

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE**

LARISSA MARQUES VIGLIO

**CRESCIMENTO INICIAL DE CANA-DE-AÇÚCAR EM
LATOSSOLO COM GRADIENTE DE SATURAÇÃO POR
ALUMÍNIO E SUBMETIDO À APLICAÇÃO DE VINHAÇA**

Araras

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA E AMBIENTE

LARISSA MARQUES VIGLIO

**CRESCIMENTO INICIAL DE CANA-DE-AÇÚCAR EM
LATOSSOLO COM GRADIENTE DE SATURAÇÃO POR
ALUMÍNIO E SUBMETIDO À APLICAÇÃO DE VINHAÇA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Agricultura e Ambiente como
requisito para a obtenção do título de **Mestre**
em Agricultura e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Roberto Soares

Araras
2014

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

V677ci

Viglio, Larissa Marques.

Crescimento inicial de cana-de-açúcar em latossolo com gradiente de saturação por alumínio e submetido à aplicação de vinhaça / Larissa Marques Viglio. -- São Carlos : UFSCar, 2014.

110 f.

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

1. Cana-de-açúcar. 2. Variedades RB. 3. Solos ácidos. 4. Sistema radicular. 5. Ambiente de produção. I. Título.

CDD: 633.61 (20ª)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

DE

LARISSA MARQUES VIGLIO

APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA
E AMBIENTE, DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM 30 DE
ABRIL DE 2014.

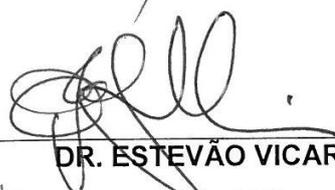
BANCA EXAMINADORA:



PROF. DR. MARCIO ROBERTO SOARES

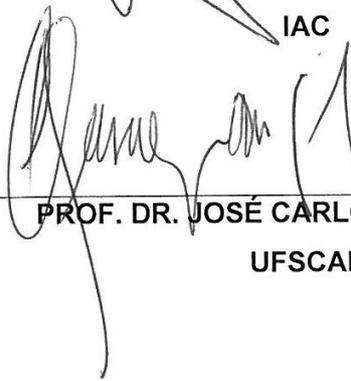
ORIENTADOR

UFSCar



DR. ESTEVÃO VICARI MELLIS

IAC



PROF. DR. JOSÉ CARLOS CASAGRANDE

UFSCAR

A minha amada mãe Rosângela...

OFEREÇO

*Ao meu pai José Luiz (in memoriam) e ao meu irmão Leandro
(in memoriam) que mesmo longe, me acompanham em cada passo.
Ao meu anjinho João Vitor, pelos momentos vividos e por me fazer
compreender a importância da vida.*

DEDICO...

AGRADECIMENTOS

A DEUS, pela saúde, disposição e força, fundamentais para que mais essa etapa fosse cumprida.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Marcio Roberto Soares, pela orientação, dedicação, e confiança depositada, além do constante incentivo no meu crescimento profissional. Agradeço também pela amizade fortalecida ao longo desse período.

A Universidade Federal de São Carlos e ao Centro de Ciências Agrárias pela minha formação desde a graduação. Ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura e Ambiente pela oportunidade. As secretárias Sirlene e Cristina, por todo auxílio no decorrer do curso, ao nosso coordenador, Dr. Claudinei Fonseca. A todos os professores do PPGAA, também sou grata, em especial, a minha orientadora na graduação, Prof. Dr. Leonor Assad.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

Aos professores Dr. José Carlos Casagrande, Dr. Hermann Paulo Hoffmann e Dr. Luiz Carlos Ferreira da Silva, pelas importantes sugestões e auxílio, na ocasião do exame de qualificação. Aos membros da banca de defesa, Prof. Casagrande e Dr. Estevão Mellis, pela participação e valiosas contribuições na discussão.

As professoras Dr.^a Elma Neide Vasconcelos Martins Carrilho e Dr.^a Simone Sartorio pela ajuda e paciência ao solucionar minhas dúvidas. A professora Dr.^a Patrícia Monquero, pela gentileza em ceder o clorofilômetro portátil, utilizado nesse trabalho;

Aos funcionários e técnicos do da Seção Agrícola, pela fundamental ajuda para que esse trabalho pudesse ser colocado em prática;

Ao Laboratório de Química e Fertilidade do Solo, pelas análises químicas realizadas, em nome dos funcionários Campanha, Larissa, Roberto e em especial ao João. Aos técnicos do Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental, Ernesto Favetta, pela ajuda nas coletas de solo e por todo empenho em nos auxiliar nas dificuldades encontradas. A Camila

Pessotto, sempre tão atenciosa e simpática, pela paciência e disposição em ajudar.

Ao Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-açúcar, por fornecerem os toletes de cana-de-açúcar, entre outras atividades, em especial ao técnico Sandro e também ao Prof. Dr. Hermann Paulo Hoffmann, por auxiliar nos custos envolvidos na coleta do solo.

A toda minha família pelo amor, compreensão e dedicação durante esses anos de estudo. Especialmente a minha mãe e ao meu irmão, sem os quais nada disso seria possível. Aos meus padrinhos, Edinei e Rosali pelo incentivo, carinho e por me terem como uma filha. A minha prima Daniela, principalmente por ter sido “minha mão direita”, dedicando seu tempo, paciência e carinho a mim, durante os momentos de dificuldade.

As minhas queridas amigas Barbarinha, Isa, Helê, Jhapa e Van por torcerem por mim e tentarem compreender minhas “ausências”. Em especial a Isa, pelas incansáveis conversas e reflexões, que sempre auxiliaram nas minhas realizações.

Aos amigos da pós-graduação, Ana, Danda, Felipe, Grafite, Jacq, Zica por compartilharmos juntos dificuldades, alegrias e aprendizado. As meninas, Carina e Vivi, pelo convívio e afeto. Ao Lucas, pelas conversas, ensinamentos, além da amizade construída. A querida Fabi, pela amizade e companheirismo.

Aos que participarão de algumas etapas durante a montagem, condução e coleta do meu experimento, principalmente ao Grafite, Felipe, Letícia.

A Jacq, presente em todas as etapas e de fundamental importância para a realização desse trabalho. Agradeço pelo companheirismo e apoio, além da relação de amizade, construída durante essa trajetória.

A todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para a realização desse trabalho, e também a todos aqueles que torceram por mim.

MEUS SINCEROS AGRADECIMENTOS!

RESUMO

Crescimento inicial de cana-de-açúcar em Latossolo com gradiente de saturação por alumínio submetido à aplicação de vinhaça

Uma das estratégias para contornar o problema da elevada acidez dos solos e a consequente toxidez por alumínio (Al), limitantes ao pleno desenvolvimento da cana-de-açúcar, se baseia no uso de variedades adaptadas a essas condições. A aplicação de vinhaça é uma prática rotineira no cultivo da cana-de-açúcar. Seu efeito como fertilizante é bastante conhecido, principalmente por substituir o uso de fertilizantes potássicos. Entretanto, a vinhaça pode atenuar os efeitos tóxicos do Al do solo por meio da formação de complexos com ácidos orgânicos de baixo peso molecular, proporcionando maior aprofundamento radicular da cultura da cana-de-açúcar. O objetivo do trabalho foi estudar a tolerância de três variedades de cana-de-açúcar (RB855453, RB966928 e RB867515) à toxidez por Al e avaliar a influência da vinhaça na expansão do sistema radicular em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico (LVAd) com gradiente de saturação por Al. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em delineamento interiramente casualizado, com esquema fatorial e três repetições. Mudanças de cana-de-açúcar foram transplantadas para colunas de PVC (0,8 m), construídas pela sobreposição de quatro anéis, preenchidos com amostras de solo que ofereceram um gradiente crescente de saturação por Al em profundidade (m% = 0,7; 7,9; 40,8; 62,6). A coleta do experimento foi realizada aos 120 dias após o plantio, determinando o índice de clorofila foliar (ICF), o diâmetro do colmo, a altura das plantas, a matéria seca da parte aérea e a matéria seca estratificada do sistema radicular. A maior quantidade de matéria seca total do sistema radicular, em solo sem o aporte de vinhaça, foi obtida pela variedade RB867515, já com aplicação de vinhaça essa característica foi apresentada pelas variedades RB867515 e RB855453. A variedade RB867515 foi considerada mais tolerante ao Al, embora a ordem de classificação das variedades de cana-de-açúcar, baseada no índice de tolerância tenha variado conforme a aplicação de vinhaça. Os parâmetros biométricos da parte aérea, com exceção do diâmetro do colmo, não foram considerados bons indicadores para diferenciar os genótipos de cana-de-açúcar em relação ao Al fitotóxico no solo, assim como o índice de clorofila foliar não pôde ser adotado como um parâmetro indicativo decorrente desse estresse. Aos 90 dias após a aplicação de vinhaça não houve alterações significativas nos atributos químicos do solo, sobretudo na redução dos teores de Al e no índice de saturação por Al. O efeito da vinhaça no aumento da porcentagem de raízes, na profundidade de 40 a 80 cm, foi verificado somente para a variedade RB966928.

Palavras-chave: variedades RB; solos ácidos; sistema radicular; ambientes de produção.

ABSTRACT

Initial growing of sugarcane in Oxisol with gradient of Al saturation and submitted to vinasse application

An important strategy to round the problem of high acidity in soil and the toxicity aluminum (Al) consequent, limiting the full sugarcane development, it is based on the use of suitable varieties to these conditions. The application of vinasse is one practical routine in sugarcane cropping. The vinasse effect as fertilizer is well known, principally by reducing the use of potassium fertilizers. However, vinasse may attenuate the toxic effects of Al in soil by formation of complexes with organic acids of low molecular weight, improving further deepening of the root system sugarcane. The aim of this work was to study tolerance of three sugarcane varieties (RB855453, RB966928 e RB867515) to Al toxicity and to assess the influence of vinasse in the expansion of the root system in dystrophic Red Yellow Oxisol with gradient of Al saturation. The experiment was carried out in the greenhouse, on an entirely randomized design, in factorial arrangement, with three replicates. Sugarcane seedling were transplanted to PVC columns (0,8 m), each column consisted of four PVC rings. The PVC rings were filled with soil samples that offered an ascending gradient of Al saturation in depth (m%= 0,7; 7,9; 40,8; 62,6). The collection of the experiment was conducted 120 days after planting and it was determined the leaf chlorophyll index (ICF), stem diameter, plant height, dry weight of shoot and stratified root system dry matter. The largest amount of total root system dry matter in soil without the supply of vinasse was obtained from the RB867515 but with vinasse application this characteristic was presented by RB867515 and RB855453. The RB867515 was considered the most tolerant to Al, however the sugarcane varieties classification order based on tolerance index has varied according to vinasse application. The shoot biometric parameters, excepted by the stem diameter, were not considered indicators to differentiate the sugarcane genotypes from the phytotoxic Al in soil, as well as the ICF could not be adopted as an indicative parameter due by this stress. There were no significant alterations in soil chemical properties, especially in reducing the levels of Al and Al saturation index 90 days after vinasse application. The vinasse effect in increasing the percentage of roots at depth of 40 to 80 cm, has been verified only by RB966928.

Keywords: RB varieties, acids soils, root system, production environments

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. Fonte: PRADO (2005).....	24
Figura 2. Distribuição do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar. Fonte: LANDELL et al. (2005a).....	27
Figura 3. Distribuição dos solos ácidos (cor destacada) no mundo. Fonte: von UEXKÜLL e MUTERT (1995).....	29
Figura 4. Distribuição relativa das espécies de Al em solução do solo (Adaptado de BERTSCH; PARKER, 1995).....	32
Figura 5. Ácidos orgânicos de baixo peso molecular encontrados na solução do solo.....	40
Figura 6. Modelo de complexação de alumínio com um ácido orgânico de baixo peso molecular (Fonte: ANGHINONI; SALET, 2014).....	41
Figura 7. Esquema de montagem da coluna para ensaios de desenvolvimento radicular de variedades de cana-de-açúcar em solo com gradiente saturação por Al e submetido á aplicação de vinhaça.	49
Figura 8. Esquema de montagem das colunas controle para ensaios de desenvolvimento radicular de variedades de cana-de-açúcar em solo com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	50
Figura 9. Preenchimento da coluna de solo em ensaio do desenvolvimento radicular de variedades de cana-de-açúcar em solo com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	51
Figura 10. Mudanças de cana-de-açúcar no momento do plantio (régua de 15 cm).	55

Figura 11. Disposição das colunas após o plantio das mudas de cana-de-açúcar; cores diferentes representam os tratamentos.....	55
Figura 12. Variedades de cana-de-açúcar 120 dias após o plantio.....	58
Figura 13. a) Separação dos anéis de PVC, após a coluna de solo ser desmontada. b) Lavagem do sistema radicular para retirada do excesso de solo das raízes.	59
Figura 14. Matéria úmida do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar, após a retirada do solo.	59
Figura 15. a) Determinação da altura das variedades de cana-de-açúcar. b) Determinação do teor de clorofila foliar.	61
Figura 16. Diâmetro do colmo (mm) de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, corrigido, sem gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça	68
Figura 17. Diâmetro do colmo (mm) de variedades cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça..	70
Figura 18. Altura média (m) de variedades cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com gradiente de saturação por Al e submetido á aplicação de vinhaça.....	74
Figura 19. Distribuição do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com gradiente de saturação por Al.	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Componentes da acidez do solo.....	31
Tabela 2. Métodos de avaliação da tolerância das espécies vegetais ao Al fitotóxico.....	38
Tabela 3. Composição orgânica da vinhaça concentrada.	43
Tabela 4. Descrição dos tratamentos empregados em ensaio de avaliação do crescimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em solo com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	45
Tabela 5. Análise de variância (ANOVA) empregada em ensaios de avaliação do crescimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em solo com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	45
Tabela 6. Atributos químicos do LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico utilizado no experimento.	47
Tabela 7. Atributos físicos do LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico utilizado no experimento.	47
Tabela 8. Atributos químicos de amostras do LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico utilizado no preenchimento dos anéis após a incubação.	49
Tabela 9. Resultados da análise química e física do substrato Multiplant® utilizado na germinação dos minitoletes de cana-de-açúcar.	53
Tabela 10. Caracterização físico-química da vinhaça <i>in natura</i> coletada para o experimento, de acordo com a norma CETESB P4.231/2006.	64

Tabela 11. Análise de variância (ANOVA) do índice de clorofila foliar de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.....	65
Tabela 12. Índice de Clorofila Foliar Total ($a+b$) em folhas de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	66
Tabela 13. Análise de variância (ANOVA) do diâmetro do colmo (mm) de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.....	67
Tabela 14. Diâmetro do colmo (mm) de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	69
Tabela 15. Diâmetro do colmo (mm) variedades de cana-de-açúcar a partir da interação* "Variedades x Vinhaça" cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al.	71
Tabela 16. Análise de variância (ANOVA) do diâmetro do colmo (mm) de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, corrigido, sem gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	71
Tabela 17. Diâmetro do colmo (mm) de variedades de cana-de-açúcar a partir da interação* "Variedades x Vinhaça" cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, corrigido, sem gradiente de saturação por Al.	72
Tabela 18. Análise de variância (ANOVA) da altura média (m) de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetidas à aplicação de vinhaça.	72

Tabela 19. Altura média (m) de variedades cana-de-açúcar a partir da interação* “Variedade x Vinhaça” cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al.	75
Tabela 20. Análise de variância (ANOVA) da matéria seca da parte aérea (MSPA) (g) de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	75
Tabela 21. Matéria seca da parte aérea (MSPA) (g) de variedades de cana-de-açúcar a partir da interação* “Variedades x Vinhaça” cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por alumínio.	76
Tabela 22. Análise de variância (ANOVA) da matéria seca total do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	78
Tabela 23. Matéria seca total do sistema radicular (g) a partir da interação "Variedades x Vinhaça" em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	79
Tabela 24. Resumo da análise de variância (ANOVA) da matéria seca do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	80
Tabela 25. Matéria seca do sistema radicular (g) da interação "Variedades x Vinhaça x Profundidades" em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	82
Tabela 26. Índice de tolerância ao alumínio de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	86

Tabela 27. Resumo da análise de variância (ANOVA) dos atributos químicos do LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	89
Tabela 28. Atributos químicos avaliados em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	90
Tabela 29. Resumo da análise de variância (ANOVA) do teor de Al e saturação por Al do LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	92
Tabela 30. Teor de K ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) a partir da interação "Vinhaça x Profundidade" em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.	94

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivos.....	20
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
2.1 Cana-de-açúcar	21
2.2 Fatores edáficos dos ambientes de produção	22
2.3 Sistema radicular da cana-de-açúcar.....	26
2.4 Solos ácidos e a toxidez por Al em plantas	29
2.5 Estratégias para minimizar a fitotoxidez por Al	34
2.6 Tolerância ao Al e métodos de seleção de genótipos	36
2.7 Complexação do Al por ácidos orgânicos	39
2.7.1 Vinhaça.....	42
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	44
3.1. Delineamento experimental	44
3.2. Solo	46
3.2.1. Caracterização química e física.....	46
3.2.2. Incubação do solo.....	48
3.2.3. Colunas de solo	48
3.2.4. Preenchimento das colunas	50
3.3. Condução do bioensaio	52
3.3.1. Variedades de cana-de-açúcar	52
3.3.2 Germinação dos minitoletes	53
3.3.3 Adubação de plantio.....	54
3.3.4. Plantio das mudas.....	54

3.3.5. Monitoramento da umidade do solo das colunas	54
3.3.6 Adubação de cobertura.....	56
3.4. Vinhaça	56
3.4.1 Aplicação.....	56
3.5 Coleta do experimento	58
3.5.1 Biometria e Índice de Clorofila das variedades de cana-de-açúcar	60
3.5.2 Caracterização química do solo.....	62
3.6 Forma de análise dos resultados	62
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1 Vinhaça	63
4.2 Variedades de cana-de-açúcar	65
4.2.1. Índice de clorofila foliar.....	65
4.2.2. Biometria.....	67
4.2.2.1. Parte Aérea	67
4.2.2.2. Sistema Radicular	78
4.2.2.2.1. Índice de Tolerância.....	86
4.3 Atributos químicos do solo	88
5. CONCLUSÕES.....	95
5. REFERÊNCIAS	96

1. INTRODUÇÃO

O atual panorama global tem exigido que as matrizes energéticas sejam representadas por fontes renováveis e de baixo custo. Nesse cenário, a cultura que mais tem se destacado, tanto pelo seu custo de produção quanto pelos seus rendimentos, é a cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). O Brasil lidera a produção mundial de cana-de-açúcar, matéria prima para o etanol. Porém, apesar de toda tecnologia empregada na sua produção, é preciso aprimorar alguns aspectos, desde a lavoura até a indústria, para que seja alcançado um aumento de produção, sem colocar em risco os recursos naturais e a produção de alimentos.

A demanda crescente por etanol tem impulsionado a expansão da atividade canavieira rumo ao centro do país, onde se concentram as maiores áreas sob vegetação de Cerrado. A topografia plana, favorável à mecanização, e solos profundos, tornam essas regiões aptas à atividade agrícola. Entretanto, a alta acidez e os teores elevados de alumínio (Al) trocável, associados à baixa fertilidade, são os principais fatores que restringem à produção de agrícola em solos de regiões de clima tropical, tipicamente intemperizados (ABREU JR.; MURAOKA; LAVORANTE, 2003; FERREIRA et al., 2006).

A toxidez por Al é considerada um dos mais importantes problemas em solos ácidos com $\text{pH} \leq 5,0$ (FOY et al., 1978; ANIOL, 1990; BENNET; BREEN, 1991), por representar um fator limitante ao desenvolvimento radicular das plantas. Nesses solos, a produtividade da cana-de-açúcar é severamente afetada, devido à baixa exploração do solo pelo sistema radicular (SHIGAKI, 2003).

Um estudo realizado por Koffler (1986a) estimou que no Brasil 70% das áreas cultivadas com cana-de-açúcar estavam sobre solos ácidos, com baixa disponibilidade de bases trocáveis e alta saturação por Al. Atualmente, a atividade canavieira expandiu-se para áreas de solos ácidos.

As técnicas tradicionais para viabilização da agricultura nos solos tropicais com elevada saturação por Al são baseadas no uso da correção química do solo. Adaptar o solo à planta, por meio da neutralização da acidez do solo com a calagem, é a prática mais empregada. Entretanto, a reação do calcário é geralmente limitada à camada de aplicação no solo. A aplicação de gesso na superfície, seguida por lixiviação para subsolos ácidos, também tem sido uma das alternativas para a redução dos efeitos do Al.

Ainda que existam práticas alternativas, como a incorporação profunda do calcário, ou o uso de sais mais solúveis, como o gesso, tais opções sofrem restrições que dificultam sua execução. Por ser uma cultura semiperene, há necessidade de reaplicação de corretivos com o decorrer dos cortes da cana-de-açúcar. Contudo, nesse estágio, a aplicação e incorporação desses insumos é dificultada e operacionalmente inviável devido aos riscos de danos ao sistema radicular. Uma estratégia economicamente viável para contornar o problema inclui a seleção e o desenvolvimento de genótipos tolerantes ao Al (SILVA et al. 2002).

Práticas de manejo que adicionam ou que mantenham equilibrados os teores de matéria orgânica do solo (MOS) são recursos que também podem atenuar os efeitos fitotóxicos do Al. A vinhaça, efluente da indústria sucroalcooleira, é amplamente aplicada nos canaviais, porém devido a sua alta carga orgânica, há expectativa de que a vinhaça possa reduzir o efeito tóxico da espécie Al^{3+} , ao complexá-la com o carbono orgânico dissolvido (COD), principalmente com ácidos orgânicos de baixo peso molecular. Embora o seu uso como fonte de nutrientes, seja uma prática comum, seu efeito em relação ao aprofundamento do sistema radicular ainda não foi explorado.

Dessa forma, a seleção de genótipos tolerantes a condições restritivas de fertilidade do solo, com ênfase aos atributos de subsuperfície limitantes à expansão do sistema radicular contribui, para devida alocação das variedades no campo e para a condução de sistemas sustentáveis de produção, uma vez que pode reduzir o uso de insumos. A aplicação de vinhaça

pode proporcionar um melhor crescimento radicular da cana-de-açúcar, por influenciar na redução dos efeitos tóxicos do Al, assim como diminuir o uso de fertilizantes potássicos.

Nesse contexto, a busca de variedades produtivas, tolerantes à acidez do solo e com capacidade de emitir raízes em subsolos com Al em níveis tóxicos, surge como alternativa importante no manejo dos solos ácidos (DELHAIZE; RYAN, 1995; FOY, 1997; DRUMMOND et al.,2001) e no cultivo da cana-de-açúcar nestes ambientes de produção.

1.1 Objetivos

Partindo da hipótese de que as variedades de cana-de-açúcar diferem em relação à sensibilidade ao Al e que a vinhaça pode diminuir os efeitos fitotóxicos desse elemento no solo, o objetivo geral do trabalho foi avaliar a tolerância de três variedades de cana-de-açúcar (RB855453, RB966928 e RB867515) à toxidez por Al e verificar a influência da vinhaça na expansão do sistema radicular em solo com gradiente de saturação por Al.

Os objetivos específicos foram:

- a) quantificar a matéria seca do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar em um solo com gradiente de saturação por Al;
- b) mensurar os efeitos de diferentes níveis de saturação por Al (m%) na biomassa radicular das variedades de cana-de-açúcar;
- c) verificar se parâmetros biométricos da parte aérea são indicadores para diferenciar genótipos de cana-de-açúcar em relação ao Al fitotóxico;
- d) avaliar se o teor de clorofila foliar pode ser utilizado como um parâmetro indicativo do estresse causado pelo Al fitotóxico;
- e) verificar o efeito da vinhaça no aprofundamento radicular da cana-de-açúcar e nos atributos químicos de um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com alta saturação por Al.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cana-de-açúcar

O centro de origem da cana-de-açúcar tem sido discutido por diversos autores. Acredita-se que ela seja nativa do sudeste da Ásia, embora o local exato seja um tanto incerto. Foi na América que a cana-de-açúcar encontrou condições excelentes para seu desenvolvimento. Inicialmente, as lavouras estenderam-se por Cuba e outras ilhas, sendo levada por navegantes às Américas Central e do Sul (MOZAMBANI et al., 2006).

A cultura foi introduzida no Brasil em 1532, por Martim Afonso de Souza, em umas das expedições portuguesas ao país. Em 1975, o governo criou o Programa Nacional do Álcool- o Proálcool que tinha como objetivo dotar o país de uma alternativa viável para a substituição do petróleo dentro da matriz energética, o que acabou incentivando a indústria automobilística no desenvolvimento e na fabricação de carros movidos exclusivamente a álcool (EMPRESA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 2008). Desde então, a cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) sempre teve importância na economia brasileira, porém, voltou a se destacar a partir do início do ano 2000, devido à necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa, aumento da demanda interna por etanol e por ser considerada uma das melhores opções para a produção de energia renovável (SOUZA et al., 2005).

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar, mundialmente reconhecido como líder na produção de bioetanol e na eficiência do setor sucroalcooleiro. De acordo com o levantamento realizado em agosto de 2013, a previsão total para a próxima safra (2013/2014) será por volta de 650 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, produção 11% superior em relação à safra passada (CONAB, 2013). A região Centro-Sul deverá ter um crescimento significativo de 485 mil hectares na área de expansão, sendo os Estados de São Paulo, Goiás,

Minas Gerais, Paraná e Mato Grosso do Sul responsáveis pelo maior incremento nas áreas de produção (CONAB, 2013).

Considerada uma planta de metabolismo fotossintético C₄, apresenta elevada taxa de eficiência na conversão de energia radiante em energia química (TAIZ; ZEIGER, 2004). No entanto, essa eficiência é altamente dependente das condições edafoclimáticas e nutricionais da planta. Adaptada a uma larga faixa de latitude (35° N a 35° S), requer algumas condições para seu pleno desenvolvimento, tais como temperaturas elevadas (até 35° C) e deficiência hídrica anual de 250 mm na fase de maturação (BRUNINI, 2007).

Solos com boa porosidade, profundos e com valores de pH entre 5,0 e 6,5 são satisfatórios às exigências da cana-de-açúcar (RAIJ et al. 1996). No Brasil, é cultivada em diferentes tipos de solos, incluindo aqueles com características distantes do desejado (KOFFLER; DONZELI, 1987; DEMATTÊ, 2004), os quais precisam ser suplementados com fertilizantes e corretivos para que a cultura alcance boa produção.

Em áreas de expansão e de baixa fertilidade, a contribuição para grandes produtividades está intimamente relacionada ao manejo aprimorado do solo (MELLIS; QUAGGIO; CANTARELLA, 2008) ou ainda a alocação das variedades de cana-de-açúcar aos diferentes tipos de solo, uma vez que cada solo apresenta um potencial de produção próprio para a cultura.

2.2 Fatores edáficos dos ambientes de produção

A produtividade de cana-de-açúcar em cultivos agrícolas depende das condições químicas e físico-hídricas das camadas superficiais e subsuperficiais dos solos, juntamente com as condições climáticas, integradas ao manejo agrícola, formando os chamados ambientes de produção (VITTI; PRADO, 2012).

Portando, ambientes de produção são definidos pela interação entre planta, solo e clima, associados ao manejo agrícola, cujos resultados são utilizados para alocar de maneira eficiente as variedades (COLLICCHIO, 2008). A classificação desses ambientes para a cana-de-açúcar permite o conhecimento das limitações de práticas agrícolas, com a finalidade de maximizar a produção (DEMATTÊ, 2004; PRADO, 2005) pelo correto manejo de solos e de variedades, explorando o potencial genético da planta e sua correta alocação nos ambientes.

Em 1997, a Copersucar definiu os ambientes de produção de cana-de-açúcar baseado unicamente nas condições químicas e pedológicas (DEMATTÊ; DEMATTÊ, 2009). Posteriormente, Prado (2005) redefiniu os ambientes de produção para a região Centro Sul do Brasil (Figura 1) em função das condições físico-hídricas, morfológicas, químicas e mineralógicas dos solos, sob manejo adequado da camada arável em relação ao preparo, calagem, adubação, palhada, controle de plantas infestantes e pragas, sempre associadas com as características da subsuperfície dos solos e interagindo com o clima local.

Os critérios para enquadramento nos ambientes A, B, C, D e E envolvem a água disponível (AD), a saturação por bases [eutrófico ($V\% > 50$) e distrófico ($V\% < 50$)], a capacidade de troca de cátions (CTC), a saturação por Al (állico $m\% > 50$) e as perspectivas de produtividade ($t\ ha^{-1}$). O sistema de classificação proposto por Prado (2005) vem sendo amplamente utilizado por abordar não somente as características da camada arável, mas também as da camada subsuperficial. Existe correlação significativa entre a produtividade das culturas e os atributos químicos do subsolo (RIBEIRO; HALSTEAD; JONG, 1984; PRADO et al. 1998; LANDELL, 2003), sendo a condição química desses horizontes determinante para a produtividade da cana-de-açúcar, sobretudo com o decorrer dos cortes (LANDELL et al., 2003; PRADO et al., 2010).

AMBIENTES DE PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR NA REGIÃO CENTRO-SUL DO BRASIL			
2ª Aproximação			
Ambientes	Produtividades TCH _s	Atributos dos solos	Símbolos dos solos EMBRAPA (1999), PRADO (2004)
A1	> 100	{ ADA, e, ef, m, CTC média/alta	PVAe ⁽²⁾ , PVe ⁽²⁾ , LVe ⁽²⁾ , LVAe, CXe, NVef, NVe, MT*, MX* GMe, GXe, GMm, GXm
A2	96 - 100	{ ADM, e, ef, CTC média/alta	PVAe ⁽²⁾ , PVe ⁽²⁾ , PAe ⁽²⁾ , LVe ⁽²⁾ , LVAe, CXe, NVef, NVe
B1	92 - 96	{ ADA, m, mf, CTC média/alta ADM, mf, m, ma, CTC média/alta ADB, ef, e, CTC média/alta	PVAm ⁽²⁾ , PVm ⁽²⁾ , PAm ⁽²⁾ , LVmf, LVm, LVAm, LAm, CXm, NVmf, NVm, PVAm* LVef, LVe, LVAe, LAe, NVef, NVe, PVAe ⁽³⁾ , PVe ⁽³⁾ , PAe ⁽³⁾ , CXe
B2	88 - 92	{ ADM, m, mf, CTC média/baixa ADA, ma, CTC média/alta	PVAm ⁽²⁾ , PVm ⁽²⁾ , PAm ⁽²⁾ , LVmf, LVm, LVAm, LAm, CXm GMma, GXma
C1	84 - 88	{ ADM, d, CTC média/alta ADM, ma, CTC média/alta ADB, d, df, CTC média/alta	PVAd ⁽²⁾ , PVd ⁽²⁾ , PAd ⁽²⁾ LVAm*, LAm* LVd, LVdf, LVAd, LAd
C2	80 - 84	{ ADB, e, CTC média/baixa ADMB, ef, CTC média/alta	LVe, LVAe, LAe LVef
D1	76 - 80	{ ADB, w, wf, CTC média/alta ADM, a, CTC média/alta	LVwf, LVw, LVAw, LAw PVAa ^{(2)*} , PVA ^{(2)*} , PAA ^{(2)*}
D2	72 - 76	{ ADB, ma, CTC média/alta ADB, e, CTC alta, A chernozêmico	LVma, LVAm, LAm RLe
E1	68 - 72	{ ADB, a, CTC média/baixa ADMB, ma, CTC média/baixa	PVAa ⁽³⁾ , PVA ⁽³⁾ , PAA ⁽³⁾ PVAm ⁽⁴⁾ , PVma ⁽⁴⁾ , PAm ⁽⁴⁾
E2	< 68	{ ADMB, wf, w, a, CTC média/alta ADMB, a, d, CTC média/baixa ADMB, e, m, d, ma, a	LVwf, LVw, LVAw, LAw, LVa, LVAa, LAa PVAa ⁽⁴⁾ , PVA ⁽⁴⁾ , PVAa ⁽⁴⁾ , PAA ⁽⁴⁾ , RQa, RQd RLe, RLm, RLd, RLma, RLa, PVAe ⁽⁴⁾

ADA: água disponível alta, ADM: água disponível média, ADB: água disponível baixa, ADMB: água disponível muito baixa.
LV: Latossolo Vermelho, LVA: Latossolo Vermelho-Amarelo, LA: Latossolo Amarelo, PVA: Argissolo Vermelho-Amarelo, PV: Argissolo Vermelho, PA: Argissolo Amarelo, NV: Nitossolo Vermelho, MT: Chernossolo Argilúvico, MX: Chernossolo Háptico, CX: Cambissolo Háptico, RQ: Neossolo Quartzarênico, RL: Neossolo Litólico, GX: Gleissolo Háptico, GM: Gleissolo Melânico.
ef: eutrófico, e: eutrófico, mf: mesotrófico, m: mesotrófico, df: distroférrico, d: distroférrico, wf: acriférrico, w: ácido, ma: mesoálico, a: álico.
(¹) horizonte B ocorrendo na profundidade de até 20 cm iniciais desde a superfície; (²) horizonte B ocorrendo na profundidade de 20 a 60 cm desde a superfície; (³) horizonte B ocorrendo na profundidade de 60-100 cm desde a superfície; (⁴) horizonte B ocorrendo na profundidade maior que 100 cm desde a superfície; (⁵) mosqueamento ou variegado no horizonte B.

Figura 1. Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. Fonte: PRADO (2005).

O conhecimento dos atributos químicos, físicos e morfológicos do subsolo é fundamental para definição dos ambientes de produção de cana-de-açúcar, pois é o volume de solo que será explorado pelo sistema radicular. Além disso, é importante para julgar o potencial de produção da cana-de-açúcar nos ambientes mais promissores (MAULE et al., 2001; LANDELL et al., 2003)

As variedades de cana-de-açúcar utilizadas no Brasil são provenientes de instituições que conduzem programas de melhoramento genético, como o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC) (antiga Copersucar), a Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (Ridesa), além da multinacional Monsanto (CanaVialis) (REIS, 2009). A disponibilidade de variedades com características agronômicas (resistência a pragas e doenças, alta produtividade, precocidade, tolerância à seca, alta produção de biomassa, etc.) e industriais favoráveis (riqueza em açúcar e boa qualidade de fibras) (REIS, 2009) é um dos componentes tecnológicos fundamentais à sustentação do setor sucroalcooleiro. No entanto, essas características são dependentes das condições edafoclimáticas dos locais de produção.

A adaptação das variedades é importante, sobretudo, em áreas de expansão, onde as condições químicas e hídricas dos solos não são favoráveis, como em solos com alto teor de alumínio em subsuperfície. Existe um esforço em identificar genótipos com maior adaptação a essa condição química, que normalmente está associada à capacidade de a variedade desenvolver o sistema radicular, mesmo com a presença do Al em níveis tóxicos (LANDELL, 1989; LANDELL; BRESSIANI, 2010).

2.3 Sistema radicular da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar possui um sistema radicular diferente do das culturas anuais, o que permite a exploração das camadas mais profundas do solo. Trata-se de uma cultura semiperene, cujo desenvolvimento radicular em maior profundidade é fundamental para o acréscimo de produtividade em solos de baixa fertilidade e de baixa retenção de umidade (EVANS, 1964; BALL-COELHO, 1992; DEMATTÊ, 2005). O ciclo comercial da cultura, com duração de 5 a 7 anos, tem início com o plantio de toletes (mudas). Posteriormente, passa pelas fases de brotação, perfilhamento e maturação, quando finalmente recebe o primeiro corte, fase chamada de cana-planta. Após o primeiro corte, os estágios de corte seguintes são denominados cana-soca, em que a cada corte ocorre a brotação da soqueira e o início de um novo estágio (VASCONCELOS; CASAGRANDE, 2010).

As raízes de cana-de-açúcar são classificadas como raízes de fixação (primárias) e raízes do perfilho. Em cana-planta, no início do desenvolvimento radicular, raízes de fixação são formadas a partir dos primórdios radiculares do tolete (BACCHI, 1983; CASTRO; KLUGE, 2001). Essas raízes primárias são finas e altamente ramificadas, responsáveis por sustentar a planta nas primeiras semanas após a germinação do tolete. Após três meses aproximadamente, as raízes oriundas do tolete representam menos de 2% da massa seca das raízes (DILLEWIJN, 1952). Estas raízes perdem sua função à medida que as raízes do perfilho, chamadas de secundárias, são formadas.

Como cada perfilho possui seu próprio sistema radicular, as raízes continuam em desenvolvimento à medida que aumenta o perfilhamento. As raízes secundárias, mais grossas que as primárias, são responsáveis por desenvolverem o sistema radicular principal da cana-de-açúcar (DILLEWIJN, 1952). Alguns aspectos relacionados ao sistema radicular da cana-de-açúcar, tanto do ciclo cana-planta quanto do ciclo cana-soca, não são totalmente compreendidos. Depois do primeiro corte, o sistema radicular antigo mantém-se ativo por

algum tempo, sendo gradualmente substituído pelas raízes dos novos perfilhos da soqueira (FARONI, 2006). Dessa forma, o desenvolvimento das novas raízes pode proporcionar aumento no comprimento e na densidade radicular.

O sistema radicular de cana-de-açúcar é essencial para a regeneração das soqueiras após a colheita (SAMPAIO; SALCEDO; CAVALCANTI, 1987; ALVAREZ; CASTRO; NOGUEIRA, 2000), o que, conseqüentemente, afeta a produção com o passar dos cortes. Entretanto, é importante salientar que o desenvolvimento radicular pode ser diferente em função da variedade de cana-de-açúcar (HUMBERT, 1968; VASCONCELOS, 2003) (Figura 2).

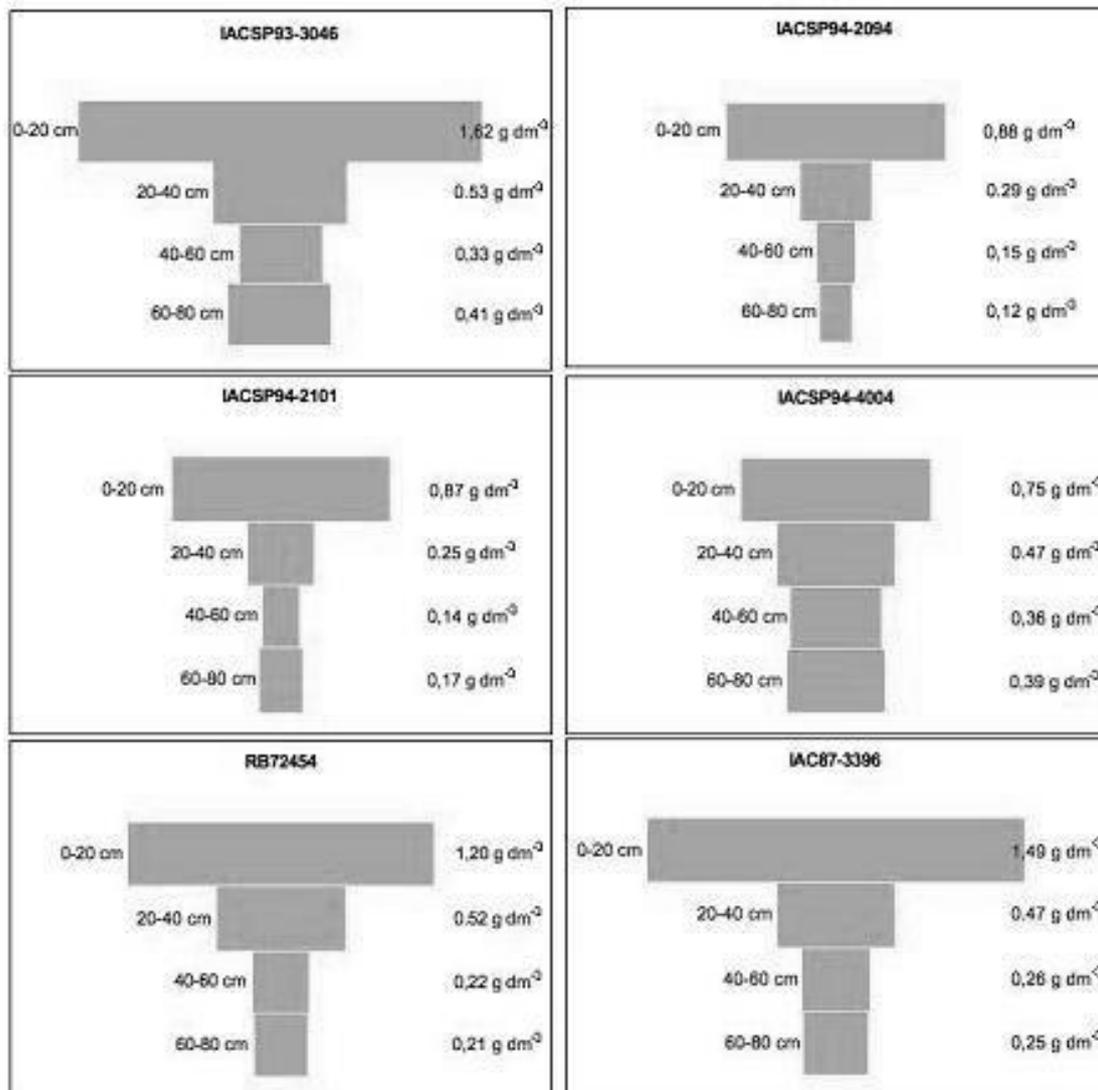


Figura 2. Distribuição do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar. Fonte: LANDELL et al. (2005a).

O tamanho e a distribuição do sistema radicular são fortemente afetados pela distribuição e disponibilidade de água (KOFFLER, 1986b) e de nutrientes (SAMPAIO; SALCEDO; CAVALCANTI, 1987) no solo, causando diferenças na capacidade das culturas em explorar recursos do solo em camadas mais profundas (EVANS, 1964; KORNDÖNFER; PRIVAMAVESI; DEUBER, 1989; SMITH; NMAN-BAMBER; THORBURN, 2005). Dessa forma, além da profundidade, o volume e a distribuição do sistema radicular são importantes para aumentar a eficiência em captar água e nutrientes disponíveis, dependendo das características morfológicas e genótípicas da planta (GOLDMANN et al., 1989).

O desenvolvimento do sistema radicular tem influência direta sobre fatores determinantes para a produtividade final, como a resistência à seca, eficiência na absorção dos nutrientes, tolerância ao ataque de pragas, capacidade de germinação e/ou brotação, porte, tolerância à movimentação de máquinas, etc. (KOFFLER, 1986b; PEARSON, 1996; VASCONCELOS et al., 2003; COSTA et al., 2007, VASCONCELOS; CASAGRANDE, 2010). Segundo Demattê (2004), a baixa fertilidade do solo em profundidade e, conseqüentemente, menor volume e profundidade do sistema radicular, refletem em menor produtividade para a cana-de-açúcar.

Impedimentos físicos e químicos do solo são as causas mais frequentes relacionadas ao reduzido crescimento radicular. Nestas condições, as raízes da cana-de-açúcar inicialmente tornam-se alongadas e, posteriormente, engrossam e não se ramificam normalmente, dificultando o acesso a reservas de água e nutrientes nas camadas mais profundas do solo (CLARKSON, 1965; McCORMICK; BORDEN, 1972; TANG et al. 2003). A profundidade do sistema radicular tem sido largamente sugerida como parâmetro de seleção para melhorar a produtividade em ambientes com baixa disponibilidade hídrica (TAYLOR, 1983). Em solos brasileiros de baixa fertilidade, constata-se que a cana-de-açúcar explora cerca de 60 cm de

solo. Segundo Koffler (1986a), a cana-de-açúcar é capaz de explorar de 120 a 200 cm de solo, desde que não haja barreiras químicas ou físicas ao crescimento de raízes.

2.4 Solos ácidos e a toxidez por Al em plantas

Solos ácidos ocupam aproximadamente 30 a 40% das terras aráveis em regiões tropicais e temperadas (VON UEXKÜLL; MUTERT, 1995) (Figura 3).



Figura 3. Distribuição dos solos ácidos (cor destacada) no mundo. Fonte: von UEXKÜLL e MUTERT (1995).

No Brasil, cerca de 500 milhões de hectares são cobertos por solos ácidos, compreendendo cerca de dois terços de seu território, o que representa a maior área de solos ácidos dentro de um único país (VITORELLO; CAPALDI; STEFANUTO, 2005). Além da acidez na camada superficial, a acidez de subsuperfície tem sido apontada como uma das principais causas de limitação à produtividade agrícola, dada a ação deletéria sobre o crescimento de raízes (QUAGGIO et al., 1993).

Os solos brasileiros, localizados em regiões tropicais e subtropicais úmidas, são representados, em sua maioria, por Latossolos, Argissolos e Neossolos Quartzarênicos, cobertos por vegetação de Cerrado (ADÁMOLI et al., 1986). São solos altamente intemperizados e suas principais características são: pobreza de nutrientes, elevada acidez e fração argila composta por argilominerais do tipo 1:1 (aluminossilicatos) e por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Em condições de elevada acidez, o Al surge na solução, sob a forma catiônica de Al^{3+} . Isso ocorre a partir da dissolução dos minerais de argila e dos óxidos de alumínio (RAIJ, 1981), uma vez que íons H^+ provocam instabilidades nas estruturas dos minerais de argila, liberando íons Al^{3+} para a fração trocável ou para a solução do solo (FOY et al., 1978).

Os solos podem ser naturalmente ácidos em função da pobreza do material de origem em cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e sódio (Na), ou se tornarem ácidos por meio de processos de formação ou de manejo de solos que levam à perda destas bases (QUAGGIO, 2000). A remoção de cátions básicos (Ca, Mg e K) superior a sua reposição, resulta no aumento de cátions de natureza ácida, como H^+ e Al^{3+} no complexo de troca do solo, favorecendo maiores concentrações destes íons na solução do solo. O processo natural de acidificação do solo é muitas vezes intensificado por práticas agrícolas, especialmente pela adição de fertilizantes de reação ácida, como sulfato de amônio e ureia.

O Al^{3+} é um dos componentes da acidez do solo (Tabela 1), pois reage com a água, liberando íons H^+ para solução. Em solos ácidos, com predomínio de argilas do tipo 1:1 (caulinita) e oxihidróxidos (gibbsita), a atividade do Al^{3+} em solução, e das demais espécies de sua hidrólise, é bastante elevada (SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007).

Tabela 1. Componentes da acidez do solo.

Acidez ativa	Acidez trocável	Acidez não trocável	Acidez potencial
H ⁺ da solução do solo, representada pelo pH.	Íons Al ³⁺ e H ⁺ (quando houver), retidos na superfície dos coloides por forças eletrostáticas.	H de ligação covalente associado aos coloides com carga negativa variável e aos compostos de alumínio.	Soma da acidez trocável e da acidez não trocável do solo.

Fonte: SOUSA; MIRANDA; OLIVEIRA, 2007.

A distribuição das espécies de Al em função do pH, em uma solução com ausência de ligantes, exceto OH⁻, demonstra que a forma iônica hexahidratada Al(H₂O)₆³⁺, denominado Al³⁺, predomina em valores de pH menores do que 4,7 (Figura 1) (BERTSCH;PARKER, 1995). Esta espécie iônica de Al é a mais fitotóxica para monocotiledôneas (KOCHIAN (1995) e a que predomina em condições ácidas (pH<5,0), enquanto as espécies Al(OH)²⁺ e Al(OH)₂⁺ são formadas quando o pH aumenta. Em pH neutro, ocorre a fase sólida Al(OH)₃, enquanto o Al(OH)₄⁻ predomina em condições alcalinas (Figura 4).

O alto teor de Al, associado a baixos teores de cátions como Ca e Mg, é considerado uma séria limitação ao desenvolvimento vegetal em solos ácidos com pH ≤ 5,0 (FOY et al., 1978; ANIOL, 1990; BENNET; BREEN, 1991), já que nessas condições as formas tóxicas de Al são solubilizadas, inibindo o crescimento radicular das plantas e reduzindo a capacidade de absorção de nutrientes e água (MISTRO; CAMARGO; PETTINELLI-JUNIOR, 2001; SAMAC; TESFAYE, 2003; WANG et al., 2006).

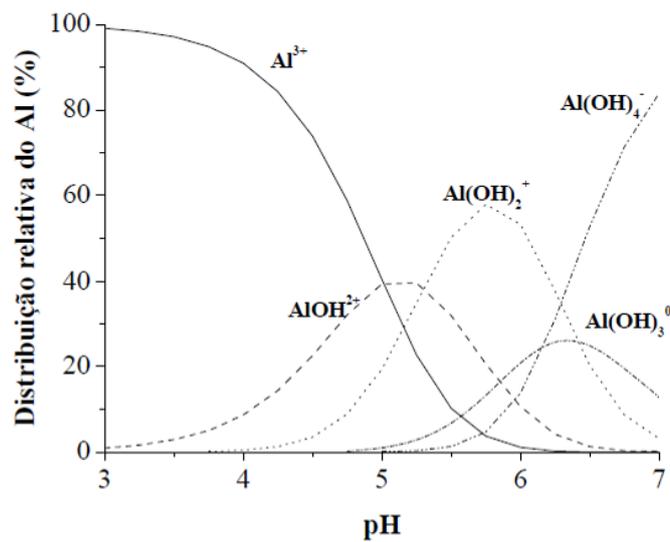


Figura 4. Distribuição relativa das espécies de Al em solução do solo (Adaptado de BERTSCH; PARKER, 1995).

A toxidez causada por Al não depende somente do seu elevado teor, e sim do teor de Al^{3+} em relação à CTC efetiva¹ do solo, índice denominado saturação por Al^{3+} (m%), utilizado como indicador do grau de toxidez do Al para as plantas. Sobral e Guimarães (1992) determinaram classes de toxidez para a cultura da cana-de-açúcar de acordo com a saturação por Al (m%): baixa (<18%), média (18-30%), alta (30-45%) e muito alta (>45%). Essas classes foram determinadas com base nos teores de Al trocável do solo. Porém, somente a determinação deste teor ou do Al total na solução do solo não são indicadores suficientes para avaliar a real toxicidade deste elemento para as plantas.

O efeito primário da toxidez por Al é a inibição do crescimento das raízes. A rápida resposta da raiz indica que, num primeiro momento, o Al inibe a expansão e a alongação das células das raízes, com posterior inibição da divisão celular (KOCHIAN, 1995; MATSUMOTO, 2000). A exposição contínua ao Al implica em alterações morfológicas, como o engrossamento e encurtamento das raízes, com aspecto quebradiço (DELHAIZE;

¹ CTC efetiva = $\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{K}^{+} + \text{Al}^{+3}$

RYAN, 1995), o desenvolvimento de cor castanha na região apical e alterações na arquitetura do sistema radicular, reprimindo o crescimento das laterais e conduzindo à formação de sistemas radiculares com menor área e volume (ROSSIELLO; JACOB NETO, 2006).

O Al tóxico reduz o crescimento radicular (ADAMS; PEARSON, 1970; PAVAN et al., 1984), especialmente o ápice das raízes (KOCHIAN, 1995), prejudica a absorção e transporte de Mg e nitrogênio (N), nutrientes fundamentais na constituição das moléculas de clorofilas (DELHAIZE; RYAN, 1995; ROUT et al., 2001). As clorofilas são pigmentos fotossintéticos, que garantem às plantas a capacidade de absorver energia luminosa nos cloroplastos, para formação de energia química durante a fotossíntese.

O crescimento e a adaptação das plantas a diferentes condições ambientais estão relacionados à eficiência fotossintética que, por sua vez, está associada aos teores de clorofila foliar (SCHLEMMER et al., 2005). Dessa forma, o teor de clorofila pode ser utilizado como parâmetro indicativo de estresse abiótico nas plantas (RANA; AERY, 1999; CODOGNOTO et al., 2002), como aquele que ocorre pela toxidez por Al (HENDRY; PRICE, 1993; MILIVOJEVIC; STOJANOVIC; DRINIC, 2000).

Carlin, Rhein e Santos (2012) verificaram que plantas jovens da cultivar IAC 91-5155 de cana-de-açúcar tiveram redução no teor de clorofila quando expostas ao Al tóxico no solo, apontando que o elemento pode influenciar na absorção e na translocação do Mg, interferindo no processo fotossintético. Cruz et al., (2008), avaliando o efeito da toxidez por Al em sorgo, verificaram que a redução nos teores de clorofila *a*, *b* e total foi proporcional ao aumento da concentração de Al na solução nutritiva.

2.5 Estratégias para minimizar a fitotoxidez por Al

Adaptar o solo à planta, por meio da neutralização da acidez do solo, é uma das formas de controlar a toxidez por Al, sendo a calagem (processo que neutraliza os íons H^+ e Al^{3+}) a prática mais empregada, pois consegue elevar o pH e a saturação por bases do solo, tornando a maioria dos nutrientes mais disponíveis para as plantas, assim como promover a precipitação do Al tóxico (QUAGGIO, 2000). Entretanto, em razão da baixa solubilidade, a reação do calcário é geralmente limitada à camada de aplicação no solo (FIDALSKI; TORMENA, 2005).

A gessagem tem sido uma das alternativas para a redução dos efeitos do Al no subsolo, atingindo profundidades além da camada arável em função da maior mobilidade do gesso no perfil (SHAINBERG et al., 1989; QUAGGIO, 2000). A aplicação de gesso na superfície, seguida por lixiviação, aumenta a concentração de Ca e favorece a complexação do Al pelo sulfato (SO_4^{2-}), formando o par iônico $AlSO_4^+$, responsável pela redução da atividade do Al^{3+} na solução em até 50% (PAVAN et al., 1984). Embora o gesso agrícola seja amplamente empregado, ainda restam dúvidas sobre as condições em que se podem esperar resultados positivos com a sua aplicação e também quanto ao seu método de recomendação para a cultura de cana de açúcar (RAIJ, 2008).

Com o decorrer dos cortes da cana-de-açúcar, há queda acentuada do pH, que é acompanhada pela diminuição da saturação por bases e da disponibilidade da maioria dos nutrientes, além do aumento da saturação por Al (MORELLI et al., 1987). Portanto, é evidente a necessidade de reaplicação de corretivos durante o ciclo da cultura, mas a incorporação do calcário com a cultura implantada é dificultada, devido aos danos causados no sistema radicular.

A aplicação do gesso agrícola para complexação do Al em subsuperfície, em função da sua incorporação ser dispensada, é uma das alternativas para redução dos efeitos tóxicos do

Al. Porém, Medina et al. (2000), avaliando o sistema radicular da variedade IAC58-480 de cana-de-açúcar em função da aplicação de gesso e calcário, concluíram que na 3^o soca, a maior concentração das raízes estava na profundidade de 0 à 0,20 m, ou seja, na camada superficial do solo.

Embora as estratégias utilizadas para adaptação do solo às plantas, com a finalidade de atenuar os efeitos negativos da acidez do solo, associados ao Al fitotóxico, possam ter algum sucesso (SCHUMANN et. al., 1999), elas não oferecem uma solução sustentável que engloba aspectos agronômicos, econômicos e ambientais (WATT, 2003). Dessa forma, a busca de variedades produtivas tolerantes à acidez do solo e com capacidade de emitir raízes em subsolos com Al em níveis tóxicos, surge como estratégia importante de manejo dos solos ácidos (FOY, 1997; DELHAIZE; RYAN, 1995; BRACCINI et al., 2000ab; SILVA et al., 2002), pois pode proporcionar uma redução no uso de insumos.

As plantas apresentam diferentes comportamentos em relação ao excesso de Al no meio em que crescem. Plantas tolerantes devem ser capazes ou de prevenir a absorção de Al ou de complexá-lo após sua absorção (PARENTONI et al., 2001), graças a existência de mecanismos de tolerância ou de detoxificação.

2.6 Tolerância ao Al e métodos de seleção de genótipos

Os vários mecanismos de tolerância ao Al propostos por alguns autores (DELHAIZE; RYAN, 1995; KOCHIAN, 1995; MATSUMOTO, 2000; MA et al, 2001; OSAWA; MATSUMOTO, 2001) podem ser divididos em dois grupos: a) mecanismos de exclusão (apoplásticos), que previnem a entrada do Al nas células apicais da raiz; b) mecanismos de detoxificação interna do Al (simplásticos) (KOCHIAN, 1995; KOCHIAN, 2004).

Nos mecanismos de exclusão, o Al é impedido de chegar aos seus sítios de toxicidade na planta, pois é detoxificado externamente. Esse mecanismo inclui a secreção de substâncias quelantes a partir das raízes, como ácidos orgânicos (malato, citrato e oxalato) (DELHAIZE; RYAN; RANDALL, 1993, RYAN; DELHAIZE, 2001; MARIANO et al., 2005) e íons fostato (PELLET; PAPERNIK; KOCHIAN, 1996), os quais formam complexos com o Al, impedindo sua passagem pela membrana. Além disso, o aumento do pH na rizosfera e a modificação da parede celular (PELLET; PAPERNIK; KOCHIAN, 1996; KIDD et al, 2001; KOCHIAN, 2004; MA et al., 2007) podem atenuar os efeitos tóxicos do Al externamente.

Os mecanismos internos permitem a penetração do Al na célula. Porém, sua ação fitotóxica ou é neutralizada por enzimas ou pela sua compartimentalização no interior do vacúolo, onde é complexado por cátions (ZHENG; MA; MATSUMOTO, 1998). Neste grupo, estão incluídos os mecanismos de fixação do Al^{3+} na parede celular, de complexação no simplasto via ligantes orgânicos e de sequestro no vacúolo (KOCHIAN et al., 2004).

A exsudação de ácidos orgânicos, com capacidade de quelatar o Al na rizosfera, reduzindo tanto a concentração como a toxicidade do Al na zona de crescimento da raiz (MA et al., 2001), vem sendo estudada em diversas espécies. Porém, o que não está elucidado ainda é como diferentes espécies regulam a especificidade do ácido exsudado na presença do Al (HARTWIG et al. 2007). Embora a maior parte das pesquisas esteja focada na exclusão do Al pela exsudação de ácidos orgânicos ativados pela sua presença no ápice da raiz, Ma et al.

(2001) apontaram que determinados ácidos orgânicos podem detoxificar o Al tanto na interface raiz-solo (mecanismo externo) como no citosol (mecanismo interno). Apesar da grande quantidade de pesquisas nesta área, os mecanismos fisiológicos e bioquímicos, tanto da toxidez por Al, quanto da tolerância em plantas, ainda não foram totalmente compreendidos (DRUMMOND et al., 2001).

Como a seleção de plantas tolerantes ao Al é considerada a alternativa mais adequada, o primeiro passo é estabelecer um sistema rápido e preciso, para a seleção de um grande número de plantas. Diferentes métodos têm sido empregados para avaliar a tolerância das espécies a toxidez por Al (Tabela 2).

Em cana-de-açúcar, já foram relatadas variações entre os cultivares com respeito à capacidade de expansão e ao aprofundamento do sistema radicular, principalmente em resposta ao estresse causado pelo Al (SMITH; INMAN-BAMBER; THORBURN, 2005; VASCONCELOS; GARCIA, 2005). Porém, trabalhos de avaliação da tolerância das variedades ao Al tóxico, além de serem escassos, utilizaram variedades não mais plantadas atualmente, com exceção do trabalho realizado por OLIVEIRA (2012), que, buscando desenvolver um protocolo experimental para avaliar a tolerância ao Al em cana-de-açúcar, concluiu que as variedades apresentaram comportamento diferenciado na presença deste metal. Alguns trabalhos se dedicaram à prospecção dos genes responsáveis pela tolerância da cana-de-açúcar ao excesso de Al (DRUMMOND et. al., 2001; WATT, 2003).

Tabela 2. Métodos de avaliação da tolerância das espécies vegetais ao Al fitotóxico.

Método	Descrição	Vantagens	Desvantagens
Campo	Utilizam dois níveis de saturação por Al: 60% ou 80%, nível alto, e 15%, nível não tóxico, para a maioria das culturas (OLMOS e CAMARGO, 1976).	Selecionam genótipos sob condições naturais, resultando em uma integração dos efeitos do Al e de outras condições limitantes.	Longo período requerido, variabilidade das características do solo e clima. Dificuldade na visualização do sistema radicular.
Casa de vegetação	Experimentos em vaso ou coluna de solo, com variação nas condições químicas (m%, principalmente) (DAL BÓ et al., 1986).	Condições controladas, diminuindo a interferência de fatores externos.	Dificuldade em selecionar solos onde somente o alto teor de Al seja limitante. Dificuldade na visualização do sistema radicular
Casa de vegetação ou laboratório	Plantas cultivadas em solução nutritiva e posteriormente submetidas a doses crescentes de Al.	Visualização diária do desenvolvimento radicular das plantas. Condições controladas.	Manutenção do pH (em torno de 4,0). Teste preliminar.
Laboratório utilizando corantes indicadores	Avaliam o acúmulo de Al na extremidade das raízes baseado na oxidação do corante na presença do Al. Plântulas são expostas a uma solução com Al e, posteriormente, são colocadas em solução com contendo corante.	Testes rápidos e com menor custo.	Teste preliminar, Necessidade de outros ensaios complementares.

Fonte: ECHART e CAVALLI-MOLINA (2001); FERREIRA et al. (2006).

2.7 Complexação do Al por ácidos orgânicos

Segundo Tan (1993), a capacidade de adsorção dos cátions aos coloides do solo depende da eletronegatividade, da valência e do raio iônico do íon hidratado. Devido a sua carga trivalente, pequeno raio iônico (0,057 nm) e eletronegatividade relativamente alta, o Al apresenta também a forte tendência de se ligar com um ânion inorgânico ou orgânico na solução do solo (CAMBRI, 2004).

O Al pode formar complexos com ânions inorgânicos, como sulfato e fosfato e com ácidos orgânicos, reduzindo a concentração do Al^{3+} na solução do solo e, conseqüentemente, sua toxidez às plantas (DELHAIZE; RYAN, 1995). A quantidade de Al complexado com as hidroxilas depende do pH da solução do solo, enquanto a quantidade do Al complexado por ligantes inorgânicos e orgânicos depende da concentração desses ligantes na solução do solo e da constante de equilíbrio (K^0) do complexo (LINDSAY; WALTHALL, 1996). A complexação do Al pelos ligantes orgânicos geralmente é mais forte do que a complexação com ligantes inorgânicos (RITCHIE; NELSON; WHITTEN, 1988).

Os ácidos orgânicos de baixo peso molecular, como os ácidos oxálico, cítrico e málico, encontrados na solução do solo (Figura 5), apresentam alta afinidade com metais como o Al (XU et al., 2004). Isso decorre da presença de grupos funcionais, principalmente o carboxílico e o fenólico, capazes de formar moléculas estáveis com Al^{3+} , diminuindo a fitotoxidez desse cátion (MA et al., 2001, ALVAREZ et al., 2009). A ligação do Al com os ligantes orgânicos pode ocorrer através de: ligação de hidrogênio, atração eletrostática, complexo de esfera externa, quelação ou complexo de esfera interna (SPOSITO, 1995). Ácidos di e tricarbóxicos, de baixo peso molecular, formam complexos com o Al^{3+} presente na rizosfera, reduzindo ou mesmo anulando, seus efeitos tóxicos, uma vez que tais complexos são incapazes de atravessar a membrana plasmática (KOCHIAN et al., 2004).

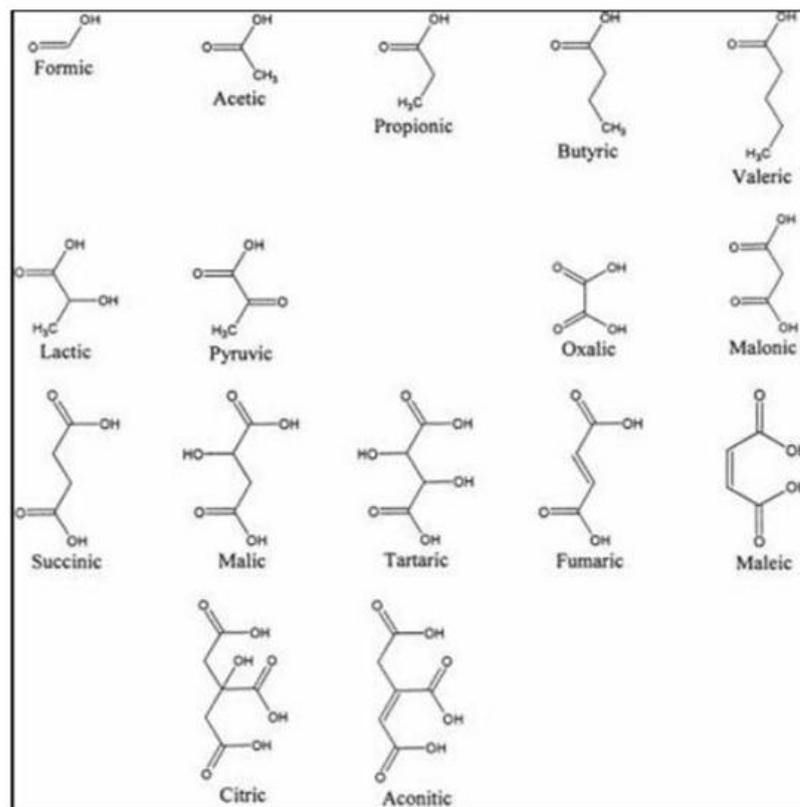


Figura 5. Ácidos orgânicos de baixo peso molecular encontrados na solução do solo.

Fonte: STROBEL (2001).

Na maioria dos solos cultivados, a concentração de ácidos orgânicos é muito pequena, devido ao seu baixo teor de matéria orgânica (principal fonte desses ácidos). A lavagem direta da palha dos resíduos vegetais (MALVESTITI, 2014) e a produção de exsudados radiculares e microbianos também são outras importantes fontes desses ácidos (GUPPY et al., 2005).

A MOS engloba todos os compostos que contém carbono orgânico, como micro-organismos, resíduos de plantas e de animais e as substâncias orgânicas microbiologicamente e/ou quimicamente alteradas (MEURER, 2012), podendo ser dividida em dois grupos: as substâncias húmicas e as biomoléculas orgânicas (STEVENSON, 1994). O primeiro grupo é constituído, geralmente, por ácidos húmicos e fúlvicos e pela humina. As biomoléculas, resultantes do metabolismo microbiano e da degradação do material orgânico adicionado ao solo, são formadas por carboidratos, aminoácidos e ácidos orgânicos de baixo peso molecular.

Os ácidos húmicos e fúlvicos e os ácidos orgânicos de baixo peso molecular (Figura 6) são importantes na complexação do Al em solução.

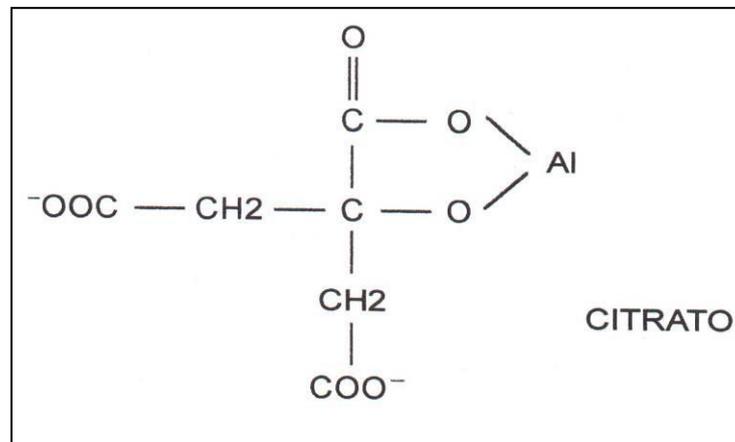


Figura 6. Modelo de complexação de alumínio com um ácido orgânico de baixo peso molecular (Fonte: ANGHINONI; SALET, 2014).

O carbono orgânico dissolvido (COD - teor de biomoléculas orgânicas e de ácidos fúlvicos e húmicos, e seus complexos, dissolvidos na solução do solo) é um componente que afeta a composição química, as formas (espécies) e a atividade dos íons que se encontram na solução, sendo fundamental para compreender a disponibilidade e a toxidez de metais no solo, como o Al.

A adição de material orgânico no solo pode reduzir os teores de Al trocável e da solução do solo (total e monomérico), sendo essa redução provavelmente causada ou pelo aumento do pH e/ou pela complexação do Al pelas fases sólida e líquida da matéria orgânica (HAYNES; MOKOLOBATE, 2001). Naramabuye e Haynes (2007) avaliaram por seis meses o efeito da adição de matéria orgânica em solo incubado e observaram que, além da elevação do pH, ocorreu a redução nos teores de Al trocável e da solução do solo. Provavelmente, essa redução foi devido à complexação do Al tóxico pelo COD presente nos componentes orgânicos, como esterco de aves, bovinos e suínos, e no lodo de esgoto. Além disso, a adição

desses materiais orgânicos no solo contribuiu para o aumento de carbono solúvel na solução do solo.

2.7.1 Vinhaça

A vinhaça, principal efluente das usinas de álcool, vem sendo aplicada em larga escala por fertirrigação nos canaviais. Seus principais constituintes são a matéria orgânica, basicamente sob a forma de ácidos orgânicos e, em menor quantidade, cátions (Ca, Mg e K) e ânions (NO_3^-). Resíduos orgânicos, como a vinhaça, podem adicionar quantidades significativas de ácidos fúlvicos e de ácidos orgânicos de baixo peso molecular (componentes do carbono orgânico dissolvido) ao solo (THURMAN, 1985). A concentração de COD na vinhaça está em torno de 10 a 14 mg L^{-1} (BENKE; MERMUT, 1998).

A aplicação de vinhaça, na dosagem correta, pode trazer melhorias nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo. Zolin et al. (2011), em um estudo exploratório dos efeitos da aplicação de vinhaça nas propriedades de solos cultivados com cana-de-açúcar, verificaram que à partir da primeira aplicação de vinhaça ocorreu aumento no teor de carbono orgânico no solo.

Matiazzo e Glória (1985) observaram que a adição de vinhaça em um NEOSSOLO QUARTZARÊNICO elevou o pH do solo, promovendo a precipitação do Al^{3+} , aos 14 dias. Contudo, em um ARGISSOLO, estes autores observaram que o Al^{3+} foi reduzido à metade da sua concentração apenas no final do experimento (178 dias). Segundo Rodella, Zambello e Orlando Filho (1983), a acidez trocável, representada pelos íons Al^{3+} , pode ser neutralizada por ácidos orgânicos ou retida pela fração orgânica coloidal presentes na vinhaça.

Dentre os ácidos orgânicos presentes na vinhaça, o ácido acônítico é o que se apresenta em maior concentração (Tabela 3) (MORALES, 2000). Classificado como um ácido orgânico de baixo peso molecular, pode ser encontrado na solução do solo, complexado ao Fe

e ao Al (SZMIGIELSKA et al., 1997) ou juntamente com outros ácidos (HEES et al., 2000). Além disso, o ácido aconítico tem sido apontado como o principal ácido orgânico acumulado em gramíneas (CAMBRAIA et al., 1983; GUTIERREZ; FERRARI, 1988), tanto em condições normais quanto sob estresse por Al.

Tabela 3. Composição orgânica da vinhaça concentrada.

Compostos não voláteis	Concentração (%)	Compostos não voláteis	Concentração (%)
2,3 Butanodiol	0,01	Ácido aspártico	0,05
2- metil- 1,3- butanodiol	0,20	Ácido aconítico	1,80
Glicerol	2,70	Ácido cítrico	0,80
Sorbitol	1,40	Ácido quínico	0,70
Ácido láctico	1,30	Sacarose	0,20
Ácido succínico	0,70	Frutose + glicose	1,30
Ácido málico	0,23	Ácido 2,4 dihidroxipentanedioico	0,71

Fonte: MORALES (2000).

A vinhaça pode contribuir com a redução nos teores de Al^{3+} no solo ao complexá-lo com o carbono orgânico dissolvido (COD), principalmente com ácidos orgânicos de baixo peso molecular e dessa forma, diminuindo a toxicidade deste elemento.

3. MATERIAL E MÉTODOS

A avaliação da tolerância de variedades de cana-de-açúcar à toxidez por Al foi realizada por meio de experimento em condições de casa de vegetação, utilizando cilindros preenchidos com solo como substrato. Segundo Ferreira et al. (2006), este tipo de protocolo experimental é o mais adequado para ser desenvolvido em casa de vegetação para estudos com esses propósitos, com aplicação bem sucedida relatada (DAL BÓ et al., 1986; RAMOS et al., 2006).

O experimento foi conduzido no Centro de Ciências Agrárias (CCA), *campus* de Araras-SP, da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), a uma altitude de aproximadamente 611 metros, durante o período de abril de 2013 a fevereiro de 2014. O clima da região, pelo sistema de classificação de Köppen (1948), é do tipo Cwa (temperado úmido com inverno seco e verão quente). Durante o cultivo da cana-de-açúcar (outubro/2013 a fevereiro/2014) a temperatura média em Araras foi de 24,4 °C, de acordo com os dados fornecidos pela Estação Meteorológica do CCA/UFSCar.

3.1. Delineamento experimental

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, com 3 repetições, em esquema fatorial 3x2, considerando os fatores variedades (RB855453, RB966928 e RB867515) e vinhaça (presença e ausência) totalizando 6 tratamentos. A Tabela 4 contém a descrição dos tratamentos e a Tabela 5 contém a análise de variância.

Tabela 4. Descrição dos tratamentos empregados em ensaio de avaliação do crescimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em solo com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Tratamento	Vinhaça	
1	RB855453	Presença
2	RB966928	
3	RB867515	
4	RB855453	Ausência
5	RB966928	
6	RB867515	

Tabela 5. Análise de variância (ANOVA) empregada em ensaios de avaliação do crescimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em solo com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Causas de variação	Graus de liberdade
Variedades (Va)	2
Vinhaça (Vi)	1
Interação Va x Vi	2
Tratamentos	5
Resíduo	12
Total	17

Para avaliação do sistema radicular, o delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com 3 repetições, em esquema fatorial 3x2x4, considerando os fatores variedades (RB855453, RB966928 e RB867515), vinhaça (ausência e presença) e profundidades (0 a 20, 20 a 40, 40 a 60 e 60 a 80 cm) totalizando 24 tratamentos.

3.2. Solo

O solo utilizado no experimento, classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico (LVAd) (EMBRAPA, 2013), foi coletado em área sob plantio de cana-de-açúcar, pertencente a Fazenda São Bento, no município de Santa Gertrudes-SP. O LVAd foi escolhido em função de suas conhecidas restrições em termos de fertilidade, sobretudo pelo elevado teor de Al e pela alta saturação por Al (m%) nas camadas subsuperficiais.

A coleta do solo foi realizada com o auxílio de pá carregadeira, nas profundidades de 0-20 cm (2 toneladas) e de 40-80 cm (1 tonelada). No momento da coleta, foram retiradas três amostras indeformadas em anel volumétrico, para caracterização física. O solo coletado foi seco ao ar e passado por peneira de malha de 2 mm. Posteriormente, três subamostras de terra fina seca ao ar (TFSA) de cada profundidade foram coletadas para a caracterização química.

3.2.1. Caracterização química e física

A caracterização química das amostras de solo foi realizada no Laboratório de Fertilidade do Solo, do CCA-UFSCar, conforme métodos descritos por Raij et al. (2001). Os parâmetros analisados foram: fósforo (P_{resina} , mg dm^{-3}), carbono orgânico (g dm^{-3}), pH (em CaCl_2), potássio (K , $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), cálcio (Ca , $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), magnésio (Mg , $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), acidez potencial (H+Al , $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e alumínio (Al , $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Os valores de soma de bases (SB , $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), capacidade de troca de cátions total (CTC_t , $\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), saturação por bases (V%) e saturação por alumínio (m%) foram obtidos por cálculo à partir dos parâmetros determinados (Tabela 6).

Tabela 6. Atributos químicos do LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico utilizado no experimento.

Profundidade	P _{Resina}	¹ MO	pH	K	Ca	Mg	H+Al	Al	² SB	³ CTC _t	⁴ V	⁵ m
cm	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	CaCl ₂	-----			mmol _c dm ⁻³	-----		----	%	----
0-20	4,7	11,7	5,1	0,9	12,8	3,5	26,2	1,1	17,2	43,5	39,5	6,0
40-80	5,0	2,0	4,0	0,6	5,0	2,0	34,0	12,7	7,6	41,6	18,3	62,6

¹MO = CO x 1,724; ²SB = Ca + Mg + K; ³CTC_t = SB + (H+Al); ⁴V = (SB / CTC_t) x 100; ⁵m = (Al / CTC_e) x 100, em que CTC_e = SB+Al.

A caracterização física das amostras de solo (Tabela 7) foi realizada pelo Laboratório de Física do Solo do CCA-UFSCar, segundo a metodologia descrita pela EMBRAPA (1997). Foram coletadas três amostras indeformadas, com anéis volumétricos (50 cm³), na profundidade de 0-20 cm para determinação da densidade aparente e umidade na capacidade de campo. A capacidade de campo foi determinada a partir de amostras saturadas em câmara de pressão de Richards, submetidas à tensão de 0,033 MPa (limite superior da água disponível ou capacidade de campo).

Amostras deformadas (0-20 cm) foram usadas para a análise granulométrica, pelo método do densímetro, com posterior classificação textural do solo. A partir da análise granulométrica, o solo foi classificado como sendo de textura média (EMBRAPA, 2013).

Tabela 7. Atributos físicos do LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico utilizado no experimento.

Capacidade de campo	Densidade aparente	Análise granulométrica				
		Argila	Areia g kg ⁻¹		Silte	
(%)	(g cm ⁻³)	(g kg ⁻¹)	Grossa	Fina	Total	(g kg ⁻¹)
10	1,7	160	420	380	800	40

3.2.2. Incubação do solo

O solo coletado na profundidade de 0-20 cm recebeu calagem segundo o critério de recomendação do Boletim Técnico IAC nº100 (RAIJ et al., 1996) para a cultura da cana-de-açúcar. A necessidade de calagem foi calculada conforme o método da saturação por bases e a dose de calcário aplicada foi de $1,0 \text{ t ha}^{-1}$. A incubação foi realizada em casa de vegetação, até a saturação por bases (V%) atingir um valor próximo a 60%. Este solo foi utilizado para preencher o primeiro anel de cada coluna, simulando a camada arável, e também para preencher as colunas utilizadas como controle do desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar.

O restante do solo, coletado na profundidade de 40-80 cm, foi incubado separadamente com doses de calcário suficientes para a obtenção de diferentes níveis de saturação por bases (V% = 45 e 35), sendo a necessidade de calcário calculada de acordo com RAIJ et al. (1996). Os valores de V% = 45 e 35 foram obtidos com a aplicação de calcário nas doses $1,2$ e $0,8 \text{ t ha}^{-1}$, respectivamente. Valores de V% = 18 foram obtidos pelo uso do solo natural, sem incubação com calcário.

3.2.3. Colunas de solo

Colunas de PVC foram construídas pela sobreposição de quatro anéis, de 20 cm de diâmetro e 20 cm de altura, unidos por fita adesiva. Nas colunas (com e sem aplicação de vinhaça), os anéis foram acomodados e preenchidos com solo de forma a obter um gradiente de saturação por alumínio, crescente de cima para baixo (m% = 0,7; 7,9; 40,8; 62,6) (Figura 7). Para cada variedade, foram conduzidas seis colunas (três colunas com e três colunas sem aplicação de vinhaça).

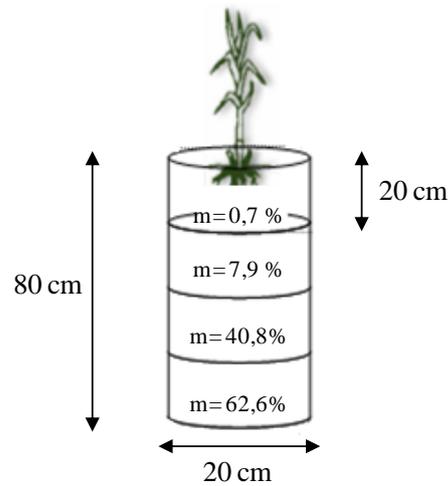


Figura 7. Esquema de montagem da coluna para ensaios de desenvolvimento radicular de variedades de cana-de-açúcar em solo com gradiente saturação por Al e submetido á aplicação de vinhaça.

As diferentes saturações por Al (Tabela 8) representaram desde valores não tóxicos ($m\% = 0,7$) a até altamente tóxicos ($m\% = 62,6\%$) para as plantas, baseados nos trabalhos de Olmos e Camargo (1976) e de Sobral e Guimarães (1992).

Tabela 8. Atributos químicos de amostras do LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico utilizado no preenchimento dos anéis após a incubação.

Anel	P mg dm^{-3}	Ca ----- $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$	Mg $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$	Al -----	¹ m ----- %	² V -----	³ pH
1°	5,0	20,0	6,0	0,2	0,7	58,7	5,5
2°	3,0	12,0	6,0	1,6	7,9	45,9	4,8
3°	3,0	7,0	3,0	8,4	40,8	32,8	4,4
4°	2,0	5,0	2,0	12,7	62,6	18,3	4,0

¹Saturação por alumínio; ²Saturação por bases; ³pH em CaCl_2 .

Para cada variedade, foram conduzidas 6 colunas controle (3 colunas com e 3 colunas sem aplicação de vinhaça), cujos anéis foram preenchidos exclusivamente com solo em

condições ideais para a cana-de-açúcar (Figura 8) ($V\% = 58,7$ e $m\%$ em valor não tóxico para plantas). Essas colunas controle foram construídas para verificar o aprofundamento máximo do sistema radicular em condições adequadas de saturação por bases, ou seja, a capacidade intrínseca de cada variedade.

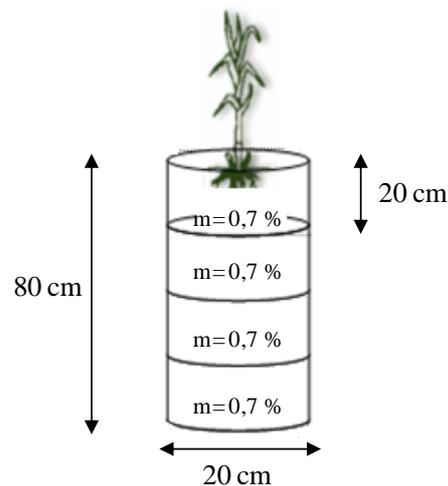


Figura 8. Esquema de montagem das colunas controle para ensaios de desenvolvimento radicular de variedades de cana-de-açúcar em solo com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

3.2.4. Preenchimento das colunas

Para preencher as colunas, primeiramente foi calculada a massa (kg) de solo necessária para ocupar o volume do anel ($6,3 \text{ dm}^3$), considerando densidade de $1,4 \text{ g cm}^{-3}$. Este valor foi considerado representativo por alguns autores para a densidade de LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO textura média (REICHARDT, 1985; BRITO et al. 2011), sob diferentes usos (GUARIZ et al., 2009), sem constituir restrição ao desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar (COSTA et al., 2007).

O preenchimento da coluna foi efetuado acomodando gradativamente o solo com auxílio de um funil (Figura 9), realizando movimentos circulares, proporcionando melhor distribuição das partículas. Concomitante ao preenchimento, utilizando um martelo de

borracha, foram efetuadas leves batidas na parede externa da coluna, a fim de propiciar melhor acomodação do solo e de evitar fluxo preferencial da água de irrigação ao longo da coluna.



Figura 9. Preenchimento da coluna de solo em ensaio do desenvolvimento radicular de variedades de cana-de-açúcar em solo com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

A acomodação do solo nas colunas foi realizada de modo que o solo natural, com $m\% = 62,6$, ocupasse o anel inferior (último anel, base da coluna), o solo com $m\% = 40,8$ o penúltimo anel, e assim sucessivamente, até o que solo com $m\% = 0,7$ preenchesse o anel superior (primeiro anel da coluna). Em seguida, o solo de cada coluna foi umedecido a 70% da capacidade de campo. Esta condição foi mantida durante todo o período de condução do experimento, por meio de pesagens das colunas e reposição diária da água perdida por evaporação e transpiração.

3.3. Condução do bioensaio

3.3.1. Variedades de cana-de-açúcar

Foram utilizadas variedades RB provenientes do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar (PMGCA) da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro (RIDESA). As variedades utilizadas foram escolhidas em função do Censo Varietal 2012 realizado pelo PMGCA/UFSCar (CHAPOLA et al., 2013), onde foram apontadas as variedades mais cultivadas e/ou plantadas no Brasil. As variedades utilizadas possuem as seguintes características (RIDESA, 2010):

a) RB855453: Maturação precoce, com colheita de maio a julho, alta produtividade, recomenda-se alocá-la em ambientes favoráveis. Segundo Marin (2013), é considerada uma variedade exigente em água.

b) RB966928: Maturação precoce, com colheita de abril a maio, alta produtividade, indicada para ambientes de médio/alto potencial.

c) RB867515: Maturação média tardia, com colheita de julho a setembro, alta produtividade e desenvolvimento rápido, recomendada para ambientes de média fertilidade natural. Variedade considerada tolerante a seca (MARIN, 2013).

Informações adicionais sobre a sensibilidade destas variedades ao Al em solução foram obtidas por Oliveira (2012), a partir de experimentos de laboratório. Segundo a autora, as variedades foram classificadas quanto a tolerância ao Al da seguinte forma: RB855453 = RB966928 > RB867515.

3.3.2 Germinação dos minitoletes

Minitoletes de cana-de-açúcar, com gema única, foram previamente submetidos a tratamento térmico (50,5 °C por 2 horas) com a finalidade de garantir sua sanidade.

Posteriormente, os minitoletes foram germinados em bandejas plásticas contendo substrato orgânico Multiplant® (Tabela 9), rotineiramente empregado pelo PMGCA/UFSCar. O substrato foi umedecido numa relação 1:0,8 (substrato:água) e os minitoletes foram dispostos com a gema pra cima, cobertos com uma fina camada de substrato. As bandejas foram acondicionadas em casa de vegetação por 15 dias, sendo a umidade monitorada diariamente, com reposição periódica de água.

Tabela 9. Resultados da análise química e física do substrato Multiplant® utilizado na germinação dos minitoletes de cana-de-açúcar.

Parâmetro	Unidade	Teor	Parâmetro	Unidade	Teor
P resina ¹	mg dm ⁻³	180	V ³	%	87
MO	g dm ⁻³	270	S		37
pH	-	5,9	B		1,2
K		5,9	Cu	mg dm ⁻³	1,8
Ca		89	Fe		58
Mg		22	Mn		39
H+Al	mmol _c dm ⁻³	18	Zn		2,7
Al		0,2	CRA ⁴	%	140
Soma de bases		117	ρ ⁵	g cm ⁻³	0,3
CTC ²		137,9			

¹P_{resina} – fósforo extraído por resina trocadora de íons; ²CTC – capacidade de troca de cátions total; ³V – saturação por bases; ⁴CRA – capacidade de retenção de água; ⁵ρ – densidade.

3.3.3 Adubação de plantio

A adubação de plantio foi realizada com base na análise química do solo após a incubação e na recomendação do Boletim Técnico 100 IAC (RAIJ et al., 1996), sendo a necessidade de nutrientes definida com base em uma produtividade esperada de 100-150 t ha⁻¹. Dessa forma, a dosagem definida foi 30 kg ha⁻¹ de N, 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, e 100 kg ha⁻¹ de K₂O. A quantidade de fertilizante foi calculada para a camada 0-20 cm, representada pelo primeiro anel ($\cong 6,3 \text{ dm}^3$), simulando a adubação da camada arável. As fontes e quantidades aplicadas no primeiro anel de cada coluna, a cinco centímetros de profundidade, foram: superfosfato simples (1,60 g), sulfato de amônio (0,35 g) e cloreto de potássio (0,4 g).

3.3.4. Plantio das mudas

O plantio das mudas de cana-de-açúcar foi realizado 15 dias após o início da germinação (Figura 10). As mudas, pré-germinadas em substrato, foram transplantadas para o primeiro anel de cada coluna.

Em cada coluna foram transplantadas três mudas (Figura 11), selecionadas previamente quanto à uniformidade. Transcorridos 30 dias após o plantio, foi realizado o desbaste, mantendo apenas uma planta por coluna.

3.3.5. Monitoramento da umidade do solo das colunas

Foram conduzidas três colunas adicionais para o monitoramento da umidade no solo, as quais foram pesadas diariamente para a reposição de água suficiente para manter a umidade das colunas a 70 % da capacidade de campo (Tabela 7).



Figura 10. Mudanças de cana-de-açúcar no momento do plantio (régua de 15 cm).



Figura 11. Disposição das colunas após o plantio das mudas de cana-de-açúcar; cores diferentes representam os tratamentos.

3.3.6 Adubação de cobertura

A adubação mineral de cobertura foi feita aos 30 dias após o plantio, com a adição de 30 kg ha⁻¹ de N, conforme recomendado por Rajj et al. (1996) para a meta de produtividade de 100-150 t ha⁻¹. Distribuiu-se 0,35 g de sulfato de amônio por coluna, ao redor das plantas. Nos tratamentos em que não houve aplicação de vinhaça, foram adicionados 20 kg ha⁻¹ de K₂O, complementar a adubação de plantio, sendo aplicados 0,09 g de cloreto de potássio em cada coluna.

3.4. Vinhaça

A vinhaça foi proveniente de uma usina de produção de açúcar e álcool, localizada no município de Piracicaba-SP. Logo após a coleta, a vinhaça foi congelada e posteriormente submetida à caracterização físico-química, conforme a norma técnica P4. 231 da CETESB (CETESB, 2006), pelo laboratório ASL Análises Ambientais, situado em Rio Claro-SP, acreditado pela ISO/IEC 17025:2005. A análise do teor de micronutrientes foi realizada pelo Laboratório de Fertilidade do Solo, do CCA-UFSCar, segundo a metodologia proposta por Rodella (1983). Dessa forma, o ferro e o manganês, foram extraídos por digestão nítrico-perclórica, e o cobre e zinco extraídos por solução extratora (ácido clorídrico 0,05 mol L⁻¹ e ácido sulfúrico 0,0125 mol L⁻¹), sendo posteriormente determinados por espectrometria de absorção atômica.

3.4.1 Aplicação

A quantidade de vinhaça aplicada foi calculada a partir dos resultados da análise química do solo e da vinhaça, conforme a Norma Técnica P4.231 (CETESB, 2006) (Equação 1).

$$\text{Quantidade de vinhaça (m}^3\text{ha}^{-1}\text{)} = \frac{[(0,05 \times \text{CTC}_t - \text{K}_{\text{solo}}) \times 3144 + 185]}{\text{K}_{\text{vinhaça}}} \quad \text{Equação 1}$$

em que:

0,05 = 5% da CTC_t , ou seja, proporção máxima da capacidade de troca de cátions total do solo que pode estar ocupada pelo potássio (K);

CTC_t = capacidade de troca de cátions total do solo, expressa em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, obtida pela análise de solos para fins de fertilidade, realizada por laboratório de análise de solo que utiliza metodologia adotada pelo Instituto Agronômico de Campinas (IAC) e devidamente assinada por responsável técnico;

K_{solo} = teor de potássio (K) do solo, expresso em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, à profundidade de 0 a 0,80 m, obtida pela análise de solos para fins de fertilidade, realizada por laboratório de análise de solo que utiliza metodologia adotada pelo Instituto Agronômico de Campinas (IAC) devidamente assinada por responsável técnico;

3744 = constante que converte os resultados da análise de solo para fins de fertilidade, expressos em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, para kg de potássio (K) por volume de solo contido em 1 (um) hectare à 0,80 m de profundidade;

185 = quantidade de K_2O , em kg, extraída pela cultura da cana-de-açúcar, por corte;

$\text{K}_{\text{vinhaça}}$ = teor de potássio (K) da vinhaça, expresso em kg de $\text{K}_2\text{O m}^{-3}$, apresentado em boletim analítico assinado por responsável técnico.

A dose de vinhaça obtida pela equação foi de $170,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, o que resultou na aplicação de 0,5 L de vinhaça por coluna, aplicada 30 dias após o plantio.

3.5 Coleta do experimento

A coleta do experimento foi realizada aos 120 dias após o plantio (Figura 12). As plantas de cana-de-açúcar foram cortadas na base do colmo e, posteriormente, as colunas foram desmontadas (Figura 13a), seccionando os anéis com auxílio de uma placa metálica. Em seguida, foram coletadas amostras de solo de cada anel (item 3.5.2).



Figura 12. Variedades de cana-de-açúcar 120 dias após o plantio.

Posteriormente, a fim de separar o solo das raízes, o conteúdo de cada anel ($6,3 \text{ dm}^{-3}$) foi depositado sobre uma peneira de malha de 2 mm. O conteúdo “solo + sistema radicular” foi separado aplicando-se jatos sucessivos de água, para retirada do excesso de solo (Figura 13b), obtendo-se a matéria úmida do sistema radicular, desenvolvido em cada anel (Figura 14).

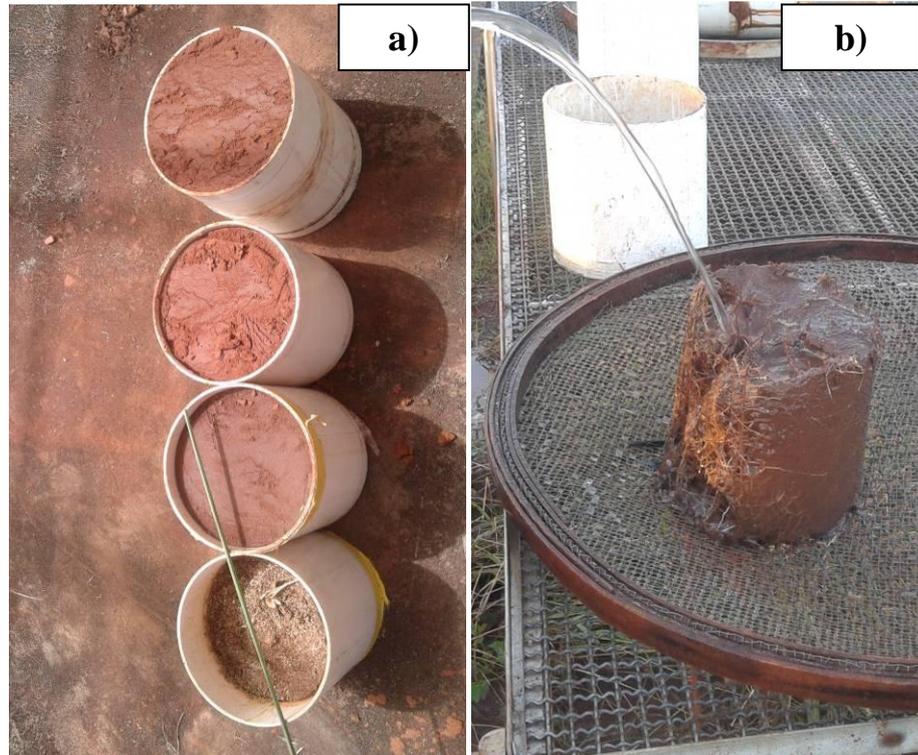


Figura 13. a) Separação dos anéis de PVC, após a coluna de solo ser desmontada. b) Lavagem do sistema radicular para retirada do excesso de solo das raízes.



Figura 14. Matéria úmida do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar, após a retirada do solo.

3.5.1 Biometria e Índice de Clorofila das variedades de cana-de-açúcar

Informações biométricas do desenvolvimento das variedades de cana-de-açúcar foram obtidas pelos seguintes parâmetros:

- a) Diâmetro do colmo: medido com auxílio de um paquímetro digital, no 3º internódio acima da superfície do solo (LEITE; CRUSCIOL; SILVA, 2011; SILVA et al., 2012);
- b) Altura média das plantas (AMP): determinada a maior altura total (m) do colmo principal (do colo da planta até a extremidade da folha mais alta) com auxílio de uma trena (MACHADO et al., 2009) (Figura 15a);
- c) Índice de clorofila foliar (*a* e *b*): determinados nas plantas com auxílio do medidor portátil de clorofila ClorofiLOG®, modelo CFL 1030 (Marca Falker), que faz leituras em três comprimentos de onda: 635 (clorofila *b*), 650 (clorofila *a*) e 840 nm (correção do grau de hidratação das folhas) (VARGAS et al., 2012). O ClorofiLOG® possui um sensor inferior que recebe a radiação transmitida através da estrutura foliar. A partir desse dado, o aparelho fornece valores de leitura proporcionais à absorbância das clorofilas *a*, *b* e total (*a+b*) em unidades adimensionais, chamados valores ICF (Índice de Clorofila Falker) (FALKER, 2008). As avaliações foram realizadas no período da manhã, coletando-se o terço médio do limbo foliar e retirando a nervura das folhas +1 (Figura 15b) (SANTOS, 2012; CARANHATO et al., 2012; CARLIN; RHEIN; SANTOS, 2012). Momentos antes das leituras, o aparelho foi calibrado e, posicionando a câmara na parte adaxial do limbo foliar, foram realizadas as leituras;
- d) Matéria seca: a parte aérea e o sistema radicular foram secos em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura de 70°C por 72 h, e posteriormente pesados em balança analítica de alta precisão. O peso da matéria seca da raiz, de cada anel, foi transformado em porcentagem do total do peso do sistema radicular na coluna, para a avaliação da produção de biomassa em diferentes saturações por Al;

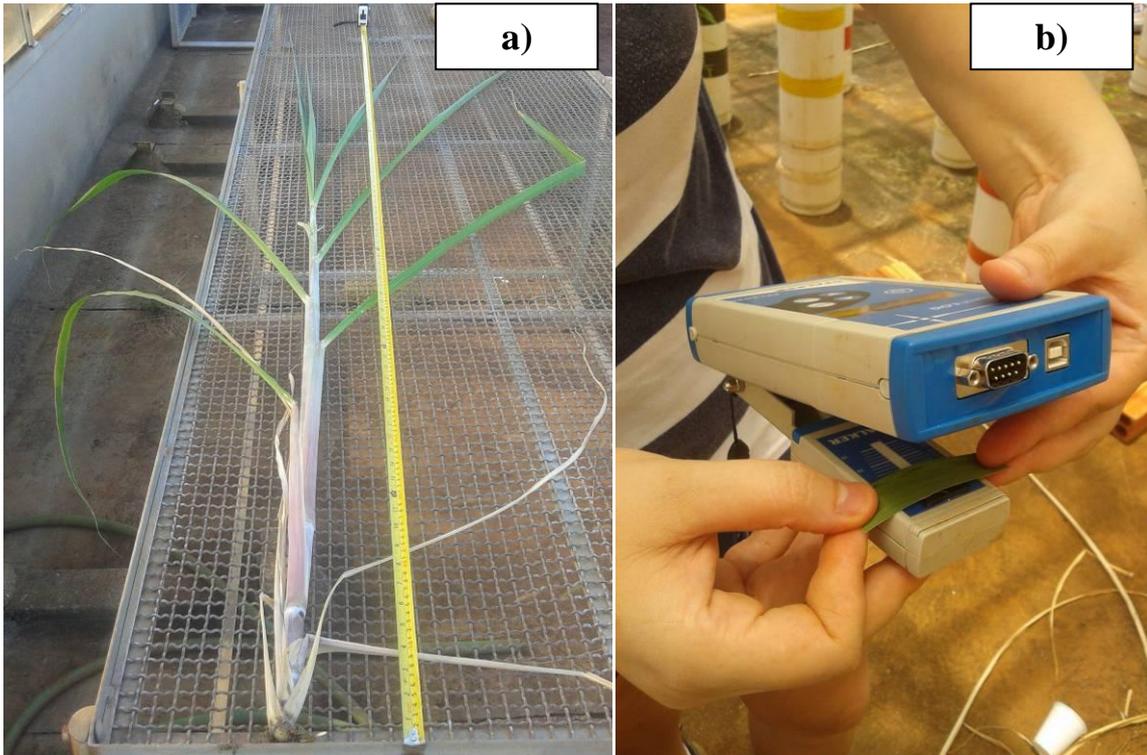


Figura 15. a) Determinação da altura das variedades de cana-de-açúcar. b) Determinação do teor de clorofila foliar.

- e) Índice de tolerância: a sensibilidade das variedades de cana-de-açúcar quanto aos níveis de saturação por Al, foi quantificada pela relação (crescimento com Al/crescimento sem Al) *100 (CAMBRAIA et al., 1991). O índice de tolerância calculado levou em conta o teor de matéria seca do sistema radicular das variedades de cana-de-açúcar, na profundidade de 40 a 80 cm, uma vez que o índice de saturação por alumínio nessa profundidade é considerado tóxico para a cultura (SOBRAL; GUIMARÃES, 1992). O teor de matéria seca do sistema radicular, na profundidade de 40 a 80 cm, das colunas controle ($m\%=0,7$), foi adotado como o valor para o crescimento sem Al.

3.5.2 Caracterização química do solo

A amostragem do solo foi realizada por meio uma minissonda de aço inox, que permitiu a retirada de quantidades uniformes de solo de cada anel, com mínimo de dano possível às raízes. Posteriormente, as amostras foram submetidas à caracterização química e para avaliar o efeito da aplicação de vinhaça nos atributos químicos do solo.

3.6 Forma de análise dos resultados

Para análise estatística, os resultados dos parâmetros biométricos das variedades de cana-de-açúcar e os resultados dos parâmetros químicos do solo foram submetidos a análise de variância. Uma vez que o teste F foi considerado significativo, os resultados foram desdobrados e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade, utilizando o programa ASSISTAT versão 7.7 beta.

Com a finalidade de eliminar a ambiguidade demonstrada pelo Teste de Tukey, em alguns resultados, foi aplicado o teste de Scott-Knott. O teste de Scott-Knott, baseado em análise de agrupamento univariada, tem por objetivo separar as médias de tratamentos em grupos homogêneos, através da minimização da variação dentro do grupo e maximização da variação entre grupos (SANTOS, 2000),

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Vinhaça

Os elevados valores de DQO (Demanda Química de Oxigênio) e de DBO₅ (Demanda Biológica de Oxigênio) (Tabela 10) foram compatíveis com a alta carga orgânica, demonstrada pela vinhaça. Segundo Freire e Cortez (2000), a DBO deste efluente pode variar entre 12.000 e 22.000 mg O₂ L⁻¹. A DQO (Tabela 10) foi maior do que 31.500 mg O₂ L⁻¹, valor apontado por Elia Neto e Zotelli (2008) como típico de vinhaças produzidas por usinas paulistas, e esteve próxima de 65.000 mg O₂ L⁻¹, valor discriminativo de vinhaças produzidas a partir de mosto de melão (CETESB, 1982).

A vinhaça apresentou teor de K (Tabela 10), expresso em K₂O, mais elevado do que o normalmente relatado, cujos teores médios podem variar de 2,0 kg m⁻³ (ELIA NETO; NAKAHODO, 1995) a 2,6 kg m⁻³ (ELIA NETO; ZOTELLI, 2008) em vinhaças produzidas por usinas do Estado de São Paulo. Entretanto, ELIA NETO; SHINTAKU; DONZELLI, (2009) verificaram valores extremos de K₂O na vinhaça, que podem alcançar 7,6 kg m⁻³. Variações nos teores de K₂O da vinhaça também podem estar associadas ao tipo de mosto. Vinhaças de mosto de melão, de caldo ou misto (utilizada no trabalho) podem conter 3,5-7,8 kg m⁻³, 1,0-2,1 kg m⁻³ e 2,1-4,6 kg m⁻³ de K₂O, respectivamente (CETESB, 1982; GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1983; ORLANDO FILHO; LEME, 1984).

O teor de sulfato (Tabela 10) foi peculiar da vinhaça e corroborou resultados médios encontrados por Elia Neto e Nakahodo (1995) e por Rossetto et al. (2010). Os teores de micronutrientes foram superiores aos encontrados na literatura (VITTI, QUEIROZ; QUINTINO, 2005; ELIA NETO; SHINTAKU; DONZELLI, 2009).

Tabela 10. Caracterização físico-química da vinhaça *in natura* coletada para o experimento, de acordo com a norma CETESB P4.231/2006.

Parâmetro	Unidade	Valor
pH (a 22,8 °C)	----	4,06
Condutividade Elétrica (CE)	$\mu\text{S cm}^{-1}$	5.390
Potássio (K_2O)	kg m^{-3}	4,8
SST ¹		3.980,0
Dureza Total Efluente		1.619,9
Nitrato ²		0,643
Nitrito		0,115
Nitrogênio Amoniacal		7,54
Nitrogênio Kjeldhal		14,66
Sódio	mg L^{-1}	14,66
Cálcio		398,6
Magnésio		151,68
Sulfato		1.794,62
Fosfato total		10,74
DBO ₅ ³		23.660,0
DQO ⁴		59.150
Cobre		30,0
Ferro		581,0
Manganês	g m^{-3}	313,0
Zinco		54,2

¹Sólidos Suspensos Totais (Resíduo não filtrável total); ²Análise por cromatografia de troca iônica; ³Demanda Bioquímica de Oxigênio em 5 dias; ⁴Demanda Química de Oxigênio.

Os tratamentos com aplicação de vinhaça dispensaram a adição de K na adubação de cobertura, já que o teor de K_2O presente na vinhaça foi suficiente para a necessidade das plantas de cana-de-açúcar (RAIJ et al., 1996). A vinhaça, na maioria das vezes, elimina a necessidade da utilização de fertilizantes potássicos (WALL et al., 2009), principalmente quando os teores de K_2O estão acima da média (Tabela 9).

4.2 Variedades de cana-de-açúcar

4.2.1. Índice de clorofila foliar

A análise de variância indicou não existir influência dos fatores variedades de cana-de-açúcar, vinhaça e gradiente de saturação por alumínio nos teores de clorofila das plantas (Tabela 11).

Tabela 11. Análise de variância (ANOVA) do índice de clorofila foliar de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Causas de variação	Graus de liberdade	F
Variedades (Va)	2	0,8472 ns
Vinhaça (Vi)	1	0,8932 ns
Gradiente de saturação por Al (S)	1	0,3963 ns
Interação Va x Vi	2	0,3456 ns
Interação Va x S	2	1,4385 ns
Interação Vi x S	1	0,2634 ns
Interação Va x Vi x S	2	0,9315 ns
Tratamentos	11	0,7889 ns
Resíduo	24	
Total	35	

ns: não significativo ($p \geq 0,05$)

Os valores do Índice de Clorofila Foliar Total (ICF), determinados pelo ClorofiLOG® nas folhas das variedades de cana-de-açúcar, encontram-se na Tabela 12. Benett et al. (2011), avaliando o efeito de doses e fontes de manganês em cana-de-açúcar, variedade RB867515, obteve valores de ICF próximos aos encontrados nesse trabalho, utilizando clorofilômetro portátil. Aos 131 dias após o plantio, o valor encontrado por estes autores foi de 37,7.

Carlin, Rhein e Santos (2012), determinando o teor de clorofila em plantas jovens de cana-de-açúcar (variedade IAC91-5155) por métodos laboratoriais, verificaram que os teores deste pigmento foram considerados indicadores dos efeitos isolados de deficiência hídrica ou de toxidez por Al do solo.

Tabela 12. Índice de Clorofila Foliar Total ($a+b$) em folhas de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Variedade	Vinhaça	Gradiente de saturação por alumínio (m%)	
		Com	Sem*
RB855453	Presença	36,5	40,4
RB855453	Ausência	39,0	41,6
RB966928	Presença	33,2	37,3
RB966928	Ausência	36,8	39,6
RB867515	Presença	41,0	33,5
RB867515	Ausência	36,4	37,5

*Colunas testemunhas, com m% em valor não tóxico para cana-de-açúcar.

Para as condições em que foi desenvolvido este estudo, o teor de clorofila não foi um parâmetro eficiente para indicar o estresse causado pela toxidez por Al no desenvolvimento inicial de variedades de cana-de-açúcar. A ineficiência do ICF para sinalizar o estresse por Al pode estar associada ao método empregado, uma vez que o uso de clorofilômetros constitui um método indireto para determinação do teor de clorofila. Foi observada ampla variação nos valores de ICF fornecidos pelo equipamento durante as leituras. Ao posicionar o tecido vegetal sob a câmara de medição, é necessário fechar o aparelho para que a leitura seja realizada. A variação na intensidade da força, empregada entre uma medida e outra, acarreta alteração nos valores.

4.2.2. Biometria

4.2.2.1. Parte Aérea

A avaliação de variáveis morfológicas das plantas, tais como a altura e o diâmetro, torna possível à identificação da capacidade produtiva da cultura e permite a análise dos efeitos do manejo cultural adotado sobre a variedade (OLIVEIRA et al., 2010; KNOX et al., 2010; SILVA et al., 2012). A análise de variância indicou que os fatores variedades e vinhaça influenciaram significativamente as variações no diâmetro do colmo dos genótipos de cana-de-açúcar submetidos ao estresse gradual por Al do solo (Tabela 13).

Tabela 13. Análise de variância (ANOVA) do diâmetro do colmo (mm) de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Causas de variação	Graus de liberdade	F
Variedades (Va)	2	12,5616 **
Vinhaça (Vi)	1	21,9895 **
Interação Va x Vi	2	2,5972 ns
Tratamentos	5	10,4614 **
Resíduo	12	
Total	17	

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); ns: não significativo ($p \geq 0,05$).

A avaliação de parâmetros biométricos em plantas sob condições ideais permite conhecer características particulares dos genótipos, que estão associadas ao seu potencial genético. Cultivadas em colunas completamente preenchidas com solo corrigido, ou seja,

praticamente na ausência de saturação por Al, plantas da variedade RB867515 apresentaram diâmetro do colmo estatisticamente semelhante à variedade RB855453 (Figura 16).

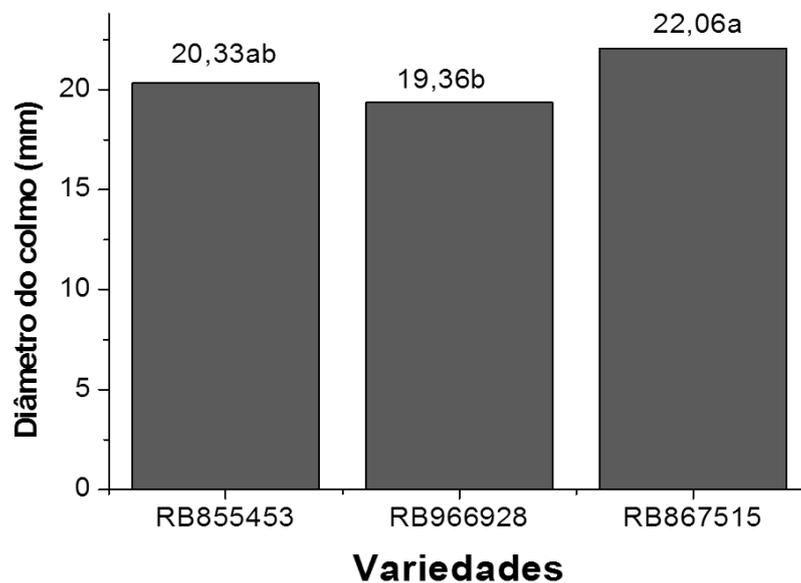


Figura 16. Diâmetro do colmo (mm) de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, corrigido, sem gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça (Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ao nível de 5%).

Quando exposta a um gradiente de saturação por Al, a variedade RB867515 apresentou colmo com diâmetro superior ao das outras variedades testadas (Tabela 14), evidenciando que trata-se de uma característica desse genótipo que pode ser influenciada pelo estresse pelo Al do solo. Corroborando esse resultado, Oliveira et al., (2010) avaliando em onze variedades de cana-de-açúcar (SP79-1011, RB813804, RB863129, RB872552, RB943365, RB72454, RB763710, SP78-4764, SP81-3250, RB867515, RB92579) cultivadas sob irrigação plena, o crescimento e a produção de matéria seca no ciclo de cana planta, em um ARGISSOLO AMARELO distrófico abrupto, constatou que, 360 dias após o plantio, a variedade RB867515 também apresentou maior diâmetro de colmo (27 mm).

Tabela 14. Diâmetro do colmo (mm) de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Variedades	Diâmetro do colmo (mm)
RB855453	19,33 b
RB966928	18,75 b
RB867515	20,82 a

DMS=1,13 CV%=3,77

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo Teste de Tukey ao nível de 5%.

A formação da produtividade de cana-de-açúcar, expressa em tonelada de cana por hectare (TCH), ocorre em função dos atributos biométricos altura de colmos, número de perfilhos e diâmetro de colmos, os quais são determinantes para a expressão do potencial agrícola (LANDELL et al., 2005). Além disso, o colmo é a parte utilizada na indústria, devido ao acúmulo de sacarose.

A aplicação de vinhaça proporcionou aumento significativo no diâmetro do colmo das variedades de cana-de-açúcar, mesmo sob condições de estresse crescente por Al (Figura 17). Magalhães (2010), testando doses de vinhaça no ciclo de cana-planta das variedades RB855453 e SP801816, constatou que, a partir da aplicação de 240 m³ ha⁻¹ do efluente, houve aumento no diâmetro dos colmos, refletindo em acréscimo de produtividade.

Silva, Bono e Pereira (2014), avaliaram o efeito da aplicação de vinhaça na produtividade de colmos de cana-de-açúcar, durante três anos, e obtiveram valores de incremento máximo de 7, 10 e 15 t ha⁻¹ de produtividade, para plantas de 1^a, 2^a e 3^a socas, respectivamente.

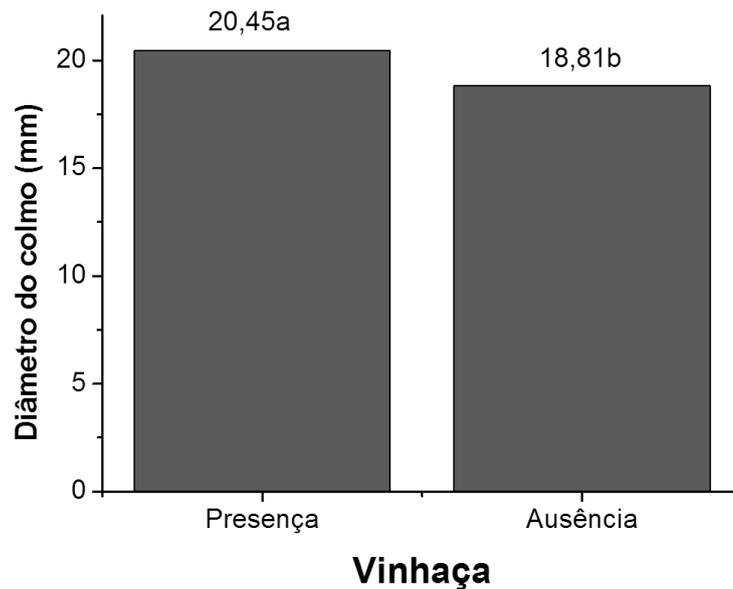


Figura 17. Diâmetro do colmo (mm) de variedades cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça. (Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ao nível de 5%).

Embora a interação “Variedades x Vinhaça” não tenha sido significativa, é possível observar ligeiro aumento no diâmetro do colmo das variedades de cana-de-açúcar, com aplicação de vinhaça, em solo sob estresse gradual de Al (Tabela 15). Independente da aplicação de vinhaça, a variedade RB867515 obteve colmos com maior diâmetro.

A aplicação de vinhaça não teve efeito significativo sobre o diâmetro dos colmos das variedades de cana-de-açúcar nas colunas controle (Tabela 16). Logo, há indicativos de que respostas da cana-de-açúcar à aplicação de vinhaça ocorrem em solos com maiores restrições em termos de fertilidade, como o baixo teor de nutrientes, baixo pH e maior saturação por Al (Figura 17).

Tabela 15. Diâmetro do colmo (mm) variedades de cana-de-açúcar a partir da interação* "Variedades x Vinhaça" cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al.

Variedades	Diâmetro do colmo (mm)	
	Com vinhaça	Sem vinhaça
RB855453	20,1	18,6
RB966928	19,1	18,4
RB867515	22,2	19,5
CV%=3,77		

*Não foi aplicado o teste de comparação de médias por que o F da análise de variância não foi significativo para fatores e interação.

Tabela 16. Análise de variância (ANOVA) do diâmetro do colmo (mm) de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, corrigido, sem gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Causas de variação	Graus de liberdade	F
Variedades (Va)	2	4,1904 *
Vinhaça (Vi)	1	0,1997 ns
Interação Va x Vi	2	2,9856 ns
Tratamentos	5	2,9103 ns
Resíduo	12	
Total	17	

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ns não significativo ($p \geq 0,05$).

Em solo corrigido o diâmetro do colmo das variedades de cana-de-açúcar não sofreu grandes variações com aplicação de vinhaça. Entretanto, mesmo sem significância estatística, é possível notar o maior diâmetro (23,1 mm) obtido pela RB867515, na ausência de vinhaça (Tabela 17).

Tabela 17. Diâmetro do colmo (mm) de variedades de cana-de-açúcar a partir da interação* “Variedades x Vinhaça” cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, corrigido, sem gradiente de saturação por Al.

Variedades	Diâmetro do colmo (mm)	
	Com vinhaça	Sem vinhaça
RB855453	20,7	19,9
RB966928	20,5	18,2
RB867515	21,0	23,1
CV%=2,8		

*Não foi aplicado o teste de comparação de médias por que o F da análise de variância não foi significativo para fatores e interação.

A aplicação da vinhaça também promoveu diferenças significativas na altura média das variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob condições de estresse gradativo por Al do solo (Figura 18). Ao contrário do diâmetro de colmo (Tabela 13), a altura média (Tabela 18) não foi influenciada pelo fator variedades.

Tabela 18. Análise de variância (ANOVA) da altura média (m) de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetidas à aplicação de vinhaça.

Causas de variação	Graus de liberdade	F
Variedades (Va)	2	0,5106 ns
Vinhaça (Vi)	1	7,7326 *
Interação Va x Vi	2	0,9407 ns
Tratamentos	5	2,1270 ns
Resíduo	12	
Total	17	

* significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$); ns:não significativo ($p \geq 0,05$).

A altura média das plantas submetidas à aplicação de vinhaça foi estatisticamente superior (Figura 18), evidenciando o caráter fertilizante desse resíduo, no crescimento inicial de cana-de-açúcar. Nobile et al. (2011), avaliando o efeito de diferentes fontes de nutrientes na variedade RB855536 de cana-de-açúcar. Aos 240 dias após o plantio, obtiveram a altura máxima de 2,79 m, utilizando adubação mineral, composta por calcário, nitrato de cálcio, superfostato simples e cloreto de potássio, em quantidades definidas de acordo com RAIJ et al. (1997). Segundo Magalhães (2010), a aplicação de vinhaça também resultou em plantas com maior altura, sendo as maiores médias obtidas com as dosagens de 240 e 420 m³ ha⁻¹.

As variedades de cana-de-açúcar assim como a interação entre variedades e vinhaça não influenciaram significativamente a altura média das plantas. É possível notar que as variedades de cana-de-açúcar apresentaram comportamento similar em função da aplicação de vinhaça, e não ocorreram grandes variações entre as variedades (Tabela 19).

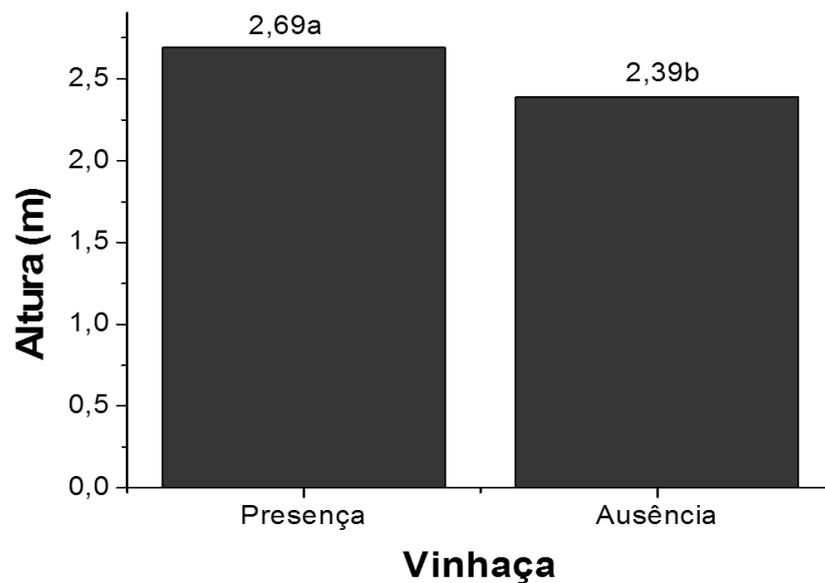


Figura 18. Altura média (m) de variedades cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com gradiente de saturação por Al e submetido á aplicação de vinhaça. (Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo Teste de Tukey ao nível de 5%).

O K, presente na vinhaça (Tabela 10), pode ter proporcionado o aumento na altura e diâmetro dos colmos das variedades de cana-de-açúcar, uma vez que, além de ser o nutriente mais absorvido pela cana-de-açúcar (MALAVOLTA, 1994; OTTO; VITTI; LUZ, 2010), desempenha diversas funções, como regulação da turgidez do tecido, ativação enzimática, abertura e fechamento de estômatos, transporte de carboidratos e transpiração (MALAVAOLTA, 1980; FLORES et al., 2012; HAWKESFORD et al., 2012). Da mesma forma, o ferro e mangânes, micronutrientes mais extraídos e exportados pela cultura da cana-de-açúcar (ORLANDO FILHO, 1993) também podem ter contribuído para esse incremento em altura e diâmetro do colmo, uma vez que estavam presentes em maior proporção na vinhaça (Tabela 10), em relação aos demais micronutrientes

Tabela 19. Altura média (m) de variedades cana-de-açúcar a partir da interação* “Variedade x Vinhaça” cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al.

Variedades	Altura média (m)	
	Com vinhaça	Sem vinhaça
RB855453	2,6	2,5
RB966928	2,7	2,3
RB867515	2,8	2,4
CV%= 9,14		

*Não foi aplicado o teste de comparação de médias por que o F da análise de variância não foi significativo para fatores e interação.

.

Em relação à matéria seca da parte área (MSPA), a análise de variância mostrou que o F não foi significativo para os fatores variedades e vinhaça (Tabela 20).

Tabela 20. Análise de variância (ANOVA) da matéria seca da parte aérea (MSPA) (g) de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Causas de variação	Graus de liberdade	F
Variedades (Va)	2	0,3733 ns
Vinhaça (Vi)	1	3,8161 ns
Interação Va x Vi	2	0,2518 ns
Tratamentos	5	1,0133 ns
Resíduo	12	
Total	17	

ns:não significativo ($p \geq 0,05$).

Apesar da ausência de significância estatística, atribuída ao elevado coeficiente de variação, observou-se que a aplicação de vinhaça proporcionou maior acúmulo de matéria seca pela parte aérea das plantas de cana-de-açúcar (Tabela 21).

Tabela 21. Matéria seca da parte aérea (MSPA) (g) de variedades de cana-de-açúcar a partir da interação* “Variedades x Vinhaça” cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por alumínio.

Variedades	Matéria seca da parte aérea (g)	
	Com vinhaça	Sem vinhaça
RB855453	100,73	81,26
RB966928	111,23	74,8
RB867515	111,46	94,93
CV%=27,4		

* Não foi aplicado o teste de comparação de médias por que o F da análise de variância não foi significativo para fatores e interação.

Holanda (2012), estudando o desenvolvimento inicial de quatro variedades de cana-de-açúcar (RB855453, RB92579, RB965902 e RB965917) sob diferentes níveis de deficiência hídrica, também não encontrou diferença estatística em relação à matéria seca da parte aérea entre as variedades.

Gonzaga (2012), avaliando os efeitos de espécies de bactérias endofíticas sobre a tolerância ao déficit hídrico no crescimento inicial de cana-de-açúcar, encontrou valores superiores de matéria seca da parte aérea da variedade RB867515 de cana-de-açúcar, aos 114 dias após o plantio, que variaram de 120,00 g a 160,00 g.

Observou-se que a altura da planta e o acúmulo de matéria seca não foram parâmetros da parte aérea capazes de diferenciar variedades de cana-de-açúcar quanto à variação da

saturação por Al do solo. Souza et al. (2000), buscando identificar alterações morfológicas nos genótipos de milho, em resposta a toxidez por Al sob condições de campo, concluíram que o diâmetro do colmo, a área foliar, a matéria seca de raiz, a matéria seca de parte aérea e a matéria seca total foram características que não puderam ser empregadas para diferenciação genotípica quanto à sensibilidade ao Al tóxico do solo.

O Al acumula-se preferencialmente no sistema radicular, sendo pequenas quantidades de Al transportadas para a parte aérea das plantas, em decorrência de reações de precipitação do Al com ânions na raiz (MASSOT; POSCHENRIEDER; BARCELÓ, 1992). Dessa forma, a grande maioria das culturas anuais de interesse econômico, não possui habilidade de acumular Al na parte aérea (ROSSIELLO; JACOB NETTO, 2006). Assim, é de se esperar que atributos da parte aérea não sejam afetados diretamente pela presença do Al nos tecidos.

Os melhores indicadores da variabilidade genotípica para a tolerância ao Al tóxico são aqueles ligados às raízes (FERREIRA et al., 2006), ou outros atributos da parte aérea que se mostrem sensíveis a presença desse elemento no solo. Carlin e Santos (2009), investigando indicadores fisiológicos da interação entre déficit hídrico e acidez do solo, por meio da avaliação dos teores de solutos e do crescimento inicial de plantas jovens de cana-de-açúcar, variedade IAC91-5155, observaram que a produção de matéria seca dos colmos foi um parâmetro sensível à acidez do solo, diferentemente da produção de matéria seca de folhas, que não foi significativa em relação a esse estresse.

Parâmetros ligados à fluorescência da clorofila *a* se mostraram eficientes para avaliar o efeito do estresse hídrico e de diferentes níveis de alumínio no solo em plantas jovens de duas variedades de cana-de-açúcar (RB855536 e RB867515) sob condições controladas (ECCO; SANTIAGO; LIMA, 2013).

4.2.2.2. Sistema Radicular

A análise de variância indicou que as variedades de cana-de-açúcar e a aplicação de vinhaça proporcionaram efeitos significativos sobre a matéria seca total do sistema radicular (MSTSR). A interação “Variedades x Vinhaça” também foi significativa sobre a quantidade de MSTSR (Tabela 22).

Tabela 22. Análise de variância (ANOVA) da matéria seca total do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Causas de variação	Graus de liberdade	F
Variedades (Va)	2	20,9133 **
Vinhaça (Vi)	1	4,9428 *
Interação Va x Vi	2	13,4366 **
Tratamentos	5	14,7285 **
Resíduo	12	
Total	17	

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$) ; * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$).

A MSTSR da variedade de cana-de-açúcar RB855453 aumentou significativamente com a aplicação de vinhaça, não diferindo estatisticamente da variedade RB864715. Entretanto, sem o aporte desse resíduo, a variedade RB867515 apresentou maior valor de MSTSR. A presença ou ausência de vinhaça não influenciaram a MSTSR da variedade RB966928 (Tabela 23).

O aporte de vinhaça reduziu o teor de MSTSR da variedade de cana-de-açúcar RB867515. Entretanto, para a variedade RB855453, o efeito foi oposto. Esse resultado pode

ser atribuído ao nível de exigência, em termos de ambiente de produção, apresentado pelas variedades. A variedade RB867515, que apresenta média exigência em termos de ambiente de produção (RIDESA, 2010), não respondeu à adição da vinhaça, enquanto a variedade RB855453, com alta exigência, teve resposta positiva à aplicação de vinhaça, obtendo aumento significativo na MSTSR. O desenvolvimento radicular, assim como a quantidade de raízes, pode ser diferente em função do genótipo de cana-de-açúcar (HUMBERT, 1968; VASCONCELOS, 1998; VASCONCELOS; GARCIA, 2005).

Tabela 23. Matéria seca total do sistema radicular (g) a partir da interação "Variedades x Vinhaça" em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Variedades	Matéria seca total do sistema radicular (g)	
	Com vinhaça	Sem vinhaça
RB855453	38,3 Aa	30,5 bB
RB966928	29,5 Ba	33,6 bA
RB867515	37,6 Ab	54,0 aA

CV%=10,8

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem pelo Teste de Scott-Knott a 5%

A quantidade de matéria seca total do sistema radicular da variedade de cana-de-açúcar RB867515, em solo sem aplicação de vinhaça, foi superior às das demais variedades. Provavelmente, ao ser cultivada em solos com elevados teores de Al e baixos teores de cátions, a RB867515 apresenta melhor desenvolvimento em relação às variedades RB855453 e RB966928 (Tabela 23).

Avaliando a matéria seca estratificada do sistema radicular (quantidade de matéria seca (g) em cada profundidade) as variedades de cana-de-açúcar, as profundidades e a

vinhaça, assim como as interações entre esses fatores, foram fatores que influenciaram significativamente a matéria seca do sistema radicular nas variedades testadas, quando submetidas ou não a aplicação de vinhaça (Tabela 24).

Tabela 24. Resumo da análise de variância (ANOVA) da matéria seca do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Causas de variação	Graus de liberdade	F
Variedades (Va)	2	27,3062**
Vinhaça (Vi)	1	6,4673 *
Profundidades (P)	3	249,6103**
Interação Va x Vi	2	17,5692**
Interação Va x P	6	16,5659**
Interação Vi x P	3	4,7190**
Interação Va x Vi x P	6	15,9921**
Tratamentos	23	45,8501**
Resíduo	48	
Total	71	

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$); * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$).

Na profundidade de 0 a 20 cm, com a aplicação de vinhaça, a variedade de cana-de-açúcar RB855453 apresentou maior teor de matéria seca em relação às outras variedades. Entretanto, na profundidade de 20 a 40 cm, o teor de MSSR da variedade RB855453, com vinhaça, não se diferenciou das variedades RB867515 e RB966928, ambas sem o aporte de vinhaça (Tabela 25). Nas profundidades de 60 a 80 cm, com aplicação de vinhaça, a variedade

RB855453 acumulou o menor teor de matéria seca quando comparada com as demais variedades, evidenciando que os altos índices de saturação por alumínio (40,8 e 62,6%) causaram redução nesse parâmetro. Sem aplicação de vinhaça, as médias de MSSR das variedades RB966928 e RB855453 foram estatisticamente iguais.

A variedade RB867515, na profundidade de 60 a 80 cm e sem aplicação de vinhaça, apresentou teor de matéria seca do sistema radicular superior aos das variedades RB966928 e RB855453. A variedade RB867515 foi a única a acumular MSSR sem diferença significativa nas profundidades de 0 a 20 cm e de 60 a 80 cm. Essa característica pode estar associada à sua rusticidade e adaptação a ambientes de médio potencial de produção. O aumento da quantidade de raízes em profundidade é importante para garantir o desenvolvimento da cultura, uma vez que raízes mais profundas dão melhor sustentação e contribuem para a absorção de água e nutrientes, principalmente sob condições de estresse (GAVA et al.,2001). Em relação à distribuição do sistema radicular das variedades de cana-de-açúcar no perfil do solo, independentemente da presença ou da ausência de vinhaça, notou-se que a maior quantidade de raízes se encontrou na camada de 0 a 20 cm. Entretanto, na variedade RB867515, com a aplicação de vinhaça, a matéria seca das raízes na profundidade de 60 a 80 não apresentou diferença estatística daquela acumulada na profundidade de 0 a 20 cm (Tabela 25).

A aplicação de vinhaça proporcionou distribuição decrescente do sistema radicular ao longo do perfil do solo para a variedade RB855453, entretanto a variedade RB966928 apresentou redução no teor de matéria seca na profundidade de 40 a 60 cm, seguido de um acréscimo no teor de raízes na profundidade de 60 a 80 cm (Tabela 25), para a variedade RB867515, não foi observado um padrão de distribuição. Medina et al. (2000), avaliando o sistema radicular da variedade IAC58-480 de cana-de-açúcar em função da aplicação de gesso e calcário, associada ou não à vinhaça, concluíram após a colheita da 3ª soca que a aplicação

de 45 m³ ha⁻¹ de vinhaça resultou em maior porcentagem média de raízes na profundidade de 0,0 a 0,50 m.

Tabela 25. Matéria seca do sistema radicular (g) da interação "Variedades x Vinhaça x Profundidades" em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Variedades	Profundidade (cm)			
	0-20	20-40	40-60	60-80
Com vinhaça				
RB855453	25,0 aA	8,6 aB	3,7 cC	1,0 cC
RB966928	14,3 cA	5,3 bB	2,7 cC	7,1 bB
RB867515	18,3 bA	4,7 bC	8,8 aB	5,7 bC
Sem vinhaça				
RB855453	19,7 bA	4,4 bB	2,7 cB	3,7 cB
RB966928	18,6 bA	7,7 aB	5,2 bB	2,1 cC
RB867515	18,7 bA	11,0 aB	6,0 bC	18,3 aA
CV%=19,0				

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem pelo Teste de Scott-Knott a 5%.

Os níveis de saturação por Al que causaram maior redução na quantidade de matéria seca do sistema radicular, em solo com aplicação de vinhaça, foram: m% = 40,8 e 62,6 % (variedade RB855453) e m% = 40,8 (variedade RB966928). Entretanto, sem aplicação de vinhaça, estes níveis foram: m% = 7,9, 40,8 e 62,6 (variedade RB855453) e m% = 62,6 (variedade RB966928).

A variedade RB855453 apresentou comportamento já relatado em referências bibliográficas em relação à distribuição do sistema radicular ao longo do perfil do solo

(SAMPAIO; SALCEDO; CAVALCANTI, 1987; BALL-COELHO et al., 1992; ALVAREZ; CASTRO; NOGUEIRA, 2000). Mais do que 60% de suas raízes estiveram confinadas na camada superficial, independentemente da aplicação de vinhaça (Figura 19).

Otto et al. (2009), avaliando a massa, a distribuição e a atividade metabólica de raízes da variedade SP81 3250 de cana-de-açúcar, em função da adubação nitrogenada de plantio, em LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico textura média, concluíram que 65% das raízes concentraram-se na camada até 0,2 m. Em estudo da quantificação de raízes metabolicamente ativas da cana-de-açúcar, Faroni e Trivelin (2006) encontraram mais de 90% de raízes nas camadas 0 a 0,2 m e 0,2 a 0,4 m de profundidade de um perfil de LATOSSOLO VERMELHO distrófico.

A variedade de cana-de-açúcar RB966928 apresentou 83,8% do sistema radicular concentrados na camada de 0 a 40 cm, em solo sem aplicação de vinhaça. Entretanto, quando houve a aplicação de vinhaça, a porcentagem de raízes nessa camada foi de 66,5 %. O contrário foi observado para a variedade RB867515, em que a porcentagem de raízes na camada de 0 a 40 cm, com aplicação de vinhaça, foi maior (61,4%), comparada à ausência de vinhaça (54,9%). A variedade RB855453 teve comportamento semelhante à variedade RB867515 em relação à concentração de raízes na camada de 0 a 40 cm, estando 87,7% do seu sistema radicular nessa camada, com aplicação de vinhaça (Figura 19).

Vasconcelos (1998), avaliando o desenvolvimento radicular de variedades de cana-de-açúcar em LATOSSOLO VERMELHO com caráter álico, em ciclo de cana-planta, obteve a distribuição do sistema radicular das variedades IAC87-3396, RB72454, SP80-1842 e RB855536 aos 16,5 meses de idade. A maior porcentagem de raízes estava concentrada na profundidade de 0 a 20 cm. A variedade que apresentou maior percentual de raízes na profundidade de 60 a 80 cm foi a RB72454 (VASCONCELOS, 1998), com baixa exigência em fertilidade do solo (RIDESA, 2010).

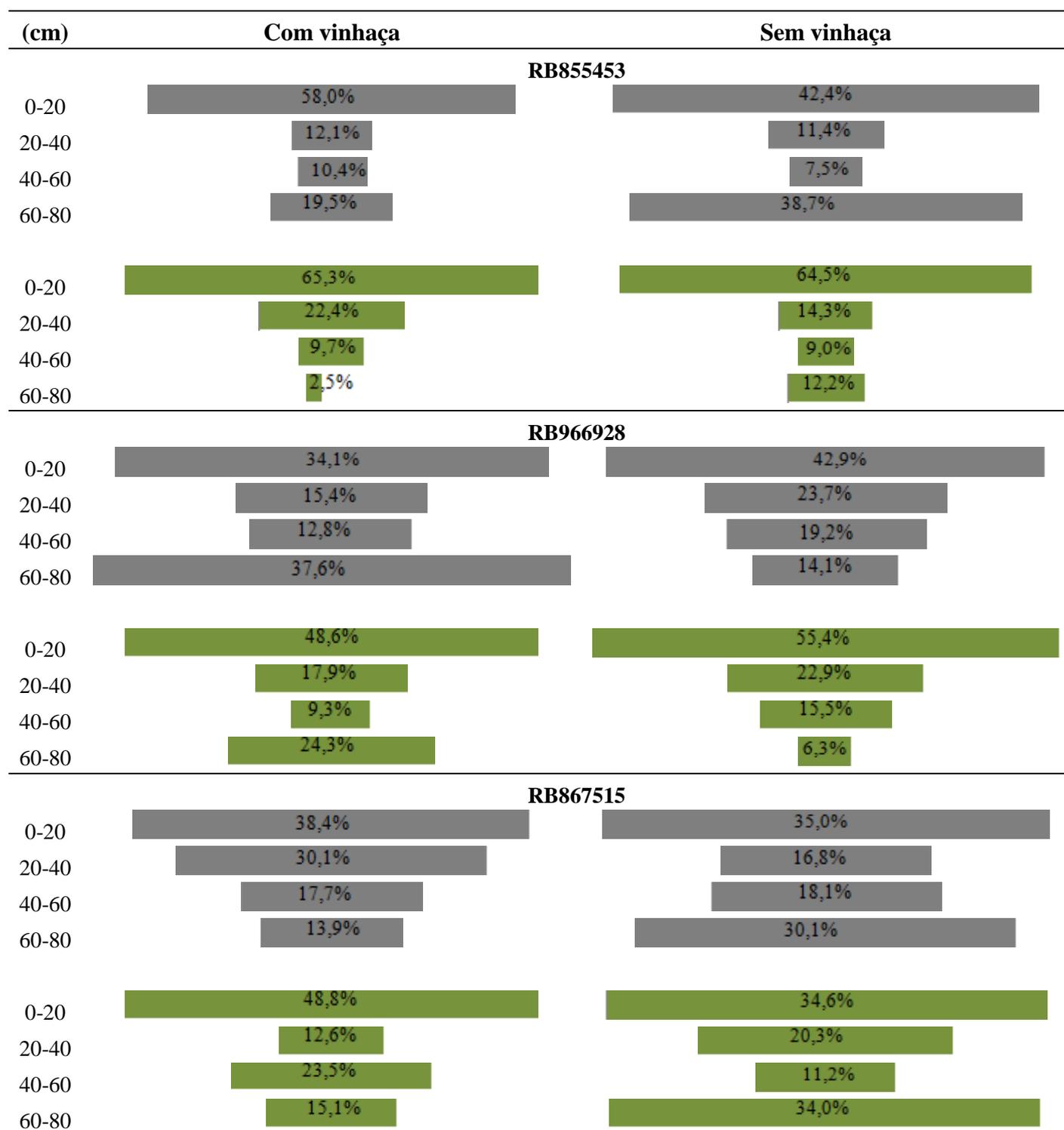


Figura 19. Distribuição do sistema radicular de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, na presença e na ausência de vinhaça; ■ solo corrigido, sem gradiente de saturação por Al; ■ solo com gradiente de saturação por Al.

As saturações por Al de 40,8 e 62,6 %, encontradas respectivamente nas profundidades de 40 a 60 e de 60 a 80 cm, foram classificadas em relação ao grau de toxidez para a cana-de-açúcar como alta (40,8%) e muito alta (62,6%) (SOBRAL; GUIMARÃES, 1992). A variedade RB867515 apresentou maior porcentagem de raízes nessas profundidades, sendo 45,2% no solo sem aplicação de vinhaça e 38,6% com aporte de vinhaça, e foi considerada menos sensível à presença de alumínio em níveis tóxicos no solo.

Korndörfer, Primavesi e Deuber (1989) avaliaram a distribuição dos sistemas radiculares de cana-planta e de cana-soca (variedades SP70-1143, SP71-799, SP71-6163, NA56-79 e RB72-5828) em um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO álico, concluindo, em cana-planta, que 89 a 92% das raízes se situaram nos primeiros 0,30 m, e, em cana-soca, que 85 a 92% das raízes se situaram nos primeiros 0,40 m, não sendo observadas diferenças significativas entre as variedades. Entretanto, quando cultivadas em um LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, corrigido e em condições ideais para o desenvolvimento da cana-de-açúcar ($V\% = 58,7$ e $m\% = 0,7$), as variedades de cana-de-açúcar utilizadas nesse trabalho demonstraram melhor distribuição das raízes ao longo do perfil do solo (Figura 19).

Em solo corrigido, sem gradiente de saturação por Al, as variedades de cana-de-açúcar tiveram aumento na porcentagem de matéria seca do sistema radicular na profundidade de 60 a 80 cm, com exceção da variedade RB966928, sem aplicação de vinhaça, e da variedade RB867515, submetida à aplicação de vinhaça, que demonstraram crescimento radicular decrescente ao longo do perfil do solo (Figura 19).

Para a variedade RB855453, sem aplicação de vinhaça, a porcentagem de raízes nas profundidades 20 a 40 e 40 a 60 cm foi inferior à quantidade de raízes concentrada na profundidade 60 a 80 cm, apontando que a baixa fertilidade do solo, devido ao gradiente se

saturação por Al, foi uma limitação para o desenvolvimento radicular em maior profundidade (Figura 19).

4.2.2.2.1. Índice de Tolerância

A aplicação de vinhaça influenciou o índice de tolerância das variedades de cana-de-açúcar (Tabela 26). De acordo com o índice de tolerância, as variedades de cana-de-açúcar cultivadas com aplicação de vinhaça, foram classificadas na seguinte ordem: RB867515 > RB855453 > RB 966928. Porém, sem aplicação de vinhaça, a ordem de classificação foi: RB867515 > RB 966928 > RB855453.

Tabela 26. Índice de tolerância ao alumínio de variedades de cana-de-açúcar cultivadas em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Variedades	Sem vinhaça	Com vinhaça
RB855453	35,5%	55,9%
RB966928	66,4%	46,7%
RB867515	71,3%	81,9%

Independente da aplicação de vinhaça, a variedade RB867515 apresentou maior tolerância ao Al do que as variedades RB855453 e RB966928, discordando dos resultados encontrados por Oliveira (2012) que, utilizando a Taxa de Alongamento Radicular (TAR) como parâmetro para avaliar as variedades de cana-de-açúcar quanto à tolerância ao Al em solução, em condições de laboratório, obteve a seguinte classificação: RB928064 > RB935744 > RB855453 = RB966928 > RB925345 = RB867515 > SP813250 > RB855156 >

RB937570 (RB928064, classificada como mais tolerante e RB937570, menos tolerante). Para as variedades RB855453 e RB867515, a aplicação de vinhaça resultou em maior índice de tolerância ao Al, enquanto para a variedade RB966928 o maior índice foi encontrado na ausência de vinhaça.

Uchôa et al. (2009) avaliaram a resposta de seis variedades de cana-de-açúcar (RB72454, SP81-3250, SP79-1011, SP80-1816, RB867515, RB855536) as doses de potássio em um LATOSSOLO AMARELO distrocoeso em área de cerrado na região central do Estado de Roraima. Dentre as conclusões, os autores observaram que a variedade RB867515 foi a mais adaptada às condições edafoclimáticas do cerrado, considerando todos os atributos de produção estudados, tais como número, massa, diâmetro e altura dos colmos e a produtividade de colmos industrial ($t\ ha^{-1}$). Segundo Melo et al. (2004), a baixa CTC, baixos valores de saturação por bases e alta saturação por Al na camada de 20 a 50 cm, são características presentes nesses solos, apontando que a variedade RB867515 foi mais adaptada as condições limitantes desse solo.

Em trabalho realizado por Ferreira et al. (2011), cujo objetivo foi estudar características fisiológicas de dez genótipos de cana-de-açúcar (RB855113, RB835486, RB867515, SP80-1816, RB72454, RB925345, RB855156, RB937570, RB947520 e RB925211) cultivados em LATOSSOLO VERMELHO AMARELO, a variedade RB867515 demonstrou elevada taxa fotossintética e alta eficiência no uso da água, determinadas à partir dos valores de quantidade de CO_2 fixado pela fotossíntese e quantidade de água transpirada. A eficiência no uso e absorção de água está intimamente ligada ao desenvolvimento do sistema radicular (JANGPROMMA et al., 2012). Dessa forma, variedades que apresentam maior quantidade de raízes em profundidade, podem suportar com mais facilidade os estresses decorrentes do déficit hídrico (KUMAR et al., 2013).

Smith, Inman-Bamber e Thorburn, (2005) sugeriram que a tolerância à seca é mais elevada em cultivares com tendência a desenvolver sistemas de raízes profundas e que as propriedades do sistema radicular podem ser utilizadas como critério de seleção para tolerância à seca. O alumínio presente no solo provoca drástica inibição do alongamento celular da raiz, com redução subsequente do crescimento radicular e da absorção de água (ZHENG; YANG, 2005). Dessa forma, é de se esperar que variedades mais tolerantes à seca, sejam capazes de dar continuidade ao crescimento radicular, mesmo em condições de elevados teores de Al no solo.

A secreção de substâncias quelantes a partir das raízes, como os ácidos orgânicos de baixo peso molecular (AOBPM) podem atenuar os efeitos tóxicos do Al. A presença de grupos funcionais nesses ácidos, principalmente o carboxílico e o fenólico, os tornam capazes de formar moléculas estáveis com Al^{3+} , diminuindo sua fitotoxidez (MA et al., 2001, ALVAREZ et al., 2009).

Os AOBPM presentes nos extratos vegetais de cana crua das variedades de cana-de-açúcar RB855453, RB966928 e RB867515 foram identificados e quantificados por Malvestiti (2014). A variedade RB867515 apresentou maior teor de AOBPM, estando o ácido *trans*-aconítico presente em maior proporção, tanto nessa variedade, como nas outras estudadas. Dessa forma, a maior tolerância ao Al, demonstrada por essa variedade, pode estar ligada a exsudação desse ácido em maior quantidade, como resposta a presença de níveis tóxicos de Al.

4.3 Atributos químicos do solo

A análise de variância (Tabela 27) indicou que a aplicação de vinhaça não proporcionou efeitos significativos sobre importantes parâmetros químicos do solo, tais como o pH e os teores de matéria orgânica (MO), cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P) e potássio

(K). Entretanto, todos estes parâmetros variaram significativamente com a profundidade. A interação “Vinhaça x Profundidade” foi significativa apenas para o teor de K (Tabela 27). Aos 90 dias após a aplicação de 170,0 m³ ha⁻¹ de vinhaça, não foi encontrada diferença significativa nos atributos químicos do solo avaliados.

Tabela 27. Resumo da análise de variância (ANOVA) dos atributos químicos do LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Fonte de variação	F					
	MO	K	Ca	Mg	P	pH
Vinhaça (Vi)	0,2268 ns	0,3586 ns	1,3139 ns	3,1943 ns	0,8842 ns	0,6774 ns
Profundidade (P)	36,4300 **	7,9929 **	109,8732 **	94,4556 **	37,6947 **	142,5344 **
Interação Vi x P	2,0412 ns	3,2281 *	0,3551 ns	0,2462 ns	0,8078 ns	1,4012 ns

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$) ; * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 \leq p < 0,05$) ; ns não significativo ($p \geq 0,05$).

Basso et al. (2013) avaliaram o efeito da utilização de vinhaça, tanto como fonte alternativa de K na produção de aveia preta e de milho (silagem e safrinha), quanto em promover possíveis alterações em atributos químicos do solo. Constataram que a utilização da vinhaça como fonte de K na sucessão aveia preta/milho silagem/milho safrinha pode, além de substituir a adubação mineral, contribuir com efeito residual para os cultivos subsequentes. Porém, mesmo com a aplicação de 200 m³ ha⁻¹, não houve alteração nos atributos químicos do solo aos 10 meses após a aplicação da vinhaça. Isso foi atribuído ao curto tempo de experimentação, pois, segundo os autores, é provável que adições continuadas de vinhaça possam provocar, em longo prazo, alterações significativas em alguns atributos químicos do solo (BASSO et al., 2013). Dessa forma, a ausência de alterações nos atributos do solo, pela

aplicação de vinhaça aplicação de vinhaça (Tabela 28) é atribuída ao curto período do experimento.

Tabela 28. Atributos químicos avaliados em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Parâmetro	Profundidade (cm)				
	0-20	20-40	40-60	60-80	
Com vinhaça					
pH	6,1	5,2	4,6	4,3	
MO	g dm ⁻³	13,8	7,7	3,2	2,8
P	mg dm ⁻³	8,3	6,3	3,1	2,0
Ca	mmol _c dm ⁻³	10,1	8,7	5,4	4,2
Mg		9,4	6,2	4,5	3,7
Sem vinhaça					
pH		6,1	5,0	4,4	4,0
MO	g dm ⁻³	10,2	6,8	3,1	2,1
P	mg dm ⁻³	7,2	5,4	3,3	2,4
Ca	mmol _c dm ⁻³	9,2	8,3	5,2	3,5
Mg		8,0	5,0	3,4	3,3

Embora a vinhaça apresente alta concentração de matéria orgânica, esta se encontra na forma coloidal, composta principalmente por gliceróis e ácidos fracos, o que facilita sua decomposição pela microbiota do solo, de forma rápida, com intensa atividade microbiana (NEVES; LIMA; DOBEREINER, 1983; GLÓRIA; ORLANDO FILHO, 1983; SILVA;

GRIEBELER; BORGES, 2007). Dessa forma, dada à intensa atividade microbiana, decorre perda acentuada do C orgânico contido na vinhaça (GLÓRIA, 1994), não sendo esperado aumento no teor de matéria orgânica do solo (ROSSETTO et al., 2010a) e, conseqüentemente, efeitos persistentes e prolongados pelo aporte desse resíduo ao solo.

A fertirrigação durante 35 anos com $120 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de vinhaça modificou o teor de matéria orgânica de um CAMBISSOLO HÁPLICO Eutrófico cultivado com cana-de-açúcar, mas promoveu alterações na qualidade da matéria orgânica do solo (CANELLAS et al., 2007). Camilotti et al. (2006), avaliando o efeito da aplicação anual de lodo de esgoto e de vinhaça em alguns atributos físicos de um LATOSSOLO VERMELHO distroférico argiloso, após as colheitas do 3º e 4º cortes da cana-de-açúcar, também não constataram aumento no teor de matéria orgânica nesse solo.

Barros et al. (2010) verificando o efeito da aplicação da vinhaça sobre as propriedades químicas de um ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO eutrófico, cultivado com cana-de-açúcar, apontaram que adição consecutiva de $150 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de vinhaça, durante 10 anos, observaram a elevação dos conteúdos de matéria orgânica e de Ca + Mg trocáveis, da CTC, do V% e da soma de bases, mas o pH do solo permaneceu inalterado. Bebé et al. (2009) concluíram que a fertirrigação com $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de vinhaça ao longo de 3 e de 7 anos, em dois ESPODOSSOLOS FERRIHUMILÚVICOS Órticos, e por 15 anos, em um ARGISSOLO AMARELO Distrocoeso, não alterou o pH dos solos. Contudo, houve aumento de potássio em todas as profundidades dos solos correspondentes às áreas fertirrigadas com vinhaça, independentemente dos períodos de aplicação.

A análise de variância indicou que a aplicação de vinhaça não proporcionou efeitos significativos sobre o teor de Al e no índice de saturação por Al. Entretanto, estes parâmetros variaram significativamente com a profundidade (Tabela 29). Esses resultados eram esperados, uma vez que a aplicação de vinhaça não promoveu aumento no pH do solo e no

teor de cátions básicos, o que conseqüentemente poderia ter proporcionado redução dos teores de Al^{+3} e saturação por Al.

A incorporação de fontes de carbono no solo causa a diminuição da acidez, por meio de mecanismos que variam desde simples reação de neutralização da acidez do solo por compostos alcalinos, inorgânicos ou orgânicos, até reações de oxiredução, com grande consumo de prótons do solo (REIS; RODELLA, 2002). O que normalmente verifica-se é a acidificação até os primeiros 15 dias após a aplicação da vinhaça no solo, como resultado imediato da acidez original do resíduo. Porém, com o passar do tempo, há aumento do pH do solo.

Tabela 29. Resumo da análise de variância (ANOVA) do teor de Al e saturação por Al do LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Fonte de variação	F	
	Teor de Al ($mmol_c\ dm^{-3}$)	Saturação por Al (m%)
Vinhaça (Vi)	1,2762 ns	1,0661 ns
Profundidade (P)	9050,1469 **	1164,2049 **
Interação Vi x P	1,3902 ns	0,5073 ns

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$) ; * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 =< p < 0,05$) ; ns não significativo ($p \geq 0,05$).

A multiplicação de micro-organismos e as transformações da matéria orgânica, principalmente do N, consomem íons H^+ , com conseqüente elevação do pH (LEAL et al., 1983). No entanto, espera-se que essa elevação seja passageira, devido a matéria orgânica contida na vinhaça ser de fácil decomposição. Os efeitos da elevação do pH do solo, pelo aporte de vinhaça, podem ser efêmeros, sendo que o pH do solo deve retornar aos valores

originais após um determinado período de tempo (RODELLA; ZAMBELLO; ORLANDO FILHO, 1983). Camargo et al. (1987) constataram aumento do pH e diminuição na porcentagem de saturação por alumínio, com a aplicação de volumes de 100 e de 1000 m³ ha⁻¹ de vinhaça em um LATOSSOLO-VERMELHO Distrófico ao longo de um período de três anos. Entretanto, ambos os parâmetros tornaram-se similares aos da testemunha após um ano da última aplicação de vinhaça.

Era esperado que os todos os parâmetros químicos do solo variassem com o aumento da profundidade (Tabela 29), uma vez que os horizontes e/ou camadas do perfil, cultivados ou não, possuem níveis distintos de fertilidade do solo.

O efeito da interação “Vinhaça x Profundidade” sobre o teor de K foi avaliado pelo teste de Scott-Knott. A aplicação de vinhaça resultou em maior teor de K nas profundidades de 0 a 20 e 20 a 40 cm (Tabela 30).

Os resultados encontrados corroboram Godoy (2013), que avaliando mobilidade de K⁺ em diferentes profundidades, em um experimento utilizando colunas de solo, contendo um LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico (LVe), observou que à partir dos 120 dias da aplicação de vinhaça, todos os tratamentos resultaram em teores de K⁺ semelhantes a testemunha. Na ausência de vinhaça, o maior teor de K no solo foi verificado somente na camada de 0 a 20 cm, provavelmente devido à adubação com cloreto de potássio. O teor de K₂O adicionado ao solo pela adubação de cobertura (0,054 g), nas colunas onde não houve aplicação de vinhaça, foi inferior ao teor de K₂O (2,4g) contido na vinhaça. A aplicação de vinhaça proporciona teores mais elevados de K no complexo de troca do solo, acarretando em acréscimo desse elemento na solução do solo e, conseqüentemente, maior susceptibilidade de lixiviação do K (PAULA et al. 1999), justificando o maior teor de K na profundidade de 20 a 40 cm.

Os teores de K estiveram de acordo com aqueles esperados para solos da região tropical, que normalmente são baixos e inferiores a $1,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (OTTO; VITTI; LUZ, 2010). No Estado de São Paulo, o teor adequado de K no solo está entre 1,6 e $3,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (RAIJ et al., 1996).

Tabela 30. Teor de K ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) a partir da interação "Vinhaça x Profundidade" em LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, com gradiente de saturação por Al e submetido à aplicação de vinhaça.

Vinhaça	Teor de K ($\text{mmol}_c \text{ dm}^{-3}$)			
	Profundidade (cm)			
	0-20	20-40	40-60	60-80
Presença	1,66 aA	1,80 aA	1,04 aB	1,10 aB
Ausência	1,65 aA	1,21 bB	1,23 aB	1,14 aB

Médias seguidas de letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas na linha não diferem entre si pelo Teste de Scott-Knotta 5%.

5. CONCLUSÕES

A variedade de cana-de-açúcar RB867515 foi considerada mais tolerante a presença do Al no solo, considerando o índice de tolerância, além de apresentar maior diâmetro de colmo nessas condições. Entretanto, a ordem de classificação das variedades, baseada no índice de tolerância, variou em função da aplicação de vinhaça.

Sem o aporte de vinhaça, a variedade RB867515 obteve maior quantidade de matéria seca total do sistema radicular, já com aplicação de vinhaça essa característica foi apresentada pelas variedades RB867515 e RB855453.

Os níveis de saturação por Al afetaram de forma distinta a redução na quantidade de matéria seca do sistema radicular das variedades de cana-de-açúcar, sendo essa redução dependente da interação entre variedades e vinhaça.

Os parâmetros biométricos da parte aérea, com exceção do diâmetro do colmo, não foram considerados indicadores para diferenciar os genótipos de cana-de-açúcar em relação ao Al fitotóxico no solo. O índice de clorofila foliar não pôde ser adotado como um parâmetro indicativo decorrente desse estresse.

A vinhaça não provocou modificações nos atributos químicos do solo avaliados, sobretudo, na redução dos teores de Al e no índice de saturação por Al, aos 90 dias após sua aplicação, com exceção do teor de K, que foi maior na profundidade de 20 a 40 cm.

O aumento da porcentagem de raízes na profundidade de 40 a 80 cm, em relação à aplicação de vinhaça, foi verificado somente para a variedade RB966928.

5. REFERÊNCIAS

- ABREU JR. C; MURAOKA, T.; LAVORANTE, A. F. Relationship between acidity and chemical properties of Brazilian soils. **Scientia Agricola**, v.60, n.2, p.337-343, 2003.
- ADÂMOLI, J. et al. Caracterização da região dos cerrados. In: GOEDERT, W.J. (ed.). **Solos dos cerrados: tecnologia e estratégia de manejo**. São Paulo, Editora Nobel, 1986. p. 33-74.
- ADAMS, F.; PEARSON, R.W. Differential response of cotton and peanuts to subsoil acidity. **Agronomy Journal**, v.62, p.9-12, 1970.
- ALVAREZ, I. A. ; CASTRO, P. R. de C; NOGUEIRA, M. C. S . Crescimento de raízes de cana crua e queimada em dois ciclos. **Scientia Agricola**, v.57, n.4, p.653-659, 2000.
- ÁLVAREZ E., et al. Effect of liming with different sized limestone on the forms of aluminium in a Galician soil (NW Spain). **Geoderma**, v. 152, p. 1-8, 2009.
- ANIOL, A. Genetics of tolerance to aluminum in wheat (*Triticum aestivum* L. Thell). **Plant and Soil**, v.123, p.223-227, 1990.
- ANGHINONI, I; SALET, R. L. Calagem no sistema de plantio direto. *Anais...* Disponível em: <[http://www.ipni.net/ppiweb/pbrazil.nsf/\\$webindex/article=63D72F3B83256C700069AD37EAFCA01D](http://www.ipni.net/ppiweb/pbrazil.nsf/$webindex/article=63D72F3B83256C700069AD37EAFCA01D)>. Acesso em: 6 fev. 2014.
- BACCHI, O.O.S. Botânica da cana-de-açúcar. In: ORLANDO FILHO J.(Ed). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. IAA/ PLANALSUCAR,1983.p.25-37.
- BALL-COELHO, B. et. al. Root dynamic in plant ratoon crops of sugar cane. **Plant and Soil**, v.142, p.297-305, 1992.
- BARROS, R. P. de. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 3, p. 341-346, 2010.
- BASSO, C. J. et al . Vinhaça como fonte de potássio: resposta da sucessão aveia-preta/milho silagem/milho safrinha e alterações químicas do solo na Região Noroeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria , v. 43, n. 4, 2013 .
- BEBÉ, V et al. Avaliação de solo sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.781-187, 2009.
- BENKE, M.B., MERMUT, A.R.. Liquid sugarcane residue: characteristics and interaction with soil constituents. In: World Congress of Soil Science, **Summaries**, Vol. 1, Montpellier, France,p. 138, 1998.
- BENNETT, C. G. S. et al . Produtividade e desenvolvimento da cana-planta e soca em função de doses e fontes de manganês. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, 2011.
- BENNET, R.J., BREEN, C.M. The aluminium signal: new dimensions to mechanisms of

aluminium tolerance. **Plant and Soil**, v.134, p.153-166, 1991.

BERTSCH, P. M.; PARKER, D. R. Aqueous polynuclear aluminum species. In: SPOSITO, G. (Coord.). **The environmental chemistry of aluminum**. Boca Raton : CRC Press, 1995. p. 117-168.

BRACCINI, M.C.L. et al. Avaliação de linhagens de cafeeiros quanto à tolerância ao alumínio pelo método do papel-solução. **Bragantia**, v.59, n.2, p.221-226, 2000 a.

BRACCINI, M.C.L. et al. Crescimento da planta e coloração das raízes com hematoxilina como critérios de avaliação de genótipos de café quanto à tolerância à toxicidade por alumínio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p.59-68, 2000b.

BRITO, A. dos S. et al. Estimativa da capacidade de campo pela curva de retenção e pela densidade de fluxo da água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 939-1948, 2011.

BRUNINI, O. Zoneamento de culturas bioenergéticas no Estado de São Paulo. 2007. Disponível em: <http://www.infobibos.com/Artigos/2007_3/zoneamento/index.htm> . Acesso em: 20 ago. 2013.

CAMARGO, O.C. de et al. Alteração das características químicas de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico pela aplicação de vinhaça. Campinas: Instituto Agrônomo, 1987. 23p. (Boletim Científico, 9).

CAMBRAIA, J. et al. Effects of aluminum on organic acid, sugar and amino acid composition on the root system of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Journal of Plant Nutrition** ,6, p. 313-322, 1983.

CAMBRAIA, J. et al. Método simples para a avaliação de cultivares de sorgo quanto a tolerância ao alumínio. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.3, p.87-95, 1991.

CAMBRI, M.A. **Calagem e formas de alumínio em três localidades sob sistema de plantio direto**. Piracicaba, 2004. 95f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade de São Paulo.

CAMILOTTI, F. et al . Atributos físicos de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar após aplicações de lodo de esgoto e vinhaça. **Engenharia Agrícola**, v. 26, n. 3,2006.

CANELLAS, L.P. et al. Estoque e qualidade da matéria orgânica de um solo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.331-340, 2007.

CARANHATO, A. L. H. et al. Comparação do teor de clorofila entre genótipos de cana-de-açúcar. In.: II CONGRESSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA UTFPR – CÂMPUS DOIS VIZINHOS, 2012. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

CARLIN, S. D.; SANTOS, D. M. M. Indicadores fisiológicos da interação entre deficit hídrico e acidez do solo em cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, n.9, p.1106-1113, 2009.

CARLIN, S. D. ; RHEIN, A. F. L.; SANTOS, D. M. M. dos. Efeito simultâneo da deficiência hídrica e do alumínio tóxico no solo na cultivar IAC91-5155 de cana-de-açúcar. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 2, p. 553-564, 2012.

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

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Norma Técnica P 4.231. Vinhaça: critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. São Paulo: CETESB, 2006. 12p.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Utilização de restilo como fertilizante em solos cultivados como cana de açúcar: relatório final. São Paulo: CETESB, 1982. 262 p.

CHAPOLA, R. G. et al. (Eds). **Censo varietal 2012**. Araras: CCA-UFSCar, 2013. 55 p.

CLARKSON, D.T. The effect of aluminium and some other trivalent metal cations on cell division in the root apices of *Allium cepa*. **Annals of Botany**, v.107, p.315-321,1965.

CODOGNATO, L. M. et. al. Efeito do alumínio nos teores de clorofilas de plântulas de feijão-mungo e labe-labe. **Revista Ecosistema**, v. 27, n. 1-2, p. 27-30, 2002,

COLLICCHIO, E. **Zoneamento edafoclimático e ambiental para a cana-de-açúcar e as implicações das mudanças climáticas no estado do Tocantins**. 2008. 152f. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada)- Universidade de São Paulo.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, segundo levantamento, agosto /2013**. Companhia Nacional de Abastecimento. Brasília: Conab,2013.

COSTA, M.C.G. et al. 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.

CRUZ, F. J. R. et al. Mecanismos bioquímicos e fisiológicos da toxidez de alumínio (Al^{3+}) em plantas sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). In:VI SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UFRA E XII SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL. **Anais...** Belém: 2008.

DAL BÓ, M.A. et al. Efeito da adição de diferentes fontes de cálcio em colunas de solo cultivadas com cana-de-açúcar. I. Movimentação de bases no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.10, p.195-198, 1986.

DELHAIZE E.; RYAN P. R.; RANDALL P.J. Aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). II. Aluminum-stimulated excretion of malic acid from root apices. **Plant Physiology**, v. 103,p. 695-702, 1993.

DELHAIZE, E.; RYAN, P.R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, v.107, p.315-321,1995.

DEMATTÊ, J.L.I. Manejo e conservação de solos, na cultura da cana. **Visão Agrícola**, v.1, p.8-17, 2004.

DEMATTÊ, J.L.I. Cultura da cana-de-açúcar: recuperação e manutenção da fertilidade dos solos. **Encarte Informações Agrônomicas Potafos**, n.111, p.1-24, 2005.

DEMATTÊ, J.L.I; DEMATTÊ, J.A.M. Ambientes de produção como estratégia de manejo na cultura da cana-de-açúcar. **Informações agrônomicas**, n. 127, p 10-18, 2009.

DIAS , F. L. F. et al. Produtividade da cana-de-açúcar em relação a clima e solos da região noroeste do estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p.627-634, 1999.

DILLEWIJN, C. VAN. **Botany of sugarcane**. Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371p.

DRUMMOND R.D., et. al. Prospecting sugarcane genes involved in aluminum tolerance. **Genetics and Molecular Biology**, 24,221- 230, 2001.

ECCO, M.; SANTIAGO, E. F.;LIMA, P. R. Chlorophyll a fluorescence in two varieties of sugar cane subjected to aluminum and water stress. **African Journal of Agricultural Research**, v. 8, n. 39, p. 4941-4948, 2013.

ECHART, C. L.; CAVALLI-MOLINA, S. Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético. **Ciência Rural**, v.31, n.3, p.531-541, 2001 .

ELIA NETO, A.; NAKAHODO, T. Caracterização físico-química da vinhaça: relatório técnico da seção de tecnologia de tratamento de águas do Centro de Tecnologia Copersucar, Piracicaba, 26 p., 1995. (projeto nº 9500278).

ELIA NETO, A.; ZOTELLI, L.C. Caracterização das águas residuárias para reuso agrícola. Piracicaba: Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), 2008, 31p.

ELIA NETO, A.; SHINTAKU, A.; DONZELLI, J.L. Processo agroindustrial. In: ANA - Agência Nacional de Águas; FIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo; UNICA - União da Indústria da Cana-de-Açúcar; CTC - Centro de Tecnologia Canavieira. Manual de conservação e reuso de água na agroindústria sucroenergética, Brasília: ANA, 2009. Cap. 4, p.51-65.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212 p

EMBRAPA. Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA – SPI; Rio de Janeiro:EMBRAPA – Solos, 2013.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO (EPE). (2008). **Cadernos de Energia EPE: Perspectivas para o etanol no Brasil**. Disponível em:

<http://www.epe.gov.br/Petroleo/Documents/Estudos_28/Cadernos%20de%20Energia%20-%20Perspectiva%20para%20o%20etanol%20no%20Brasil.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2014.

EVANS, H. The root system of sugarcane: an evaluation of its salient features. **Indian Journal of Sugarcane Research Development**, v.8, p.161–171, 1964.

FALKER AUTOMAÇÃO AGRÍCOLA Ltda. Manual do medidor eletrônico de teor clorofila (ClorofiLOG / CFL 1030). Porto Alegre, Falker Automação Agrícola. Rev. B. 2008. 33p

FARONI, C. E; TRIVELIN, P. C. O. Quantificação de raízes metabolicamente ativas de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 41, n.6, p. 1007-1013, 2006.

FERREIRA, E. A. et al. Evaluation and grouping of sugarcane genotypes in agreement with their physiologic characteristics types. **Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas**, v. 5, n. 3, p. 30-38, 2011 .

FERREIRA, R. de P. et. al. **Toxidez de alumínio em culturas anuais**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, Documentos 63, 2006. 35p.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A. Dinâmica da calagem superficial em um Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.235-247, 2005.

FLORES, R. A. et al. Potássio no desenvolvimento inicial da soqueira de cana crua. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 1, p. 106-111, 2012.

FOY, C.D. et. al. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review Plant Physiology**, v.29, p.511-566, 1978.

FOY, C.D. Tolerance of durum wheat lines to an acid, aluminium-toxic subsoil. **Journal of Plant Nutrition**, v.19, p. 1381-1394, 1997.

FREIRE, W.J.; CORTEZ, L.A.B. **Vinhaça de cana-de-açúcar**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 203p.

GAVA, G. J. C. et al. Crescimento e acúmulo de nitrogênio em cana-de-açúcar cultivada em solo coberto com palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.1347-1354, 2001.

GLÓRIA, N.A. da; ORLANDO FILHO, J. Aplicação da vinhaça como fertilizante. **Boletim Técnico PLANALSUCAR**, v.5, n.1, p.1-38, 1983.

GLÓRIA, N.A. Utilização racional dos resíduos da agroindústria sucroalcooleira e seus efeitos na produtividade da cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO SOBRE TECNOLOGIAS DE MANEJO DE SOLO E ADUBAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR, 1, 1994, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: SOPRAL/SUCRESP/ALCOOPLAN/ASSISTE, 1994. p. 121-146.

GODOY, F. K. **Lixiviação dos íons nitrato e potássio em latossolo submetido à aplicação de diferentes doses e tipos vinhaça**. Araras/SP, 2013. 223f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente)- Universidade Federal de São Carlos.

GOLDMANN, I.L. et al. A detrimental interaction of subsoil aluminum and drought stress on the leaf water status of soybean. **Agronomy Journal**, v.81, n.3, p.461-463, 1989.

GONZAGA, G. B. M. **Avaliação do crescimento inicial da cana-de-açúcar, variedade RB867515, sob o efeito de bactérias endofíticas**. Rio Largo/AL, 2012. 53 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Universidade Federal de Alagoas.

GUARIZ, H. R. et al. Variação da umidade e da densidade do solo sob diferentes coberturas vegetais. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2009, Natal/PE. Anais...VIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, p. 7709-7716, 2009. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2008/11.18.04.40/doc/7709-7716.pdf>> . Acessoem: 10 maio 2013.

GUPPY, C.N. et al. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, v. 43, p. 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 da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, vol.45, p. 441-452, 1988.

HARTWIG, I. et al. Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 2, p. 219-228, 2007.

HAYNES, R.J.; MOKOLOBATE, M.S. Amelioration of Al toxicity and P deficiency in acid soils by additions of organic residues: a critical review of the phenomenon and the mechanisms involved. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 59, p. 47-63, 2001.

HAWKESFORD, M et al. Functions of macronutrients. In: Marschner, P. (ed.). **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. New York: Elsevier, 2012. cap.6, p.135-189.

HEES, PAW -VAN et al. Low molecular weight organic acids and their Al-complexes in soil solution - composition, distribution and seasonal variation in three podzolized soils. Special issue: The podzolization process. **Geoderma**, v.94, p.173-200, 2000.

HENDRY, G. A. F.; PRICE, A. H., Stress indicators: chlorophylls and carotenoids. IN: HENDRY, G. A. F.; GRIME, J. P. **Methods in Comparative Plant Ecology, a laboratory manual**. London: Chapman e Hall, p.148-152. 1993.

HOLANDA, L. A. de **Resposta varietal de cana-de-açúcar à deficiência hídrica, durante o desenvolvimento inicial em um LATOSSOLO VERMELHO Distroférico**. Botucatu, 80f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)- Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

HUMBERT, R.P. **The growing of sugar cane**. Amsterdam: Elsevier, 1968. p. 1-55.

JANGPROMMA, N. et al. Effects of drought and recovery from drought stress on above ground and root growth, and water use efficiency in sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). **Australian Journal of Crop Science**, v. 6, n. 8, p. 1298-1304, 2012.

KIDD P.S. et al. The role of root exudates in aluminium resistance and silicon induced amelioration of aluminium toxicity in three varieties of maize (*Zea mays* L.) **Journal of Experimental Botany**, v. 52, p. 1339-1352, 2001.

KNOX, J. W. et al. A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. **Agricultural Systems**, v. 103, p. 63-72, 2010.

KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v.46, p.237-260, 1995.

KOCHIAN, L. V. et al. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, p. 459-493, 2004.

KÖEPPEN, W. **Climatologia**: con um estúdio de los climas de la Tierra. México: Fondo de Cultura Economica, 1948. 478p.

KOFFLER, N. F. et al. **Caracterização edafoclimática das regiões canavieiras do Brasil**. Piracicaba: Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA) –Planalsucar,78p, 1986a.

KOFFLER, N.F. A profundidade do sistema radicular e o suprimento de água às plantas no Cerrado. **Informações Agronômicas Potafos**, n.33, p.1-5, 1986b.

KOFFLER, N.F.; DONZELI, P.L. Avaliação dos solos brasileiros para a cultura da cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S.B. (Coord.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. Campinas: Fundação Cargill, 1987. cap. 1. p.19-41.

KORNDÖNFER, G.H; PRIVAMAVESI, 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).

KUMAR, T;. Genetic improvement of sugarcane for drought and salinity stress tolerance using *Arabidopsis* vacuolar pyrophosphatase (AVP1) gene. **Molecular Biotechnology**, v. 56, n. 3, p. 199-209, 2014.

LANDELL, M.G.A. **Comportamento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) frente a níveis de alumínio, em solução nutritiva**. Jaboticabal: UNESP/FCAV, 1989. 117p. (Tese - Doutorado).

LANDELL, M.G. de A. et al. Oxisol subsurface chemical attributes related to sugarcane productivity. **Scientia Agricola**, v.60, p.741-745, 2003.

LANDELL, M.G. de A. et al. Variedades de cana-de-açúcar para o Centro-Sul do Brasil. Campinas: **Instituto Agrônomo**, Boletim Técnico 197, 33 p., 2005a.

LANDELL, M. G. A. et al. Seleção de novas variedades de cana-de-açúcar e seu manejo de produção. **Encarte do Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 1, n. 110, 2005.

LANDELL, M.G. de A.; BRESSIANI, J.A. Melhoramento genético, caracterização e manejo varietal . In: DINARDO-MIRANDA, L.L.; VASCONCELOS, A.C.M. de; LANDELL, M.G. de A. **Cana-de-açúcar**. Campinas: IAC, 2010. p. 101-156.

LEAL, J. R. Potencial redox e pH: variações em um solo tratado com vinhaça. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.7, p.257-261,1983.

LEITE, G. H. P.; CRUSCIOL, C. A. C.; SILVA, M. A. Desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar após aplicação de reguladores vegetais em meio de safra. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 1, p. 129-138, 2011.

LINDSAY, W.L.; WALTHALL, P.M. The solubility of aluminum in soils. In: G., SPOSITO, ed. **The Environmental Chemistry of Aluminum**. Boca Raton: Lewis, p. 333–361, 1996.

MA, J.F. Syndrome of aluminum toxicity and diversity of aluminum resistance in higher plants. **International Review of Cytology**, v. 264, p. 225–252, 2007.

MA, J.F. et al. Aluminum tolerance in plants and the complexing role of organic acids. **Trends in Plant Science**, v. 6, n. 6, p. 273-278, 2001.

MACHADO, R.S. et al. Respostas biométricas e fisiológicas ao deficit hídrico em cana-de-açúcar em diferentes fases fenológicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.44, p.1575-1582, 2009.

MAGALHÃES, V.R. **Influência de doses de vinhaça nas características agronômicas de variedades de cana-de-açúcar, cana-planta e atributos do solo**. Montes Claros, 2010. 89p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) -Universidade Estadual de Montes Claros.

MALAVOLTA, E. Importância da adubação na qualidade dos produtos: função dos nutrientes na planta. In: SÁ, M. E.; BUZZETI, S. **Importância da adubação na qualidade dos produtos agrícolas**. São Paulo: Ícone, 1994. p. 19-44.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Potafos, 1997.319p.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 251p, 1980.

MALVESTITI, J. A. **Extratos vegetais de cana crua e a atenuação da toxidez por alumínio no crescimento inicial de cana-de-açúcar**. Araras, 2014. 86p. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente)- Universidade Federal de São Carlos.

MARIANO, E. D. et al. Metabolism and root exudation of organic acid anions under aluminium stress. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 17, p. 157-172, 2005.

MARIN, F. R. Cana-de-açúcar: variedades. Agência de Informação Embrapa. Ministério da Agricultura, pecuária e abastecimento, s. d. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_42_1110200717570.html. Acesso em: 15 jul. 2013.

MATIAZZO, M. E.; GLORIA, N. A. Efeito da vinhaça na acidez do solo. **STAB: açúcar, álcool e subprodutos**, v.3, p.35-40, 1985.

MASSOT, N.; POSCHENRIEDER, C. & BARCELÓ, J. Differential response of three bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars to aluminum. **Acta Botanica Neerlandica**, 41:293-298, 1992.

MATSUMOTO, H. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. **International Review of Cytology**, v. 200, p. 1-47, 2000.

MAULE, R.F. et al. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agricola**, v.58,p.295-301, 2001.

McCORMICK, L.H.; BORDEN, F.Y. Phosphate fixation by aluminum in plant roots. **Soil Science Society of America Proceedings**, v.36, p.799-807, 1972.

MEDINA, C. C. et al. Sistema radicular de cana-de-açúcar submetida a doses de gesso, calcário e vinhaça. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 21, n. 1, p. 71-75, 2000.

MELO, V. F.; GIANLUPPI, D.; UCHÔA, S. C. P. Características edafológicas dos solos do estado de Roraima. Boa Vista: DSI/UFRR, 2004. 46 p.

MELLIS, E.V.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H. Micronutrientes. In: DINARDO MIRANDA, L.L.D. et al. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônômico, 271 - 288p. 2008.

MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. 5ª Ed. Porto Alegre: Genesis, 2012. 285p.

MILIVOJEVIC, D. B.; STOJANOVIC, D. D.; DRINIC, S. D. Effects of aluminium on pigments and pigment-protein complexes of soybean. **Biologia Plantarum**, v. 43, n. 4, p. 595-597, 2000.

MISTRO, J.C.; CAMARGO, C.E.O.; PETTINELLI-JUNIOR, A. Avaliação de genótipos de trigo, de diferentes origens, em relação à toxicidade de alumínio. **Bragantia**, v.60, p.1-9, 2001.

MORALES, A. **Extracción e identificación de compuestos orgánicos en vinaza**. Santiago de Cali, 2000. 110 p. Postgrado en Química Orgánica - Universidad del Valle.

MORELLI, J. et. al. Efeito do gesso e do calcário nas propriedades químicas de solos arenosos álicos e na produção de cana-de-açúcar. **STAB**, v.6, p.24-31, 1987.

MOZAMBANI, A. E. et al. História e morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. de S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J.C.M. de.(coord.). **Atualização em cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livroceres, 2006, p. 11-18.

NARAMABUYE, F.X. ;HAYNES, R.J. The liming effect of five organic manures when incubated with an acid soil. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 170, p. 615-622, 2007.

NEVES, M.C.P.; LIMA, I.T.; DOBEREINER, J. Efeito da vinhaça sobre a microflora do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.7, n.2, p.131-136, 1983.

NOBILE, F. O. de et al . Variáveis biométricas da cana-de-açúcar fertilizada com resíduos orgânico e industrial e irrigada com água servida e potável. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 193-200, 2011.

OLIVEIRA, E. C. A. de et al . 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, n. 9, pp. 951-960, 2010.

OLIVEIRA, M. S. de. **Tolerância de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) à toxidez por alumínio em solução**. Araras, 2012. 112f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) - Universidade Federal de São Carlos.

OLMOS, I.R.; CAMARGO, M.N. Ocorrência de alumínio tóxico nos solos do Brasil, sua caracterização e distribuição. **Ciência e Cultura**, Rio de Janeiro, v.28, n.2, p.171-180, 1976.

ORLANDO FILHO, J.; LEME, E.J. de A. Utilização agrícola dos resíduos da agroindústria canavieira. In: SIMPOSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1984, Brasília. **Anais...** Brasília: EMBRAPA, 1984. p.451-475.

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

OSAWA H.; MATSUMOTO H. Possible involvement of protein phosphorylation in aluminum-responsive malate efflux from wheat root apex. **Plant Physiology**, v. 126, p. 411-420, 2001.

OTTO, R. et al . Root system distribution of sugar cane as related to nitrogen fertilization, evaluated by two methods: monolith and probes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 3, p. 601-611, 2009.

OTTO, R.; VITTI, G. C. ; LUZ, P. H. C. de. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa , v. 34, n. 4, p. 1137-1145 2010.

PARENTONI, S. N, et. al. Melhoramento para tolerância ao alumínio como fator de adaptação a solos ácidos. In: NASS, L. L. et. al. (Eds.). **Recursos genéticos & melhoramento**. Rondonópolis: Fundação Mato Grosso, 2001.p. 783-851.

PAULA, M. B. de et al . Uso da vinhaça no abacaxizeiro em solo de baixo potencial de produção. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** , v. 34, n. 7, p.1217-1222, 1999.

PAVAN, M.A. et. al. 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.

PEARSON, R.W. Soil environment and root development. In: Pierre, W. H.; Kirkham, D.; Shaw, R. J. **Plant environment and efficient water use**. American Society of Agronomy, p. 95-126, 1996.

PELLET, D.M.; PAPERNIK, L.A.; KOCHIAN, L.V. Multiple aluminum resistance mechanisms in wheat: Roles of root apical phosphate and malate exudation. **Plant Physiology**, v. 112, p.591-597, 1996.

PRADO H. do. **Solos tropicais: potencialidades, limitações, manejo e capacidade de uso**. Jaboticabal: FUNEP, 1998. 231p.

PRADO, H. do. Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil. **Encarte Informações Agronômicas Potafos**, n.110, p.12-17, 2005.

PRADO, H. do. et al. Solos e ambientes de produção. In: DINARDO-MIRANDA, L. L. et al. eds. **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2010. p. 179-204.

QUAGGIO, J.A. et al .Respostas da soja à aplicação de calcário e gesso e lixiviação de íons no perfil do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 28, p. 375-383, 1993.

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

RAIJ, B. van. Avaliação da fertilidade do solo. Piracicaba, Instituto Internacional da Potassa e Fosfato, 1981. 142p.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres, Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. 343p.

RAIJ, B. van. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. Campinas, Instituto Agronômico/Fundação IAC, 285p.,1996. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. van. et al. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico, 2001. 284p.

RAIJ, B. van. Gesso na Agricultura. Campinas: Instituto Agronômico, 2008, 233p.

RAMOS, L.A. et al. Reatividade de corretivos da acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p.849-857, 2006.

RANA, D. K.; AERY, N. C. Effect of aluminium stress on the biochemical constituents during early seedling growth of mustard. **Bionature**, v. 19, n. 2, p. 47-50, 1999.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas, Fundação Cargill, 445p, 1985.

REIS, A. J. S. do. O melhoramento genético e a expansão da cana-de-açúcar no bioma cerrado. **Revista UFG**, ano XI, n. 7,p.14-17, 2009.

- REIS, T.C.; RODELLA, A.A. Cinética de degradação da matéria orgânica e variação do pH do solo sob diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.619-626, 2002.
- RIBEIRO, M.R.; HALSTEAD, E.H.; JONG, E. Rendimento da cana-de-açúcar e características das terras da microrregião da Mata de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.8, p.209-213, 1984.
- RIDESA - Rede Interinstitucional para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro – **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar**. Curitiba, 2010. 136 p.
- RITCHIE, G.S.P.; NELSON, M.P.; WHITTEN, M.G. The estimation of free aluminium and the complexation between fluoride and humate anions for aluminum. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, p. 857-871, 1988.
- RODELLA, A. A. Métodos de análise de solo, tecido vegetal, vinhaça e torta de filtro. In: ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: PLANALSUCAR, 1983. p. 351-368.
- RODELLA, A.A.; ZAMBELLO Jr., E.; ORLANDO FILHO, E. Effects of vinasse added to soil on pH and exchangeable aluminum content. In: CONGRESS OF INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 17., Havana, 1983. Proceedings. Havana, José Marti, 1983. p.237-245.
- ROSSETTO, R. et al. Nutrição e Adubação: Potássio. In: Dinardo-Miranda, L.L. et al. **Cana-de-açúcar**. 1ª edição. Campinas, 2010. cap. 12, p. 289-312.
- ROSSETTO, R. et al. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIPP, S.R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: III culturas**, Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010a. Cap. 5, p.163-230.
- ROSSIELLO, R.O.P.; JACOB NETTO, J. **Toxicidez de alumínio em plantas: novos enfoques para um velho problema**. In: Fernandes, M.S. (Ed.). Nutrição Mineral de Plantas. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.375-418.
- ROUT, G. R.; SAMANTARAY, S.; DAS, P. Aluminium toxicity in plants: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 21, n. 1, p. 3-21, 2001.
- SAMAC, D.A.; TESFAYE, M. Plant improvement for tolerance to aluminum in acid soils – a review. **Plant Cell, Tissue and Organ Culture**, v.75, p.189-207, 2003.
- SAMPAIO, E.V.S.B; SALCEDO, I.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.
- SANTOS, C. **Novas Alternativas de Testes de Agrupamentos Avaliadas por meio de Simulação Monte Carlo**. 2000. 85p. Dissertação (Mestrado em Estatística e Experimentação Agropecuária) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SANTOS, J.R. dos. **Caracterização fisiológica de genótipos de cana-de-açúcar e avaliação de seus desempenhos em condições de restrição hídrica**. São Cristovão, 2012. 94f. Dissertação (Mestrado em Agroecossistemas)- Universidade Federal do Sergipe.

SHAINBERG, I. et. al. Use of gypsum on soils: a review. **Advances in Soil Science**, v.9, p. 1-111, 1989.

SCHUMANN, A. W. ; McARTHUR, D.; MEYER, J. H. Further revision of lime recommendations used in the South African sugar industry. **Proceedings of the South African Sugar Technologist's Association**, v. 73,p. 58-73, 1999.

SCHLEMMER, M.R. et al. Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. **Agronomy Journal**, v. 97, p. 106-112, 2005.

SHIGAKI, F. et al. Influência do estresse hídrico nos parâmetros de crescimento e acúmulo de N em variedades de cana de açúcar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. 1 CD –Rom.

SILVA, A. P. M. da; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. de A. R.. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, 2014.

SILVA, I.R. et. al. **Physiological aspects of aluminum toxicity and tolerance in plants**. In: Alvarez V. et. al. Tópicos em Ciência do Solo, v.II, p.277-335, 2002.

SILVA, M.A.S.; GRIEBELER, N.P.; BORGES, L.C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007.

SILVA, T. G. F. da et al . Biometria da parte aérea da cana soca irrigada no Submédio do Vale do São Francisco. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza , v. 43, n. 3, 2012.

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.

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.

SOUSA, D.M.G.; MIRANDA, L.N.; OLIVEIRA, S.A. Acidez do solo e sua correção. In: NOVAIS, R.F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p.205-274.

SOUZA, J. R. P. de et al . Morphological alterations of corn (*Zea mays* L.) plants in response to aluminum toxicity in the soil. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 43, n. 4, 2000.

SOUZA, Z.M. de, et. al. Manejo de palhada de cana colhida sem queima, produtividade do canavial e qualidade do caldo. **Ciência Rural**, v.35, p.1062-1068, 2005.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York, Oxford University Press, 1989. 277p.

STEVENSON, J.F. **Humus chemistry, gênesis, composition, reactions**. 2 ed. New York: John Wiley, 1994. 496p.

STROBEL, B. W. Influence of vegetation on low-molecular-weight carboxylic acids in soil solution – a review. **Geoderma**, v. 99, p. 169-198, 2001.

SZMIGIELSKA, A.M. et al. Comparison of liquid and gas chromatography for analysis of low molecular weight organic acids in rhizosphere soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.28, n.1-2, p.99-111, 1997.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TAN, K.H. **Principles of soil chemistry**. New York, John Wiley & Sons, 1993. 362.

TANG, C. et. al. Responses of wheat and barley to liming on a sandy soil with subsoil acidity. **Field and Crops Research**, v.80, p.235-244. 2003.

TAYLOR, H.M. Modifying root system of cotton and soybean to increase water absorption. IN: TAYLOR, H.M. et. al. **Limitations to Efficient Water Use and Crop Production**. Madison: American Society of Agronomy, p. 57-64, 1983.

THURMAN, E. M., **Organic Geochemistry of Natural Waters**, Martinus Nijhoff/Dr W. Junk Publishers, Dordrecht, 497 p., 1985.

UCHÔA, S. C. P. et al. Resposta de seis variedades de cana-de-açúcar a doses de potássio em ecossistema de cerrado de Roraima. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n. 4, p. 505-513, 2009.

VARGAS, V. P. et al. Leaf attributes are more efficient than soil mineral N to evaluate the availability of this nutrient to maize. **Bragantia**, v. 71, n. 2, p. 245-255, 2012.

VASCONCELOS, A. C. M. **Comportamento de clones IAC e variedades cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) nas condições edafoclimáticas da região do Vale do Paranapanema**. Jaboticabal, 1998. 108 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal)–Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista.

VASCONCELOS, A.C.M. et al. 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 Agronômicas Potafos**, n.110, p.1-5, 2005.

VASCONCELOS, A.C.M. de; CASAGRANDE, A.A. Fisiologia do sistema radicular. In: DINARDO- MIRANDA, L.L. et al. (Eds.). **Cana-de-açúcar**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2010. p. 79-101.

- VITORELLO, V. A.; CAPALDI, F. R. ;STEFANUTO, V. A. Recent advances in aluminium toxicity and resistance in higher plants. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.17, p.129 - 143. 2005.
- VITTI, G. C.; QUEIROZ, F. E. de C.; QUINTINO, T. A. Micronutrientes na cana-de-açúcar: mitos e realidades. Piracicaba: Potafos, In: II SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA DE PRODUÇÃO EM CANA-DE-AÇÚCAR, 2005.
- VITTI, A.C.; PRADO, H. do. Produtividade da cana-de-açúcar em função do ambiente e disponibilidade hídrica. **Pesquisa & Tecnologia**, vol. 9, n. 2, 2012.
- VON UEXKÜLL, H.R.; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. **Plant and Soil**, v.171, p.1-15, 1995.
- WAAL, J.R. et al. Influence of the vinasse application in sugar cane fields in Patrocínio Paulista, São Paulo State, Brazil. In: BREBBIA, C.A. (ed.) **Environmental Health Risk V**, Wessex Institute of Technology, UK: WIT Press, v. 14, p. 113-124, 2009.
- WANG, J. et al. Aluminum tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.): physiological mechanisms, genetics and screening methods. **Journal of Zhejiang University Science**, v.7, p.769-787, 2006.
- WATT, D.A. Aluminum-responsive genes in sugarcane: Identification and analysis of expression under oxidative stress. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, p.1163–1174, 2003.
- XU, R. et al. Effect of low-molecular-weight organic anions on electrokinetic properties of variable charge soils. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 277, p. 243-247, 2004.
- ZHENG, S J.; MA, J. F.; MATSUMOTO, H. High aluminium resistance in buckwheat. I. Al-induced specific secretion of oxalic acid from root tips. **Plant Physiology**, v. 117, p. 745–751, 1998.
- ZHENG, S.J.; YANG, J.L. Target sites of aluminum phytotoxicity. **Biologia Plantarum**, v.49, p.321-331, 2005.
- ZOLIN, CORNÉLIO A. et al. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo: I. Características do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.1, p. 22-28, 2011.