2 | 0,7 | 13,9 | 6,0 | 0,4 | 0,5 | 0,1 |

**significativo ao nível de 1% de probabilidade; *significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns não significativo

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% .

4.1.2 Análise de ácidos orgânicos por cromatografia líquida de alta eficiência

Os teores de ácidos orgânicos variaram entre os extratos vegetais da palhada das três variedades de cana-de-açúcar (Tabela 8).

As análises de variância aplicadas aos valores de concentração dos ácidos orgânicos presentes nos extratos vegetais das três variedades de cana-de-açúcar mostraram alta significância estatística para os ácidos málico, acético, fumárico, succínico, cítrico e trans-aconítico, para os quais o teste de comparação de médias (*Tukey* a 5%) foi aplicado.

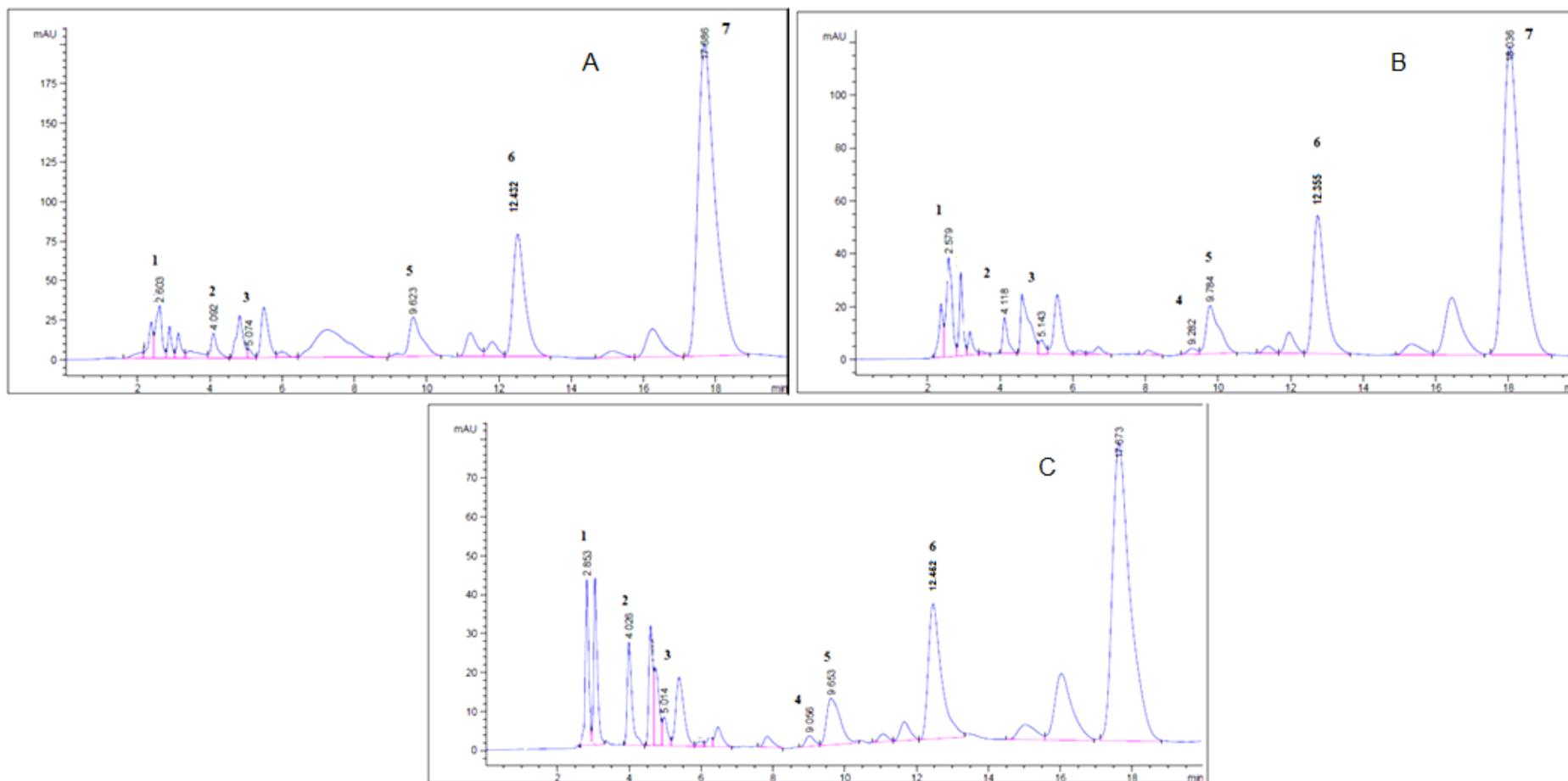
Tabela 8. Médias do conteúdo de ácidos málico, acético, fumárico, succínico, cítrico e trans-aconítico presentes nos extratos vegetais de três variedades de cana-de-açúcar

| Variedades | Ácido málico | Ácido acético | Ácido fumárico | Ácido succínico | Ácido cítrico | Ácido t-aconítico |
|------------|------------------------------|---------------|----------------|-----------------|---------------|-------------------|
| | -----mgL ⁻¹ ----- | | | | | |
| RB855453 | 51,34 b | 6,07 b | 29,05 c | 42,60 c | 139,55 b | 215,53 c |
| RB966928 | 46,26 b | 6,84 b | 58,80 b | 71,52 b | 131,02 b | 278,95 b |
| RB867515 | 107,06 a | 20,50 a | 79,16 a | 170,32 a | 223,83 a | 373,23 a |
| F calc | 17,98** | 19,22** | 39,30** | 110,03** | 26,97** | 26,54** |
| DMS | 29,9 | 6,98 | 15,15 | 24,06 | 37,24 | 58,06 |
| CV(%) | 26,08 | 37,18 | 16,14 | 15,05 | 13,4 | 11,91 |

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% .
 **significativo ao nível de 1% de probabilidade; *significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns não significativo

A figura 12 A, B e C exibem os cromatogramas dos extratos vegetais da palhada das variedades de cana-de-açúcar estudadas, indicando os ácidos orgânicos presentes.

Figura 12 A, B e C. Cromatograma dos ácidos orgânicos presentes no extrato vegetal da variedade RB855453 (A), RB966928 (B) e RB867515 (C)



4.2 Efeitos da aplicação de extrato vegetal no desenvolvimento da cana-de-açúcar

4.2.1 Índice de tolerância ao alumínio

O Índice de tolerância das variedades ao alumínio fitotóxico foi estatisticamente significativo, segundo a análise de variância (Tabela 9), sendo o teste de comparação de médias (*Tukey* a 5%) aplicado para este fator (Tabela 10).

Tabela 9. Resumo da análise de variância (ANOVA) do pH, teores de cátions e Al da solução do solo nas diferentes camadas (0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm) (LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico) submetido à dosagens do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515

| Fonte de variação | Graus de liberdade | F |
|-------------------|--------------------|-------|
| Variedades | 2 | 6,14* |
| Resíduo | 6 | ----- |
| Total | 8 | ----- |

**significativo ao nível de 1% de probabilidade; *significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns não significativo

Tabela 10. Índice de tolerância de variedades de cana-de-açúcar ao alumínio fitotóxico

| Variedades | IT (%) |
|------------|----------|
| RB855453 | 71,89 b |
| RB966928 | 94,09 a |
| RB867515 | 89,99 ab |

DMS = 20,68

CV% = 9,68

Médias seguidas por letras iguais, não diferem entre si segundo teste de *Tukey*, com 5% de significância

4.2.2 Parte aérea

Na tabela 11 está apresentada a análise da variância para as variáveis biométricas da parte aérea das variedades de cana-de-açúcar testadas (altura média, matéria seca e teor de alumínio).

Tabela 11. Resumo da análise de variância (ANOVA) de altura média, matéria seca e teor de alumínio da parte aérea de variedades de cana-de-açúcar, cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 de cana-de-açúcar colhida mecanicamente

| Fator de variação | Parte aérea | | |
|-----------------------------|-------------|------------------|---|
| | Altura (m) | Matéria seca (g) | teor de alumínio (mg kg ⁻¹) |
| Variedades | ns | * | ** |
| Dosagens de extrato vegetal | ** | ns | ** |
| Variedades*Dosagens | ns | ns | ** |

**significativo ao nível de 1% de probabilidade; *significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns não significativo

Para a variável altura, o teste de comparação de médias (*Tukey* a 5%) foi aplicado para o fator isolado dosagens (Tabela 12); para a variável matéria seca, o teste de comparação de médias (*Tukey* a 5%) foi aplicado para o fator isolado variedades (Tabela 13), para a variável teor de alumínio, o teste de comparação de médias (*Tukey* a 5%) foi aplicado para a interação entre as variedades e as dosagens (Tabela 14).

Tabela 12. Altura média de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens de extrato vegetal de palhada de cana-de-açúcar

| Dosagens de extrato vegetal (tha ⁻¹) | Altura (m) |
|--|------------|
| 0 | 1,62 b |
| 15 | 1,79 ab |
| 19 | 1,89 a |
| 21 | 1,93 a |

DMS = 0,25

CV% = 10,53

Médias seguidas por letras iguais, não diferem entre si segundo teste de *Tukey*, com 5% de significância.

Tabela 13. Produção de matéria seca da parte aérea de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens de extrato vegetal de palhada de cana-de-açúcar

| Variedades | MSPA (g) |
|------------|----------|
| RB855453 | 21,57 ab |
| RB966928 | 25,85 a |
| RB867515 | 19,62 b |

DMS = 5,68

CV%-a = 24,97

Médias seguidas por letras iguais, não diferem entre si segundo teste de *Tukey*, com 5% de significância.

Tabela 14. Teor de alumínio na parte aérea de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens de extrato vegetal de palhada de cana-de-açúcar, em função da interação entre as variedades testadas e as dosagens de extrato vegetal aplicadas nas colunas

| Variedades | Dosagem de extrato (tha ⁻¹) | | | |
|------------|---|-----------|-----------|-----------|
| | 0 | 15 | 19 | 21 |
| RB855453 | 257,33 aA | 154,49 aB | 104,00 aB | 117,33 aB |
| RB966928 | 123,66 bA | 110,00 aA | 99,00 aA | 93,23 aA |
| RB867515 | 129,66 bA | 121,33 aA | 117,66 aA | 119,20 aA |

DMS para colunas = 56,34 DMS para linhas = 62,24

CV% = 21,90

Médias seguidas por letras iguais, minúsculas na coluna ou maiúsculas na linha, não diferem entre si segundo teste de Tukey, com 5% de significância.

4.2.2 Sistema radicular

Na tabela 15 está apresentada a análise da variância para as variáveis biométricas do sistema radicular das variedades testadas (matéria seca, volume e teor de alumínio).

Tabela 15. Resumo da análise de variância (ANOVA) de produção de matéria seca, volume e teor de alumínio do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar (camada 0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm), cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 de cana-de-açúcar colhida mecanicamente

| Fator de variação | Sistema radicular | | |
|-----------------------------------|---------------------|------------------------------|--|
| | Matéria seca (g) | Volume (cm ³) | Teor de alumínio (mg kg ⁻¹) |
| Variedades | ** | ns | ns |
| Dosagens de extrato vegetal | ** | ns | ** |
| Profundidades | ns | ** | ns |
| Variedades*Dosagens | ** | ns | ** |
| Variedades*Profundidades | ns | ns | ns |
| Dosagens*Profundidades | ns | ns | ns |
| Variedades*Dosagens*Profundidades | ns | ns | ns |

**significativo ao nível de 1% de probabilidade; *significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns não significativo

O teste de comparação de médias (*Tukey* a 5%) foi aplicado para a interação entre as variedades e dosagens (Tabela 16), para o fator profundidades (Tabela 17) e para a interação Variedades e Dosagens (Tabela 18), para as variáveis matéria seca; volume e teor de alumínio, respectivamente.

Tabela 16. Produção de matéria seca do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens de extrato vegetal de palhada de cana-de-açúcar

| Variedades | Dosagem extrato vegetal (tha ⁻¹) | | | |
|------------|--|----------|-----------|-----------|
| | 0 | 15 | 19 | 21 |
| RB855453 | 20,59 aB | 26,27 aA | 20,92 aB | 23,42 cAB |
| RB966928 | 21,66 aB | 26,3 aAB | 25,02 aAB | 29,02 bA |
| RB867515 | 20,65 aC | 27,52 aB | 24,42 aBC | 34,66 aA |

DMS para colunas = 4,14 DMS para linhas = 5,25

CV%-a = 5,25 CV%-b = 18,16 CV%-c = 43,78

Médias seguidas por letras iguais, minúsculas na coluna ou maiúsculas na linha, não diferem entre si segundo teste de Tukey, com 5% de significância

Tabela 17. Volume do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar (camada 0-20; 20-40; 40-60 e 60-80cm), cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens de extrato vegetal de palhada de cana-de-açúcar

| Profundidade (cm) | Volume SR (cm ³) |
|-------------------|------------------------------|
| 0-20 | 25,07 a |
| 20-40 | 17,40 b |
| 40-60 | 13,07 c |
| 60-80 | 7,09 d |

DMS = 1,69

CV%-a = 34,56 CV%-b = 38,75 CV%-c = 17,40

Médias seguidas por letras iguais, não diferem entre si segundo teste de Tukey, com 5% de significância

Tabela 18. Teor de alumínio do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico e submetidas à dosagens de extrato vegetal de palhada de cana-de-açúcar

| Variedades | Dosagem extrato vegetal (tha ⁻¹) | | | |
|------------|--|-------------|------------|-----------|
| | 0 | 15 | 19 | 21 |
| RB855453 | 223,82 aA | 136,16 bB | 201,83 abA | 141,5 aB |
| RB966928 | 179,91 aAB | 165,66 abAB | 223,83 aA | 152,25 aB |
| RB867515 | 217,75 aA | 209,00 aA | 167,66 bA | 170,95 aA |

DMS para colunas = 50,82 DMS para linhas = 58,67

CV%-a = 25,74 CV%-b = 27,84 CV%-c = 74,51

Médias seguidas por letras iguais, minúsculas na coluna ou maiúsculas na linha, não diferem entre si segundo teste de Tukey, com 5% de significância

4.2.7 Solução do solo

4.2.7.1 COD, pH, cátions e Al

Na tabela 19 está apresentada a análise da variância para o COD, pH, cátions e ânions e o Al da solução do solo.

Tabela 19. Resumo da análise de variância (ANOVA) do COD, pH, teores de cátions e ânions da solução do solo nas diferentes camadas (0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm) (LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico) submetido à dosagens do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 de cana-de-açúcar colhida mecanicamente

| Fator de variação | Solução do solo | | | | | | |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------------|----|----|----|----|------|
| | C.O.D (μM) | pH (CaCl_2) | K | Ca | Mg | Al | H+Al |
| | -----mmol/dm ³ ----- | | | | | | |
| Variedade (V) | ns | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| Dose extrato vegetal (D) | ns | ** | ** | ** | ns | * | ** |
| Profundidade (P) | ** | ** | ** | ** | * | ** | ** |
| Variedade*Dose | ns | ** | ns | ** | ** | ** | ** |
| Variedade*Profundidade | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** |
| Dose*Profundidade | ns | * | ** | ns | ns | ** | * |
| V*D*P | ns | ns | ns | ns | ns | ns | ns |

**significativo ao nível de 1% de probabilidade; *significativo ao nível de 5% de probabilidade; ns não significativo

Figura 13 A e B. Teor de Carbono orgânico dissolvido (A) e pH da solução do solo (B) nas diferentes camadas (0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm) (LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico) submetido à dosagens do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 de cana-de-açúcar colhida mecanicamente

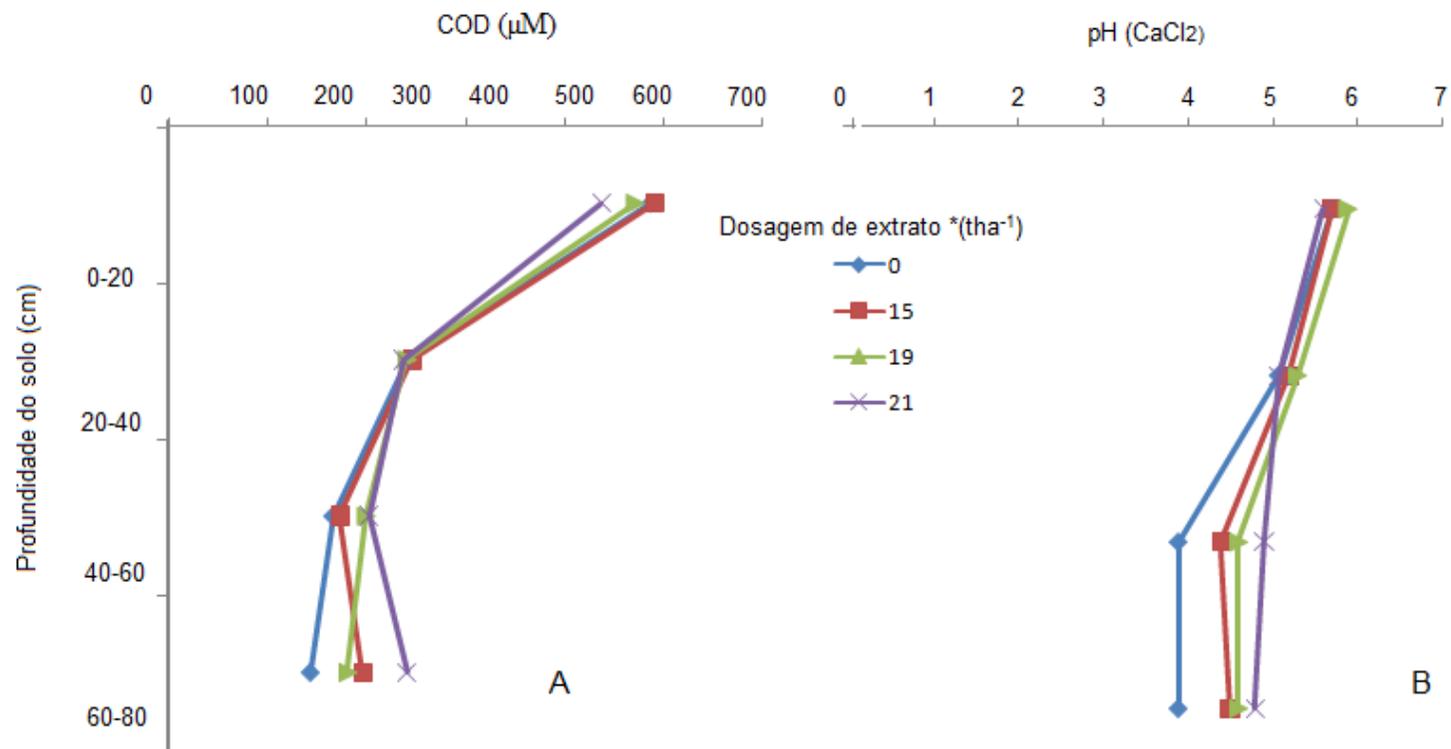


Figura 14 A, B e C. Teores de K (A), Ca (B) e Mg (C) da solução do solo nas diferentes camadas (0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm) (LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico) submetido à dosagens do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 de cana-de-açúcar colhida mecanicamente

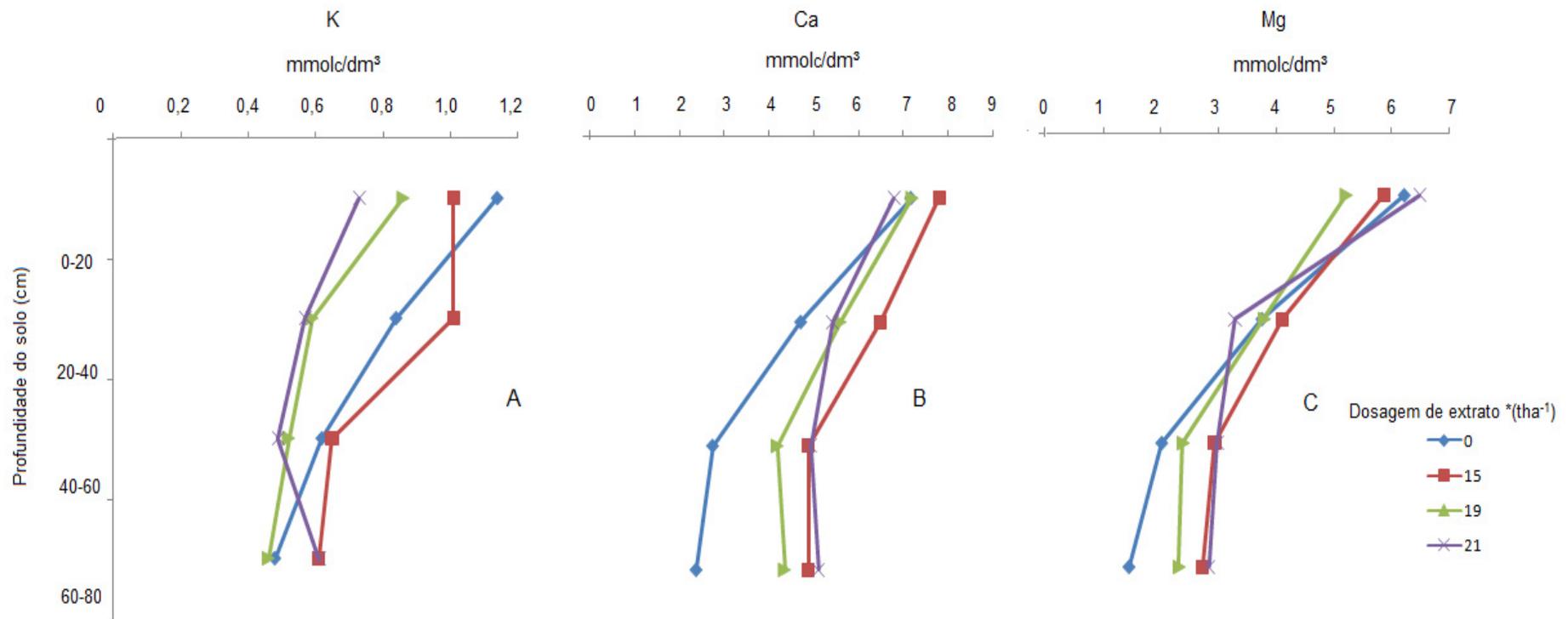
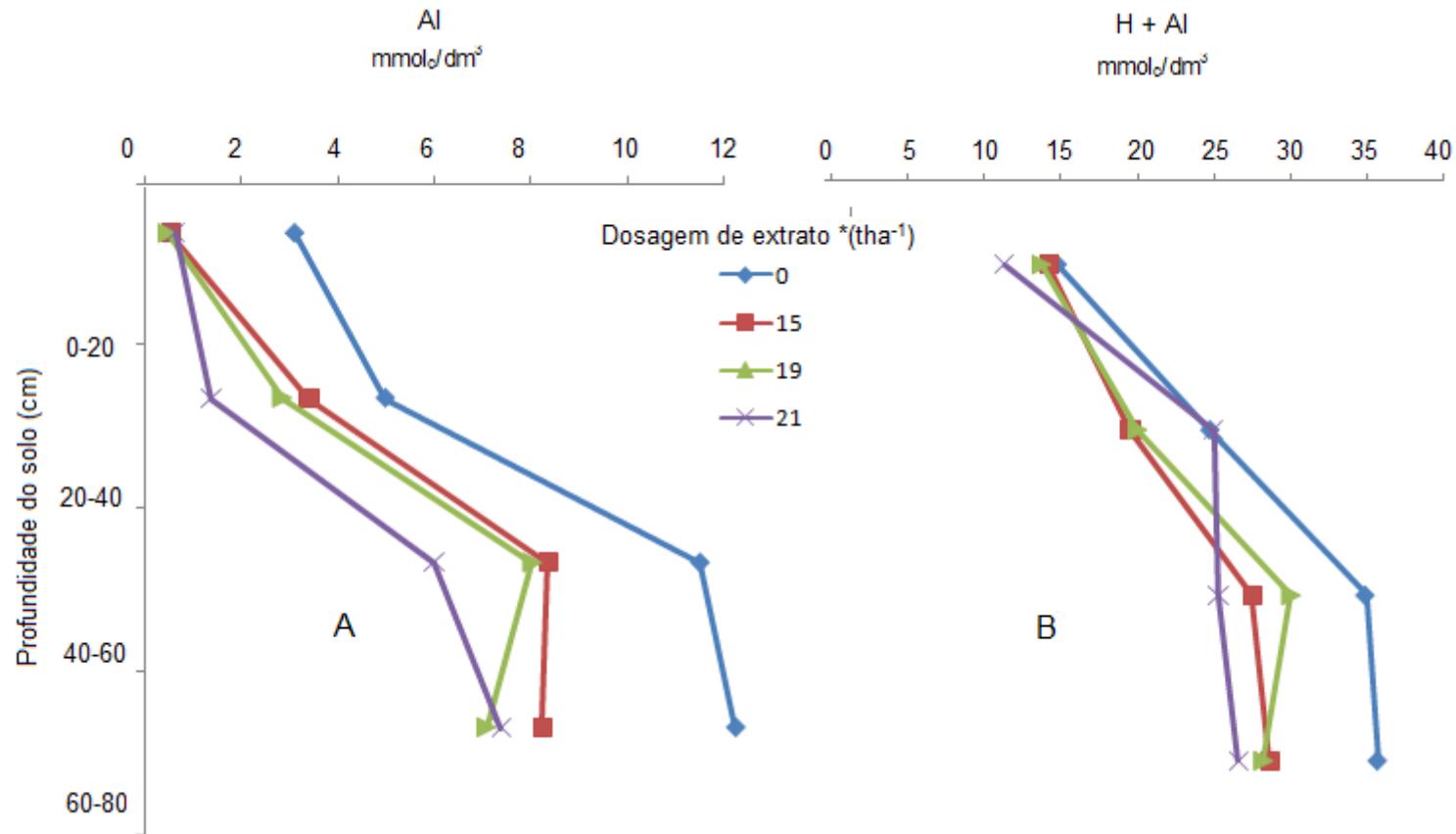


Figura 15. A e B. Teor de Al (A) e H + Al (B) da solução do solo nas diferentes camadas (0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm) (LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico) submetido à dosagens do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 de cana-de-açúcar colhida mecanicamente



5. DISCUSSÃO

5.1 Caracterização química e determinação dos ácidos orgânicos presentes nos extratos vegetais de variedades de cana-de-açúcar

Vários trabalhos já foram realizados no Brasil, com o intuito de comparar o efeito dos resíduos de plantas na disponibilidade de Ca, Mg e K, bem como na complexação do Al (FRANCHINI et al., 1999a; AMARAL et al., 2004), e seus resultados demonstram que os teores de Ca, Mg e K trocáveis aumentam nas camadas superficiais, uma provável resposta à quantidade presente no resíduo e não ao aumento da disponibilidade do nutriente preexistente no solo. Quanto ao Al em solução, os ácidos orgânicos mostram-se capazes de promover sua complexação, tornando-o indisponível.

O maior volume de NaOH consumido na titulação do extrato vegetal da variedade RB867515 indicou maior concentração de grupos funcionais R-COOH e R-OH (cargas negativas) responsáveis pela neutralização de H⁺ (Tabela 6). A adição da solução básica de NaOH aumentou lentamente o pH da solução, devido à formação de um tampão que manteve o pH aproximadamente constante enquanto ainda existia uma concentração apreciável de ácido orgânico na solução que pudesse reagir com a base adicionada. Quando a maior parte das moléculas dos ácidos orgânicos foram neutralizadas pela base, o pH cresceu mais rapidamente, apresentando um aumento brusco ao atingir o ponto de equivalência.

Cassiolato *et al.* (2002), fazendo uso de titulação potenciométrica, realizaram a determinação de ácidos alifáticos e aromáticos simples, com NaOH 0,05 mol L⁻¹, titulando amostras de extrato de plantas do pH 3,0 ao 7,0. Neste estudo, concluíram que a eficácia na neutralização de Al tóxico e mobilização de nutrientes no solo está relacionada ao volume de NaOH necessário para elevar o pH de 3,0 a 7,0. Logo, os resultados obtidos por este trabalho, apontam maior eficácia na neutralização de Al tóxico e mobilização de nutrientes no solo para o extrato vegetal da palhada da variedade RB867515, pois, a mesma apresentou volume de NaOH necessário para elevar o pH de 3,0 a 7,0 estatisticamente superior aos extratos vegetais das demais variedades testadas.

A determinação da soma de cátions solúveis pode correlacionar-se com os efeitos dos materiais vegetais no aumento do pH e do Ca trocável e na diminuição do Al trocável do solo (FRANCHINI et al., 1999a; MIYAZAWA et al., 1993; MEDA et al., 2001; CASSIOLATO et al., 2002), pois os cátions Ca, Mg e K ligados nos compostos orgânicos tornam-se quimicamente neutros, evitando sua adsorção aos colóides do solo. Assim, quando houver a

presença de H^+ ou Al^{3+} , estes cátions ligados aos compostos orgânicos tendem a ser substituídos por H^+ ou Al^{3+} , formando compostos estáveis protonados ou complexo Al-orgânico, atóxicos às plantas (MIYAZAWA; PAVAN; FRANCHINI, 2000), sendo liberados em profundidade.

Segundo Franchini *et al.* (2003), os resíduos vegetais que apresentam maior capacidade para mobilizar Ca^{2+} no perfil do solo são aqueles com alto teor de K^+ solúvel em seus tecidos. No estágio reprodutivo, o processo de maturação dos tecidos diminui o teor de substâncias orgânicas responsáveis pelo transporte de Ca e pela neutralização da acidez (MIYAZAWA *et al.*, 2000). Já resíduos com maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} solúveis, por sua vez, são mais eficientes em imobilizar o Al^{3+} da solução do solo, ocasionando maior neutralização desse elemento no perfil do solo. Moraes *et al.* (2007), avaliando a capacidade de neutralização de resíduos vegetais, constataram que 20 tha^{-1} de nabo forrageiro apresentaram influência relativamente pequena na mobilização de Mg para as camadas inferiores e na neutralização ou remoção do Al^{3+} , sendo efetivo na mobilização de K^+ no perfil do solo.

O nutriente acumulado em maior quantidade pelas variedades foi o K, seguido por Ca e Mg (Tabela 6). Esses maiores acúmulos de K confirmaram a alta reciclagem desse elemento pelas gramíneas (RAIJ *et al.*, 1997).

Sendo assim, os resultados deste estudo demonstram que o extrato vegetal da variedade RB867515 apresentou maior acúmulo de K, apresentando assim maior potencial de mobilização de Ca^{2+} . Quanto à neutralização de Al^{3+} , os extratos vegetais das variedades RB867515 e RB855453 foram as que apresentaram maior potencial, já que estes apresentaram maior acúmulo de Ca e Mg.

Observou-se aumento da condutividade elétrica (CE) dos extratos vegetais das variedades estudadas a medida que a soma de cátions aumentou. Houve correlação significativa entre essas variáveis, assim como observada em diversos trabalhos (MIYAZAWA; PAVAN; FRANCHINI, 2000; CASSIOLATO *et al.*, 2002). Da mesma forma, Franchini *et al.* (1999) constataram que as variações na CE foram correlacionadas com os teores solúveis de bases nos resíduos vegetais.

O extrato vegetal da variedade RB867515 apresentou consumo de NaOH, teor de cátions básicos e a CE estatisticamente superiores aos extratos das demais variedades estudadas, indicando assim, maior capacidade de neutralização do Al fitotóxico em relação às demais. O plantio desta variedade pode ser feito em ambientes de produção de baixa

fertilidade (B, C, D e E), já que a mesma apresentou variáveis que permitem esta flexibilidade em seu manejo.

5.1.2 Análise de ácidos orgânicos por cromatografia líquida de alta eficiência

Bolan; Naidu e Baskaran (1994), identificaram, por meio da técnica CLAE, uma pequena variedade e baixos teores de ácidos orgânicos em solo e em serrapilheira, enquanto em composto de aviário foi observada a presença dos ácidos acético, cítrico, fumárico, láctico, málico, oxálico, tartárico/fórmico, ressaltando a sobreposição de pico para os dois últimos ácidos.

Houve predomínio do ácido trans-aconítico para todos extratos vegetais da palhada das variedades testadas, sendo seguido pelos ácidos cítrico, málico e succínico, na variedade RB855453, pelos ácidos cítrico, succínico e fumárico, na RB966928, e pelos ácidos cítrico, succínico e málico, na RB867515. Estes resultados são semelhantes aos de Gutierrez e Ferrari (1988), que determinaram ácidos orgânicos presentes em folhas de cana-de-açúcar, sendo os ácidos trans-aconítico, málico e glutárico presentes em maior proporção.

O grau de neutralização do Al^{3+} é determinado pela estabilidade do complexo orgânico formado, ou seja, cada ácido orgânico apresenta uma característica responsável pela maior ou menor neutralização. Os ácidos cítrico e aconítico, por exemplo, encontrados em ambos os extratos, formam complexos mais estáveis com os metais do que outros AOBPM, tais como o acético e o láctico. O ácido cítrico pode formar dois anéis de 5 ou 6 átomos, sendo denominado de alta atividade de complexação e competição no solo, pois apresenta maior número de grupos funcionais ativos que os demais AO e, portanto, maior efetividade na inibição dos sítios de troca (FRANCHINI et al., 1999a; MIYAZAWA *et al.*, 2000).

Os ácidos trans-aconítico, cítrico e succínico constituíram cerca de 90% do total de ácidos orgânicos encontrados nos extratos vegetais da palhada das três variedades de cana-de-açúcar. Os resultados foram semelhantes aos observados por Clark (1969) para folhas de cevada, milho, centeio e sorgo.

Dentre os extratos avaliados, acredita-se que os resíduos da palhada da variedade RB867515, quando adicionados ao solo, possam introduzir, inicialmente, maiores quantidades de AOBPM e afetar fortemente a mobilidade e a disponibilidade de Ca, Mg e K. Esta variedade apresentou conteúdo total de ácidos orgânicos de alta atividade de complexação estatisticamente superior às variedades RB855453 e RB966928 (Tabela 7). Isto implica em

maior teor de substâncias orgânicas responsáveis pela neutralização do Al fitotóxico e pelo transporte de cátions trocáveis ao longo do perfil do solo.

Baseando-se em suas características, aplicou-se nas colunas do experimento o extrato vegetal obtido da variedade RB867515.

5.2 Efeitos da aplicação de extrato vegetal no desenvolvimento da cana-de-açúcar

5.2.1 Índice de tolerância ao alumínio

As plantas da variedade RB966928 apresentaram índice de tolerância ao alumínio estatisticamente superior às plantas das variedades RB855453 e RB867515, implicando em maior capacidade de desenvolvimento quando cultivada em solos com alta saturação por Al, ou seja, em ambientes de cultivo considerados desfavoráveis. Estudando o comportamento de variedades de cana-de-açúcar ao Al em solução nutritiva, Oliveira (2012) observou que esta variedade apresentou maior tolerância este tipo de estresse, quando comparada as variedades RB855453 e RB867515 .

5.2.2 Parte Aérea e Sistema radicular

5.2.2.1 Altura média das plantas

Para a variável altura média pode-se constatar, com os resultados deste estudo, que a adição do extrato vegetal da palhada da variedade de cana-de-açúcar RB867515 resultou em maior crescimento das plantas, independentemente da dosagem aplicada, quando estas foram comparadas a não aplicação do mesmo. Diversos autores (CORAZZA et al., 1999; PAVINATO; ROSOLEM, 2008; SIQUEIRA NETO et al., 2009; CARIDE et al., 2012), relataram que o aumento no estoque de MOS proporcionou acréscimos tanto no desenvolvimento da parte aérea, quanto no sistema radicular de várias culturas, corroborando os resultados encontrados neste estudo.

A aplicação do equivalente a 15, 19 e 21 tha^{-1} de palhada proporcionou incrementos significativos no crescimento das variedades testadas. As maiores alturas foram atingidas quando aplicou-se a dosagem equivalente a 21 tha^{-1} de palhada. Isto, pode estar associado a maior disponibilidade e eficiência de utilização dos nutrientes, assim como a manutenção da

umidade do solo, em ambientes com acréscimo de MOS (LAL, 2004; MALHI et al., 2011; PAUL et al., 2013).

5.2.2.2 Matéria seca da parte aérea e do sistema radicular

A produção de matéria seca da parte aérea foi influenciada somente pelas variedades, sendo a produção de matéria seca na parte aérea da variedade RB966928 estatisticamente superior às variedades RB855453 e RB867515. Isto indica que houve maior acúmulo de biomassa, quando cultivada em solo com alta saturação por Al (m%), independentemente da aplicação dos extratos vegetais da palhada da cana-de-açúcar. A ausência de efeitos significativos na produção de matéria seca após aplicação dos extratos vegetais da palhada de cana-de-açúcar (Tabela 11) pode estar relacionado ao curto tempo do experimento, pois, geralmente, as alterações que o aumento do estoque de MOS promove ocorrem de forma lenta, muitas vezes, perceptíveis somente após vários anos ou décadas (PERALTA; WANDER, 2008).

Em relação a produção de matéria seca do sistema radicular, as variedades apresentaram incremento após a aplicação do extrato vegetal, independentemente da dosagem. A variedade RB855453 apresentou maior produção de matéria seca, quando aplicou-se o equivalente a 15 tha^{-1} de palhada de cana-de-açúcar. Já as variedades RB966928 e RB867515 apresentaram maior matéria seca quando foram submetidas a aplicação do equivalente a 21 tha^{-1} de palhada de cana-de-açúcar.

Machado (1987), estudando variedades de cana-de-açúcar, relatou que, durante o desenvolvimento da cultura, a matéria seca radicular e da parte aérea distribuem-se em função das condições ambientais.

A parte aérea e o sistema radicular da cana-de-açúcar competem por fotoassimilados, sendo que a manutenção de uma arquitetura radicular com maior quantidade de raízes significa maior quantidade de reservas metabólicas, enquanto a maior distribuição em profundidade, apesar de reduzir a altura dos colmos, confere a planta maior possibilidade de contato com camadas mais úmidas e menor estresse em períodos de deficiência hídrica (VASCONCELOS, 2002). Essa pode ser uma das razões das diferenças encontradas entre as massas do sistema radicular e da parte aérea, além das diferenças varietais e de ciclo da cultura.

5.2.2.3 Teor de alumínio da parte aérea e do sistema radicular

O acúmulo de alumínio na parte aérea e no sistema radicular das variedades testadas, apresentou decréscimos significativos quando houve adição do extrato vegetal da palhada de cana-de-açúcar, independentemente da dosagem aplicada. Estes resultados apontaram uma inibição do acúmulo de alumínio quando submetidos à aplicação dos extratos vegetais de palhada de cana-de-açúcar. Essas observações condizem com a maioria dos resultados encontrados na literatura (FOY et al., 1965; FOY, 1974; FAGERIA; ZIMMERMANN, 1979; PAVAN, 1982), quando se trata da adição de matéria orgânica ao solo.

Os resultados revelam que houve maior acúmulo de Al no sistema radicular do que na parte aérea, concordando com resultados reportados na literatura para várias espécies de plantas (PAVAN; BINGHAM, 1982; CAMARGO, 1985; BENNET et al., 1986), confirmando, mais uma vez, que o alumínio é um elemento de baixa mobilidade na planta, ou que os mecanismos de tolerância estão localizados na raiz.

Pode-se perceber que a variedade RB966928, considerada tolerante ao Al fitotóxico, apresentou os menores teores de alumínio, tanto na parte aérea, como no sistema radicular, indicando que esta tolerância pode estar associada à maior compartimentalização desse elemento em determinados sítios das raízes, ou formação de quelatos com proteínas e ácidos orgânicos (FOY, 1988; TAYLOR, 1991), resultando em menor translocação de alumínio para a parte aérea.

5.2.2.4 Volume do sistema radicular

O volume e distribuição do sistema radicular, independentemente da variedade e das dosagens de extrato vegetal aplicadas, foi estatisticamente superior na superfície (camada de 0-0,20 m), diminuindo significativamente a medida que a profundidade aumentou, evidenciando maior concentração do sistema radicular próximo à superfície, o que está de acordo com a literatura (INFORZATO; ALVAREZ, 1957; SAMPAIO; SALCEDO, 1987; BALL-COELHO et al., 1992).

Em solos de baixa fertilidade, constata-se que as raízes da cana-de-açúcar alcançam cerca de 0,6 m de profundidade (KOFFLER, 1986; SEGATO; MATTIUZ; MOZAMBANI, 2006).

Para todas as variedades, mais de 60% da massa radicular se desenvolveram na camada de 0-0,40 m, sendo condizente com os resultados relatados por vários autores.

Vários trabalhos foram desenvolvidos abordando a distribuição do sistema radicular de cana-de-açúcar no perfil do solo. Sampaio; Salcedo (1987), estudando o desenvolvimento radicular de variedades de cana-de-açúcar, identificaram que 75 % da massa radicular estava localizada nos primeiros 20 cm superficiais e que 55 % estavam a menos de 30 cm do centro da touceira. Por outro lado, Jensen (1951) verificou que as variedades diferem pouco na distribuição de suas raízes e que todas emitem grande quantidade próximo à superfície do solo.

5.2.2.5 COD e pH da solução do solo

O carbono orgânico dissolvido é proveniente de produtos do metabolismo e decomposição de plantas, animais e microorganismos; é constituído basicamente de ácidos fúlvicos, húmicos e outros compostos orgânicos (ARZHANOVA; VERTEL, 1981). A concentração de COD está relacionada com a sazonalidade pluviométrica, cobertura vegetal, a posição do solo no relevo, o pH da solução do solo, textura do solo e concentração de ferro e alumínio no mesmo.

A figura 12 A, indica a diminuição da concentração de COD em profundidade, sendo mais atenuada quando houve a aplicação das duas maiores dosagens de extrato vegetal. Percebe-se também que, os menores teores de COD foram registrados quando não houve aplicação do extrato, evidenciando assim, que o material orgânico, quando mantido na superfície do solo, aumenta os teores de COD. Em profundidade, observou-se um acréscimo significativo de Al na solução do solo (Figura 14 A e B) seguida de uma diminuição significativa dos teores de COD, concordando com o que foi proposto por alguns autores, como Thurman (1985), McClain et al. (1997), Batjes et al. (1999), Kalbitz (2001), Fiedler; Kalbitz (2003), Schwesig et al. (2003), que encontram a existência de correlação negativa entre os teores de COD e de alumínio, devido os processos de adsorção do mesmo às partículas de argila e à complexação do alumínio.

Segundo Aoyama (1996), com a decomposição de materiais orgânicos, também ocorre uma alteração das formas orgânicas com a redução da fração de compostos hidrossolúveis de baixo peso molecular e aumento na formação de substâncias com maior peso molecular (ácidos húmicos e fúlvicos). Desse modo, a redução do teor COD estaria associada à redução de Al, Ca e Mg em solução com o tempo.

O pH da solução do solo apresentou elevação significativa quando houve adição de extrato vegetal (Figura 12 B), sendo mais evidente em profundidade, a partir de 20cm, onde o

tratamento que não houve aplicação do extrato vegetal apresenta pH significativamente menor, quando comparado aos tratamentos em que houve a aplicação. Hue e Amien (1989) e Franchini et al. (1999) citaram que um dos principais mecanismos responsáveis pela eficiência da correção da acidez do solo, com a aplicação superficial de calcário, é a liberação de compostos hidrossolúveis de baixa massa molar pelos materiais vegetais presentes na superfície do solo e, pela reação de troca de ligante entre ânions orgânicos e OH terminal em óxidos de Fe e Al.

O aumento de pH da solução do solo pela aplicação de material orgânico foi demonstrado por diversos trabalhos (HUE; AMIEN, 1989; MIYAZAWA et al., 1993; CASSIOLATO et al., 1999; FRANCHINI et al., 1999a; PAVINATO; ROSOLEM, 2008). Tissi; Caires e Pauletti (2004) também observaram correção da acidez do solo em profundidade, em latossolos de textura média e muito argilosa, quando houve a aplicação de superficial de calcário em sistema de semeadura direta de milho. O aumento do pH na presença dos extratos vegetais e a extensão dos efeitos corretivos em profundidade estão relacionados com o poder alcalinizante que estes materiais apresentam. Entretanto, as causas desse comportamento ainda são contraditórias. A reação de troca entre H e Al, os principais cátions ácidos do solo, por Ca, Mg e K presentes no resíduo vegetal, aumentando a saturação por bases, é uma possibilidade (HOYT; TURNER, 1975; BESSHO; BELL, 1992).

Resultados semelhantes foram relatados por Cassiolato et al., (2000) em um Latossolo Vermelho-Escuro, com aumentos de pH até 10 cm, quando o calcário foi aplicado em superfície, e até 20 cm, quando extratos de aveia foram aplicados junto com a calagem. Meda et al., (2001) verificaram aumento do pH até 20 cm de profundidade com aplicação de extratos de tremoço sem calcário em um solo ácido.

Os resultados deste estudo, demonstram que, o efeito da calagem aplicada superficialmente somada a adição do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515, proporcionou elevação de pH médio da solução do solo, independentemente da dosagem aplicada. Isto condiz com os resultados obtidos por vários autores, que constataram a elevação do pH em subsolo, por meio de experimentos com colunas de solo (FRANCHINI et al., 1999a,b; MIYAZAWA et al., 1999; MEDA et al., 1999; CASSIOLATO et al., 1999).

5.2.2.6 Disponibilidade de Ca, Mg e K no perfil do solo

De acordo com Pavinato e Rosolem (2008), a adição de resíduos vegetais pode promover a elevação do pH, por promover a complexação de H e Al com compostos

orgânicos do resíduo vegetal, deixando Ca, Mg e K livres em solução, o que pode ocasionar aumento na saturação por bases no complexo de troca do solo. Estes compostos também aumentam a mobilidade no perfil do solo dos produtos originados da dissolução do calcário aplicado em superfície.

A aplicação do extrato vegetal, na média dos tratamentos, favoreceu o aumento dos teores de Ca e Mg em profundidade, quando comparou-se ao tratamento sem a aplicação de extrato (Figura 13 A, B e C), principalmente nas camadas de 20-40, 40-60 e 60-80 cm. Meda et al., (2001) também relataram aumentos do Ca trocável na presença de extratos de aveia até 10 cm de profundidade, enquanto o extrato de tremoço promoveu alterações até à camada de 20–25 cm.

Os teores de Ca, Mg e K diminuíram gradativamente no perfil do solo, com o aumento da profundidade, em todos os tratamentos. O movimento de Ca e Mg no perfil do solo pode ser explicado pela formação de compostos orgânicos hidrossolúveis a partir de ácidos orgânicos liberados pela decomposição dos restos vegetais (MIYASAWA et al., 1993). Na camada superficial do solo, esses ligantes orgânicos complexam os cátions trocáveis Ca e Mg, formando moléculas de carga neutra e facilitando sua descida no perfil. Deste modo, além de aumentarem a disponibilidade de Ca e Mg em subsuperfície, ainda podem diminuir a saturação por Al (CAIRES et al., 1998).

O teor médio de K trocável (Figura 13 A) na camada superficial (0-20 cm) foi maior no tratamento sem aplicação de extrato vegetal, provavelmente, devido à menor absorção pela cultura quando não se realizou a aplicação de extrato vegetal. Houve tendência de queda nos teores de K trocável em solução com o aumento da profundidade, tendo as maiores concentrações ocorrido sempre na camada superficial do solo. Amaral (1998) observou acúmulo de K trocável na superfície do solo, porém, ao longo do tempo, esse acúmulo não se manteve. Assim como Miyazawa et al., (2002), em estudo realizado em colunas de PVC com amostras de um Latossolo Vermelho ácido, semelhante ao do presente estudo, verificaram que extratos vegetais aplicados com calcário aceleraram os transportes de Ca e Mg em profundidade, enquanto o K teve seus teores aumentados nas camadas superficiais do solo.

O comportamento diferenciado do K deve-se, provavelmente, à sua dinâmica no solo, que é mais dependente da frequência de adubação potássica, aliado a fatores tais como tipo de solo, CTC e influência do pH na CTC (De MARIA; CASTRO, 1993).

5.2.2.7 Acidez trocável e potencial

O extrato vegetal, adicionado na superfície das colunas, reduziu acentuadamente os teores de alumínio trocável (Figura 14 A) e H+Al (Figura 14 B) tanto superficialmente quanto em profundidade, independentemente da dosagem aplicada, principalmente, a partir de 20-40 cm, onde as diferenças foram significativas, quando comparados ao tratamento sem aplicação do extrato vegetal.

Na camada superficial o Al trocável foi reduzido drasticamente, quase sendo anulado, quando aplicou-se as 3 dosagens do extrato vegetal. Nas camadas inferiores, a aplicação do equivalente a 21 tha^{-1} promoveu as maiores reduções nos teores de Al trocável e nos teores de H+Al.

As reduções nos teores de Al trocável e H+Al observadas em relação ao tratamento sem aplicação do extrato vegetal, provavelmente ocorreram em função do efeito alcalinizante desses materiais, uma vez que houve um aumento de pH no solo, e do efeito dos ácidos orgânicos na complexação do Al. Assim como no presente estudo, Franchini et al. (1999b, 2001a,b; 2003) e Meda et al. (2002) também observaram redução da acidez em profundidade pela aplicação de materiais vegetais isolados ou associados à calagem.

Comprovando o efeito dos materiais vegetais nos atributos químicos do solo, Miyazawa et al., (2002) observaram redução do Al trocável até 10 cm em um solo ácido na presença de calagem mais extrato de trigo e até 50 cm com extrato de aveia preta. Nas camadas superficiais (0–10 cm), ambos os extratos promoveram redução do H+Al a valores próximos a calagem, sendo o nabo mais eficiente que a calagem em todas as camadas. Liu & Hue (1996) verificaram que o efeito do calcário aplicado em superfície na saturação por Al ficou restrito a 10 cm de profundidade, enquanto a aplicação de Ca-fulvato derivado de materiais orgânicos promoveu redução até à camada de 45–50 cm.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Vários trabalhos têm indicado que compostos orgânicos possuem alta capacidade para detoxificação do Al e mobilização de Ca para a subsuperfície do solo (WATT et al., 1991; NOBLE et al., 1995; SMITH et al., 1995; LIU; HUE, 1996). Os resultados observados neste trabalho indicam que compostos orgânicos hidrossólúveis de baixo peso molecular, extraídos de resíduos vegetais da cana-de-açúcar colhida mecanicamente, sem despalha a fogo, também apresentam o mesmo comportamento.

As alterações nas características químicas do solo correlacionaram-se com as características químicas do extrato vegetal (concentração de AOT, pH, condutivimetria, soma de cátions), demonstrando que tais alterações foram promovidas pelos compostos orgânicos hidrossolúveis nos materiais vegetais e que os métodos utilizados foram efetivos na estimativa desses compostos orgânicos.

Os estudos realizados por Miyazawa et al. (1993), Franchini et al. (1999a,b), Ziglio et al. (1999) e Franchini et al. (2001), apresentaram efeitos mais significativos quanto a neutralização da acidez e transporte de cálcio e magnésio em profundidade. Isto pode ter ocorrido, porque nestes experimentos as dosagens de resíduos eram elevadas, chegando a 80 t ha^{-1} , e aliado a este fato, o material foi incorporado ao solo, fazendo com que os efeitos desta adição de material vegetal fossem mais significativos.

A adição de resíduos vegetais pode ser vantajoso em relação à calagem isolada, devido à capacidade de aumentar a saturação por bases, já que a ação do calcário aplicado superficialmente é limitada pela lenta taxa de dissolução do CaCO_3 (PAVAN, 1994) e seu efeito na redução da acidez do subsolo depende da lixiviação de sais inorgânicos e, ou, orgânicos por meio do perfil do solo.

7. CONCLUSÕES

Para as variedades RB855453, RB966928 e RB867515 e nas condições experimentais em que este estudo foi conduzido, concluiu-se que:

- O extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 apresentou maior potencial de transporte de cátions trocáveis ao longo do perfil do solo e de neutralização do Al fitotóxico;
- A aplicação do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515 teve efeito positivo no desenvolvimento radicular das variedades, promoveu a elevação do pH do solo, amenização da toxicidade do Al e, a disponibilidade de cátions básicos até às subcamadas das colunas de solo.
- A composição química do extrato vegetal apresentou correlação significativa com as alterações de pH, Al trocável, H+Al e a saturação por bases nas colunas de solo.
- As variedades de cana-de-açúcar diferiram quanto à tolerância ao Al do solo, quanto ao acúmulo de biomassa da parte aérea e do sistema radicular; quanto ao acúmulo de alumínio na parte aérea e do sistema radicular e quanto ao aprofundamento das raízes;

- O desenvolvimento do sistema radicular dependeu das variedades, das dosagens de extrato vegetal e da interação entre estas variáveis;
- A dosagem do extrato vegetal da palhada da variedade RB867515, que proporcionou melhora efetiva nos atributos do solo, foi a equivalente a 21 tha^{-1} ;
- As variedades foram classificadas quanto a tolerância ao Al, da seguinte forma: RB966928 > RB855453 > RB867515.

8. REFERÊNCIAS

- ABRAMO FILHO, J.; MATSUOKA, S.; SPERANDO, M.L.; RODRIGUES, R.C.D.; MARQUIETTI, L.L. Resíduo da colheita mecanizada da cana crua. **Álcool e Açúcar**, v.13, n.67,p.23-25, 1993.
- ABREU Jr., C.H.; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A.F. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. **Scientia Agrícola**, v.60, n.2, p.337-343, 2003.
- ALONSO, O. Raio x dos canaviais: Censo revela variedades mais cultivadas. Revista **Canavieiros**, Sertãozinho, ed. 39. Ano IV. p.20-21, set. 2009.
- ALVAREZ, I.A.; CASTRO, P.R. DE C. E; NOGUEIRA, M.C.S. Crescimento de raízes de cana crua e queimada em dois ciclos. **Scientia Agrícola**, v.57, n.4, p.653-659, 2000.
- AMARAL, A.S.; ANGHINONI, I. & DESCHAMPS, F.C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 28:115-123, 2004.
- ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R.F. et al. (ed). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, p.873-928. 2007.
- AOYAMA, M. Fractionation of water-soluble organic substances formed during plant residue decomposition and high performance size exclusion chromatography of the fractions. **Soil Science and Plant Nutrition**, v.42, p.31-40, 1996.
- ARAÚJO, A.R. **Calagem e extrato vegetais hidrossolúveis na movimentação de íons em solo**. Dissertação (Mestrado).Universidade Federal de Lavras. 85p. 2003.
- ARZHANOVA, V.S.; VERTEL, Y.F. Trace elements and soluble organic matter in lysimeter water. **Sovietic Soil Science**, v. 13, p.72-78, 1981.
- BACCHI, O.O.S. Botânica da cana-de-açúcar. In: ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1983. cap.2, p.24-37.
- BALL-COELHO, B.; SAMPAIO, E.V.S.B.;TIESSEN, H.;STEWART, J.W.B.Root dynamic in plant ratoon crops of sugar cane. **Plant and Soil**, v.142, p.297-305, 1992.
- BATJES, N.H.; DIJKSHOORN, J.A. Carbon and nitrogen stocks in the soils of the Amazon Region. **Geoderma**, v.89, n.3/4, p.273-286, 1999.
- BEAUCLAIR, E.G.F. de; SCARPARI, M.S. Noções fitotécnicas. In: RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI,M.L.C.; CASAGRANDE, D.V.; IDE, B.Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**.Piracicaba: T. C. C. Ripoli, 2007. p. 65-73.

- BENNET, R.J. et al. Aluminium toxicity and induced nutrient disorders involving the uptake and transport of P, K, Ca and Mg in Zea mays L. S. Afr. J. **Plant Soil**, Pretoria, v. 3, p. 11-17, 1986.
- BESSHO, T.; BELL, L.C. Soil solid and solution phase changes and mung bean response during amelioration of aluminum toxicity with organic matter. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.140, n.2, p.183-196, 1992.
- BLACKBURN, F. **Sugarcane**. New York: Longman, 1984. 414p.
- BOHNEN, H. Acidez e calagem. In: GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; TEDESCO, M. J. (Org.). **Princípios de fertilidade de solo**. Porto Alegre: Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia, UFRGS, 1995. p. 51-76.
- BOLAN, N. S., NAIDU, R., MAHIMAIRAJA, S.; BASKARAN, S. Influence of low-molecular-weight organic acid on the solubilization of phosphates. **Biol. Fertil. Soils**. 18(4): 311-319. 1994.
- CAIRES, E.F.; CHUEIRI, W.A.; MADRUGA, E.F. & FIGUEIREDO, A. Alterações de características químicas do solo e resposta da soja ao calcário e gesso aplicados na superfície em sistema de cultivo sem preparo de solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 22:27-34, 1998.
- CALHEIROS, G. G.; BARBOSA, G. V. de S. Análise da interação de genótipos RB de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) com ambientes de cultivo em Alagoas. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIRO E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 6., 1996, Maceió. **Anais...** Maceió: STAB, 1996. p. 253-262.
- CÂMARA, G.M.S. Ecofisiologia da cultura de cana-de-açúcar. In: CÂMARA, G.M.S.; OLIVEIRA, E.A.M. (Ed.). **Produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba:ESALQ/FEALQ, 1993. p209-225.
- CAMARGO, O.A.; ALLEONI, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, 1997. 132p.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas, Instituto Agrônomo, 2009. 77 p. (Boletim Técnico 106).
- CAMBRAIA, J.; GOMES, M. M. S.; SANT'ANNA, R.; ESTEVÃO, M. M. Efeito de diferentes níveis de alumínio na solução nutritiva sobre a composição da fração nitrogenada em sorgo. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Campinas, v. 2, n. 2, p. 47-52, 1990.
- CAMPOS, D.C. **Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o seqüestro de carbono**. Piracicaba, 2003.103p. Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2003.
- CANCADO, J.E.D.; SALDIVA, P.H.N.; PEREIRA, L.A.A.; LARA, L.B.L.S.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L.A.; ARBEX, M.A.; ZANOBETTI, A.; BRAGA, A.L.F. The impact of sugar cane-burning emissions on the respiratory system of children and the elderly. **Environmental Health Perspectives**, Research Triangle Park, v. 114, n. 5, p. 725-729, May 2006.
- CARIDE, C.; PIÑEIRO, G.; PARUELO, J.M. How Does Agricultural Management Modify Ecosystem Services In The Argentine Pampas? The Effects On Soil C. Dynamics. **Agriculture, Ecosystems And Environment**, v.154, p.23-33, 2012.
- CASAROLI, D.; Van LIER, Q.J. Critérios para determinação da capacidade de vasos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.59-66, 2008.

CASSIOLATO, M.E.; MEDA, A.R.; PAVAN, M.A.; MIYAZAWA, M.; OLIVEIRA, J.C. Avaliação de cultivares de aveia quanto a mobilização do calcário em solo ácido. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DA AVEIA, 19., Porto Alegre, 1999. **Resumos**. Porto Alegre: UFRGS, p.346-347, 1999.

CASSIOLATO, M.E.; MEDA, A.R.; PAVAN, M.A.; MIYAZAWA, M. & OLIVEIRA, J.C. Evaluation of oat extracts on the efficiency of lime in soil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, 43:533-536, 2000.

CASSIOLATO, M.E.; MIYAZAWA, M.; MEDA, A.R. & PAVAN, M.A. A laboratory method to estimate the efficiency of plant extract to neutralize soil acidity. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, 45:183-187, 2002.

CASTRO, P.R.C.; KLUGE, R.A. Ecofisiologia de culturas extrativas: cana-de-açúcar; seringueira; coqueiro; dendezeiro e oliveira. **Cosmópolis: Stoller do Brasil**, 2001. 138p.

CASTRO, C. N.; MOLIN, J. P. Definição de unidades de gerenciamento do solo através da sua condutividade elétrica e variáveis físico-químicas utilizando classificação Fuzzy. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: USP/ESALq, 2004.

CHAFFAI, R.R.; MARZOUK, B.; FERJANI, E.E. Aluminum mediates compositional alterations of polar lipid classes in maize seedlings. **Phytochemistry**, Oxford, v. 66, n. 16, p. 1903-1912. 2005.

CLARK, R.B. Organic acids from leaves of several crop plants by gas chromatography. **Crop Science**, Madison, 9: 341-3, 1969.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira : cana-de-açúcar, segundo levantamento, agosto/2013 - Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília : Conab 2013. Disponível em: < www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_08_08_09_39_29_boletim_cana_portugues_abril_2013_1o_lev.pdf > Acesso em: 28 set 2013.

CONCEIÇÃO, L. D. H. C. S. **Herança da tolerância à toxicidade ao alumínio (Al³⁺) em milho e identificação de regiões cromossômicas associadas ao caráter**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006, 87p. Tese Doutorado.

CORAZZA, E.J.; SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; GOMES, A.C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.425-432, 1999.

COSTA, M.C.G.; MAZZA, J.A.; VITTI, G.C.; JORGE, L.A. DE C. Distribuição radicular, estado nutricional e produção de colmos e de açúcar em soqueiras de dois cultivares de cana-de-açúcar em solos distintos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1503-1514, 2007.

CRESPI, M.S.; MARTINS, Q.V.; ALMEIDA, S.V.; BARUDE, S.H; KOBELNIK, M.; RIBEIRO, C.A. Characterization and thermal behavior of residues from industrial sugarcane processing. **Journal of thermal analysis and calorimetry**. CBRATEC7 (Conference Special Issue) Akadémiai Kiadó, fev. 2011. Disponível em: < <http://www.springerlink.com/content/6p5p64n59x610850.doi> 10.1007/s10973-011-1397-9. Acesso em 12 maio 2012.

CUSTÓDIO, C. C.; BOMFIM, D. C.; SATURNINO, S. M.; MACHADO NETO, N. B. Estresse por alumínio e por acidez em cultivares de soja. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 1, p. 145-153, 2002.

- CRUTZEN, P.J.; ANDRADE, M.O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biological cycles. **Science**, v.250, p.1669-1678, 1990
- DELHAIZE, E.; RYAN, P.R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, v.107, p.315-321, 1995.
- DE MARIA, I.C.; CASTRO, O.M. Fósforo, potássio e matéria orgânica em um Latossolo Roxo, sob sistemas de manejo com milho e soja. **R. Bras. Ci. Solo**, 17:471-477, 1993.
- DEMATTÊ, J.L.I. Cultura da cana-de-açúcar: recuperação e manutenção da fertilidade dos solos. **Encarte Informações Agronômicas Potafos**, n.111, p.1-24, 2005.
- DIAS, F.L.F. **Relação entre produtividade, clima, solos e variedades de cana-de-açúcar, na região noroeste do Estado de São Paulo**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1997. 61p. (Dissertação de Mestrado).
- DOU, S.; ZHANG, J. J.; LI, K. Effect of organic matter applications on ¹³C-NMR spectra of humic acids of soil. **European Journal of Soil Science**, v.59, p.532-539, 2008.
- DRISCOLL, C. T.; SCHECHER, W. D. Aluminium in the environmental. In: SIEGEL, M.; SIEGEL, A. (Org.). **Metal ions in biological systems: Aluminium and its role in biology**. Basel: Marcel Dekker, v. 24, p. 59-122, 1988.
- ECHART, C. L.; CAVALLI-MOLINA, S. Aluminum phytotoxicity: effects, tolerance mechanisms and its genetic control. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 531-541, 2001.
- EFFGEN, T. A. M. **Atributos do solo e produtividade de lavouras de cafeeiro conilon submetidas a diferentes manejos na região Sul do Estado do Espírito Santo**. Alegre – ES. 104 fls. Dissertação (Mestrado) Produção Vegetal. Universidade Federal do Espírito Santo – CCA - UFES, Alegre – ES., 2006.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises de solo**. Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2011. 230 p. - (Documentos / Embrapa Solos, ISSN 1517-2627 ; 132).
- EPSTEIN, E. **Nutrição mineral das plantas: princípios e perspectivas**. São Paulo: EDUSP, 1974. 335 p.
- EVANGELOU, M. W.H; EBEL, M.; SCHAEFFER, A. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents. **Chemosphere**. 68.p.989-1003.2007.
- FIEDLER, S.; KALBITZ, K. Concentrations and properties of dissolved organic matter in forest soils as affected by the redox regime. **Soil Science**, v.168, n.11, Nov, p.793-801, 2003.
- FINATTO, T.; SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; VALÉRIO, I.P.; REIS, C.E.S.; RIBEIRO, G.; SILVEIRA, G.; FONSECA, D.A.R. Reação de tolerância de genótipos de aveia branca a concentrações de alumínio em solução nutritiva. **Magistra**, v.19, p.07-15, 2007.
- FOY, C.D. Physiological effects of hydrogen aluminum, and manganese toxicities in acid soil. In: **Soil Acidity and Liming**. Adams, F. (ed.). American Society of Agronomy, Inc., Madison, WI. pp. 57-97. 1984.
- FOY, C. D. Plant adaptation to acid, aluminum-toxic soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 19:959-987. 1988.

FOY, C.D.; ARMIGER, W.H.; BRIGGLE, L.W.; REID, D.A. Differential aluminum tolerance of wheat and barley varieties in acid soils. **Agro. J.** 57:413-417. 1965.

FOY, C.D. Effects of aluminum on plant growth. In: Carson, E.W. **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, p.601-642. 1974.

FRANCHINI, J.C.; GONZALEZ-VILLA, F.J.; CABRERA, F.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A. Rapid transformations of plant water-soluble organic compounds in relation to cation mobilization in a acid Oxisol. **Plant Soil**, v.231, p.55-63, 2001.

FRANCHINI, J.C.; HOFFMANN-CAMPO, C.B.; TORRES, E.; MIYAZAWA, M. & PAVAN, M.A. Organic composition of green manures during growth and its effect on cation mobilization in an acid Oxisol. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 34:2045-2058, 2003.

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

FRANCHINI, J.C.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; MALAVOLTA, E. Dinâmica de íons em solo ácido lixiviado com extratos de resíduos de adubos verdes e soluções puras de ácidos orgânicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.2267-2276, 1999b.

FRANCHINI, J. C. ; PAVAN, M. A. ; MIYAZAWA, M. . Redistribution of phosphorus in soil through cover crop roots. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 47, n.3, p. 381-386, 2004.

FREITAS, F.A.; KOPP, M.M.; SOUZA, R.O.; ZIMMER, P.D.; CARVALHO, F.I.F. E OLIVEIRA, A.C. (2006) - Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. **Revista Ciência Rural**, 36, 1/6: 72-79. 2006.

FURLANI NETO, V.L. Colheita mecanizada da cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Alcool e Subprodutos**, v.94, n.3, p.8-9, 1994.

GARBATE, M.V.; VITORINO, A.C.T.; TOMASINI, B.A.; BERGAMIN, A.C.; PANACHUKI, E. Erosão entre sulcos em área cultivada com cana crua e queimada sob colheita manual e mecanizada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.2145-2155, 2011. DOI: 10.1590/S0100-06832011000600029.

GUIMARÃES, C.M.; NEVES, P. DE C. F.; STONE, L. F.; ZIMMERMANN, F. J. P. Resistência do arroz de terras altas ao alumínio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.10, p.855-860, 2006.

GUPPY, C.N.; MENZIES, N.W.; MOODY, P.W.; BLAMEY, F.P.C. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. **Australian Journal of Soil Research**, 43:189-202, 2005.

GUTIERREZ, L.E; FERRARI, S.E. Ácidos orgânicos de folhas de três variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) em quatro estádios de maturidade. **Anais ESALQ**, Piracicaba, 45 (parte 2): 441-452, 1988.

HOFFMAN, H.P.; SANTOS, E.G.D.; BASSINELLO, A.I.; VIEIRA, M.A.S. **Variedades RB de cana-de-açúcar**. 1. Ed. Araras: CCA/UFSCar, 2008.30p.

- HOYT, P.B.; TURNER, R.C. Effect of organic materials added to very acid soils on pH, aluminum, exchangeable NH₄, and crop yields. **Soil Science**, v.119, p.227-237, 1975.
- HUE, N.V. Correcting soil acidity of a highly weathered Ultisol with chicken manure and sewage sludge. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.23, p.241-264, 1992.
- HUE, N.V.; AMIEN, I. Aluminum detoxification with green manures. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.20, p.1499-1511, 1989.
- HUE, N.V.; CRADDOCK, G.R.; ADAMS, F. Effect of organic acids on aluminum toxicity in subsoils. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p.28-34, 1986.
- INFORZATO, R.; ALVAREZ, R. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar va. 290, em solo tipo terra-roxa legítima. **Bragantia**, v.16, p.1-13, 1957.
- ILLÉS, P.; SCHLICHT, M.; PAVLOVKIN, J.; LICHTSCHEIDL, I.; BALUSKA, F.; OVECKA, M. Aluminium toxicity in plants: internalization of aluminium into cells of the transition zone in Arabidopsis root apices related to changes in plasma membrane potential, endosomal behaviour, and nitric oxide production. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 57, n. 15, p. 4201-4213, 2006.
- JENKINSON, D.S.; AYANABA, A. Decomposition of carbon-14 labelled plant material under tropical conditions. **Soil Science Society of America Journal**, v.41, p.912-915, 1977.
- JENSEN, J.H. Some studies of root habits of sugar cane in Cuba. Yonkers, N.Y.; **Tropical Plant Research Foundation**, 1951. 37p
- JONES, D.L. Organic acids in the rhizosphere - A critical review. **Plant Soil**, 205:25-44, 1998.
- KALBITZ, K. Properties of organic matter in soil solution in a German fen area as dependent on land use and depth. **Geoderma**, v.104, n.3/4, p.203-214, 2001.
- KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T. Mapping of sand deposition from 1993 midwest floods with electromagnetic induction measurements. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, p. 336-340, 1996.
- KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, v.46, p.237-260, 1995.
- KOCHIAN, L.V.; PENCE, N.S.; LETHAM, L.D.; PIÑEROS, M.A.; MAGALHÃES, J.V.; HOEKENGA, O.A.; GARVIN, D.F. Mechanisms of metal resistance in plants: aluminum and heavy metals. **Plant Soil**, The Hague, v.247, p.109-119, 2002.
- KOFFLER, N.F. A profundidade do sistema radicular e o suprimento de água às plantas no Cerrado. **Informações Agrônomicas Potafos**, n.33, p.1-5, 1986.
- KORNDÖRFER, G.H.; PRIMAVESI, O.; DEUBER, R. Crescimento e distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar em solo LVA. Piracicaba: **Coopersucar**. 1989, n.47, p.32-36. (Boletim Técnico 47).
- LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. **Science**, Madison, v. 304, p. 1623-1627, 2004.
- LANDELL, M.G.A.; PRADO, H.; VASCONCELOS, A.C.M.; PERECIN, D.; ROSSETTO, R.; BIDÓIA, M.A.P.; XAVIER, M.A. Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. **Scientia Agricola**, v.60, p.741-745, 2003.

LEPSCH, I.F. Influência dos fatores edáficos na produção. In: CASTRO, P.R.C.; FERREIRA, S.O.; YAMADA, T. (Coord.) **Ecofisiologia da produção**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p.83-98.

LIU, J.; HUE, N.V. Ameliorating subsoil acidity by surface application of calcium fulvates derived from common organic materials. **Biology and Fertility of Soils**, Berlim, v.21, p.264-270, 1996.

LUCA, E.F.; FELLER, C.; CERRI, C.C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D.C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 789-800, 2008.

MACHADO, E. C.; PEREIRA, A. R.; FAHL, J. I.; ARRUDA, J. V.; CIONE, J. Índices biométricos de duas cultivares de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.17, n.9, p.1323-1329, 1982.

MACHADO, P.L.O.A. **Considerações gerais sobre a toxicidade do alumínio nas plantas**. EMBRAPA-CNPS. Documentos, n.2, Rio de Janeiro, 1997.

MACHADO, R.S.; RIBEIRO, R.V.; MARCHIORI, P.E.R.; MACHADO, D.F.S.P.; MACHADO, E.C.; LANDELL, M.G.A. Respostas biométricas e fisiológicas ao déficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.1575-1582, 2009.

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

MALHIA, S.S.; NYBORG, M.; SOLBERG, E.D.; DYCK, M.F.; PUURVEEN, D. Improving crop yield and N uptake with long-term straw retention in two contrasting soil types. **Field Crops Research**, v.124, p.378-391, 2011.

MANTELATTO, P. E. **Estudo do processo de cristalização de soluções impuras de sacarose de cana-de-açúcar por resfriamento**. 272 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2005.

MARQUES, M.O.; MARQUES, T.A.; TASSO JÚNIOR, L.C. **Tecnologia do açúcar. Produção e industrialização da cana-de-açúcar**. Jaboticabal-SP: Funep, 2001.

MARTINS, D.; VELINI, E. D.; MARTINS, C. C.; SOUZA, L. S. Emergência em campo de dicotiledôneas infestantes em solo coberto com palha de cana-de-açúcar. **Planta Daninha**, v. 17, n. 1, p. 151-161, 1999.

MCCLAIN, M.E.; RICHEY, J.E.; BRANDES, J.A.; PIMENTEL, T.P. Dissolved organic matter and terrestrial-lotic linkages in the central Amazon basin of Brazil. **Global Biogeochemical Cycles**, v.11, n.3, p.295-311, 1997.

MEDA, A. R.; CASSIOLATO, M. E.; PAVAN, M. A.; MIYAZAWA, M. Alleviating soil acidity through plant organic compounds. **Brazilian Archives of Biology and Technology** [online]. vol.44, n.2, pp. 185-189. ISSN 1516-8913. 2001.

MIYAZAWA, M.; CHIERICE, G.O.; PAVAN, M.A. Determinação indireta de alumínio no solo com eletrodo seletivo de fluoreto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p.133-138, 1992b.

MIYAZAWA, M; PAVAN, M.A. & BLOCH, M.F.M. **Análise química de tecido vegetal**. IAPAR, 1992a. (IAPAR, Circular, 74). 17 p.

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

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; FRANCHINI, J.C. Evaluation of plant residues on the mobility of surface applied lime. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.45, n.3, p.251-256, 2002.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M.A.; FRANCHINI, J.C. Neutralização da acidez do perfil do solo por resíduos vegetais. Piracicaba: **Potafos**, 2000.

MORAES, M. F. et al. Mobilidade de íons em solo ácido com aplicação de calcário, ácido orgânico e material vegetal em superfície. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 04, p. 673-684, 2007.

NEVES, C.S.V.J.; FELLER, C.; KOUAKOUA, E. Efeito do manejo do solo e da matéria orgânica solúvel em água quente na estabilidade de agregados de um latossolo argiloso. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.5, p.1.410-1.415, 2006.

NOBLE, A.D.; RANDALL, P.J. & JAMES, T.R. Evaluation of two coal derived organic products in ameliorating surface and subsurface soil acidity. **Eur. J. Soil Sci.**, 46:65-75, 1995.

OLIVEIRA, E.C.A. de; OLIVEIRA, R.I. de; ANDRADE, B.M.T. de; FREIRE, F.J.; LIRA JÚNIOR, M.A.; MACHADO, P.R. Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p. 951-960, 2010.

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

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; CANTARUTTI, R.B.; BARROS, N.F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: ALVAREZ-VENEGAS, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (eds.). **Tópicos de ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2, p.393-486, 2002.

OLIVEIRA, M. de S. **Tolerância de variedades de cana-de-açúcar (Sacharrum spp.) à toxidez por alumínio em solução**. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) – Centro de Ciências Agrárias. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2012.

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; PENATTI, C.P.; PICCOLO, M.C. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 2.359-2.362, 1999.

OLIVEIRA, R. A.; DAROS, E.; ZAMBON, J. L. C.; WEBER, H.; IDO, O.T.; ZUFELLATO-RIBAS, K. C.; KOEHLER, H. S.; SILVA, D. K. T. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.37, n.2, p.71-76, 2007.

OLIVEIRA, T.K.; CARVALHO, G.J.; MORAES, R.N.S. Plantas de cobertura e seus efeitos sobre o feijoeiro em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.37, p.1079-1087, 2002.

ORLANDO FILHO, J.; ROSSETTO, R.; MURAOKA, T.; ZOTELLI, H.B. Efeitos do sistema de despalha (cana crua x cana queimada) sobre algumas propriedades do solo. **STAB**, Piracicaba, v.16, n.6, p.30-33, 1998.

PAGE, R.E.; GLANVILLE, T.J.; TRUONG, P.N. **The significance of trash retention trials in the Isis an Maryborough mill areas**. In: CONFERENCE OF THE AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR TECHNOLOGISTS, 8., Townville. Proceedings. Brisbane: Watson Ferguson, 1986. p.95-101.

PAUL, B.K.; VANLAUWE, B.; AYUKE, F.; GASSNER, A.; HOOGMOED, M.; HURISSO, T.T.; KOALA, S.; LELEI, D.; NDABAMENYE, T.; SIX, J.; PULLEMAN, M. M. Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.164, p.14-22, 2013.

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

PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T.; PRATT, P.F. Redistribution of exchangeable calcium, magnesium and aluminium following lime or gypsum application to a Brazilian oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v.48, p.33-38, 1984.

PAVINATO, P.S.; ROSOLEM, C.A. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.911-920, 2008.

PEIXOTO, P.H.P. et al. Alterações morfológicas e acúmulo de compostos fenólicos em plantas de sorgo sob estresse de alumínio. **Bragantia**, Campinas, v.66, p.17-25, 2007.

Peralta A.L. and M.M. Wander. Soil organic matter dynamics under soybean exposed to elevated [CO₂]. *Plant and Soil*. 303:69-81. 2008.

PIERRE, W. H.; BANWART, W. L. Excess-base and excess-base/ nitrogen ratios of various crop species and plant parts. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, p. 91-96, 1973.

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

RAIJ, B. van. **Soil fertility and plant nutrition**. Plant soil interactions at low pH. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1991. p.159-167.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C. DE; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agrônomo, 2001. 284p.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas, Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 285p.,1996. (Boletim Técnico, 100).

REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO. **Catálogo nacional de variedades "RB" de cana-de-açúcar** / Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro. – Curitiba, 2010.136 p. il.

RIPOLI, T.C.; MIALHE, L.G.; BRITO, J.O. Queima de canavial, o desperdício não mais admissível. **Álcool & Açúcar**, v.10, n.54, p.18-23, 1990.

RODRIGUES, J. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. 1995. Disponível em:< http://www.canabrazil.com.br/cachaca-alcool-rapadura-biblioteca/cat_view/9-cultura-de-cana-de-acucar>. Acesso em 01/08/2013.

ROSSETTO, R.; SPIRONELLO, A.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. Calagem para a cana-de-açúcar e sua interação com a adubação potássica. **Bragantia**, v.63, p.105-119, 2004.

ROSSETO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C.; CANTARELLA, H. LANDELL, M. G. A. Manejo conservacionista e reciclagem de nutrientes em cana-de-açúcar tendo em vista a colheita mecanizada. **Informações Agrônomicas**, n. 124 p. 8-13 dez. 2008.

ROSSIELO, R. O. P.; NETTO, J. J. Toxidez de Alumínio em Plantas. *In*: FERNANDES, M. S. Nutrição Mineral de Plantas. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, cap. 04, p. 387-390. 2006.

SALET, R.L. **Toxidez de alumínio no sistema plantio direto**. 1998.117f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 1998.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, J.H.; CAVALCANTI, F.J.A. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar: III. Conteúdo de nutrientes e distribuição do sistema radicular no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.22, p.425-431, 1987.

SANDERSON, M. A.; STAIR, D.W.; HUSSEY, M. A. Physiological and morphological responses of perennial forages to stress. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 59, p. 172-208, 1997.

ŠČANČAR, J.; MILAČIČ, R. Aluminium speciation in environmental samples: a review. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, Heidelberg, v. 386, n. 4, p. 999-1012, 2006.

SCHWESIG, D.; KALBITZ, K.; MATZNER, E. Mineralization of dissolved organic carbon in mineral soil solution of two forest soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde**, v.166, n.5, p.585-593, 2003

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Metas para o fim da queima da cana-de-açúcar são alcançadas em SP**. Disponível em <<http://www.ambiente.sp.gov.br/verNoticia.php?id=1157>>. Acesso em maio 2013.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. **Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar**. *In*: SEGATO, S. V.; Pinto, A. S.; Jendiroba, E. Nóbrega, J. C. M. (org.) Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba: CP 2, 2006. p. 19-36.

SILVA, T. R. B.; LEMOS, L. B. Efeito da calagem superficial em plantio direto na concentração de cátions hidrossolúveis na parte aérea de culturas anuais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 03, p. 1199-1207, 2008.

SIQUEIRA, J.O.; FRANCO, A.A. **Biotechnology do solo**: fundamentos e perspectivas. Brasília: MEC/ABEAS/ESAL/FAEPE, 1988. 236p.

SIQUEIRA NETO, M.; VENZKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C.; CERRI, C.E.P.; CERRI, C.C. Rotação de culturas no sistema plantio direto em Tibagi (PR). I - sequestro de carbono no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1013-1022, 2009.

SMITH, D.M.; INMAN-BAMBER, N.G.; THORBURN, P.J. Growth and function of the sugarcane root system. **Field Crops Research**, v.92, p.169–183, 2005.

SMITH, J.P., LAWN, R.J., NABLE, R.O. Investigations into the root:shoot relationship of sugarcane, and some implications for crop productivity in the presence of sub-optimal soil conditions. **Proceedings of Australian Society of Sugar Cane Technologists**, v.21, p.108–113, 1999.

SOBRAL, A.F. DE; GUIMARÃES, V.O. DA S. Relação entre a toxidez do alumínio e a produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.27, n.2, p.287-292, 1992.

- SOUZA, Z. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S. P.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.40, n.3, p.271-278, 2005.
- SPOSITO, G.; MARTIN-NETO, L.; YANG, A. Atrazine complexation by soil humic acids. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.25, p.1203-1209, 1996.
- SPOSITO, G., HOTZCLAW, K.M., LEVESQUE-MADORE, C.S.; JOHNSTON, C.T. Trace-metal chemistry in arid-zone field soils amended with sewage-sludge. 2. Comparative study of the fulvic acid fraction. **Soil Science Society of America**. Journal. 46, 265-270. 1982.
- STEVENSON, F.J. Organic acids in soil. In: McLAREN, A.D. & PETERSON, G.H., eds. **Soil biochemistry**. New York, Dekker, 1967. p.119-146.
- TAYLOR, G.J. The physiology of aluminum tolerance in higher plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. New York, v.19, p.1179-1194, 1988.
- THORBURN, P.J.; DART, I.K.; BIGGS, I.J.; BAILLIE, C.P.; SMITH, M.A.; KEATING, B.A. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. **Irrigation Science**, Berlin, v. 22, p. 201-209, 2003.
- THURMAN, E.M. Organic geochemistry of natural waters. **Dordrecht: Martinus Nijhoff**, 1985. v.2, 497 p.
- TISSI, J.A., CAIRES, E.F.; PAULETTI, V. Efeitos da Calagem em Semeadura Direta de Milho. **Bragantia**, 63, 405-413. 2004.
- TORRES, E. & SARAIVA, O.F. Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja. Londrina, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999. 58p. (**Circular Técnica, 23**).
- TRIVELIN, P. C. O.; RODRIGUES, J.C.S.; VICTORIA, R.L. Utilização por soqueira de cana-de-açúcar de safra do nitrogênio da aquamônia-15N e uréia-15N aplicado ao solo em complemento a vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 1, p. 89-99, 1996.
- UNICA. **Colheita mecânica da cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/clipping/show.asp?cppCode=7F1BA59F-284B-4D83-AC82-198D2A51227B>>. Acesso em abr 2013.
- URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; OLIVEIRA, O. C.de; LIMA, E.; GUIMARÃES, D. H. V. A Importância de não Queimar a Palha na Cultura de Cana-de-açúcar. **Comunicado Técnico**. EMBRAPA/CNPBS, n. 5, p. 1-6, mar. 1991.
- VANCE, G.F.; STEVENSON, F.J.; SIKORA, F.J. Environmental chemistry of aluminum-organic complexes. In: SPOSITO, G. (Ed.). **The environmental chemistry of aluminum**. Boca Raton: Lewis, 1995. p.169-220.
- VASCONCELOS, A.C.M.; CASAGRANDE, A.A.; PERECIN, D.; JORGE, L.A.C.; LANDELL, M.G.A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.849-858, 2003.
- VASCONCELOS, A.C.M.; GARCIA, J.C. Desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar. **Encarte Informações Agrônomicas Potafos**, n.110, p.1-5, 2005.
- VASCONCELOS, A.C.M. **Desenvolvimento do sistema radicular da parte aérea de socas de cana-de-açúcar sob dois sistemas de colheita: crua mecanizada e queimada manual**. 2002. 140p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

YOUNG, S. D.; BACHE, B. W.; WELCH, D.; ANDERSON, H. A. Analysis of the potentiometric titration of natural and synthetic polycarboxylates. **Soil Science**, v. 32, p. 579-592, 1981.

WANG, J.; RAMAN, H.;ZHAN G, G.; MENDHAM, N. & ZHOU, M. Aluminum tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.): physiological mechanisms, genetics and screening methods. **Journal of Zhejiang University SCIENCE**, 7:769-787, 2006.

WATT, H.H. Van Der; BARNARD, R.O.; CRONJE, I.J.; DEKKER, J.; CROFT, G.J.B.; WALT, M.M.van der. Amelioration of subsoil acidity by application of a coal-derived calcium fulvate to the soil surface. **Nature**, Londres, v.350, p.146-148, 1991.

WOLT, J.D. **Soil solution chemistry**: applications to environmental science and agriculture. New York:John Wiley & Sons, 1994. 345p.

WRIGHT, R.J. Soil aluminum toxicity and plant growth.**Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.20, p.1479-1497, 1989.

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