

CIRO MAIA DE BRITO

VARIABILIDADE GENÉTICA EM CANA-DE-AÇÚCAR NA TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

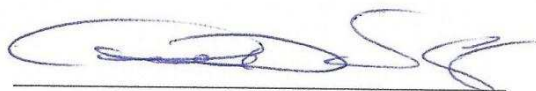
VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

CIRO MAIA DE BRITO

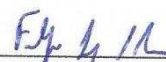
VARIABILIDADE GENÉTICA EM CANA-DE-AÇÚCAR NA TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 18 de julho de 2014.



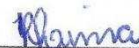
Cosme Damião Cruz



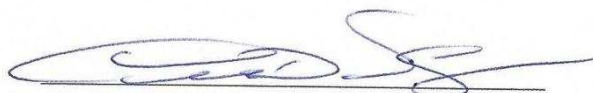
Felipe Lopes da Silva
(Coorientador)



Rogério Faria Vieira



Rodrigo Oliveira de Lima



Leonardo Lopes Bhering
(Orientador)

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da
Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

B862v Brito, Ciro Maia de, 1982-
2014 Variabilidade genética em cana-de-açúcar na tolerância ao
alumínio / Ciro Maia de Brito. - Viçosa, MG, 2014.
vi, 24f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Leonardo Lopes Bhering.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.20-24.

1. Cana-de-açúcar - Efeito dos minerais. 2. Raiz. 3. Minerais no solo. 4. Alumínio. 5. Plantas - melhoramento genético. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Biologia Geral. Programa de Pós-graduação em Genética e Melhoramento. II. Título.

CDD 22. ed. 633.61

***E assim trabalharemos com alegria e gratidão,
realizando bem as pequenas tarefas, quando
demonstraremos ser dignos das grandes.***

***Patrícia
Psicografia de Vera Lúcia Marinzeck de Carvalho***

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas minhas conquistas e por iluminar meu caminho.

À Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Biologia Geral, Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudo e à Fundação de Amparo à Pesquisa do estado de Minas Gerais (Fapemig).

Ao professor Leonardo Lopes Bhering pela enorme contribuição, apoio e confiança nesta orientação.

A toda minha família, meus pais Gilberto Barros de Brito e Marilda Aparecida Maia, ao meu tio Waldete de Carvalho Brito, pelo incentivo e pela enorme ajuda em minha vida. Aos meus irmãos Betinho, Lélis e Gabriel, grandes companheiros. À minha esposa Alessandra pelo amor, carinho e paciência durante todo este tempo.

Aos amigos do laboratório de microssatélite Karla, Telma, Cleverson e Alberto pelos momentos de descontração e alegria. À Geísa pelos três anos de companheirismo, muita extração de DNA, géis de poliacrilamida e muitos SNPs. Ao amigo Éder pela amizade construída e os momentos compartilhados de alegria. Ao Paulinho que muito trabalhou e contribuiu para os resultados serem alcançados. Aos amigos, Haroldo, Angélica, Gustavo e Fernando gaúcho. A todos do futebol da rua nova, em especial ao Tadeu, Guilherme e muitos outros. Ao pessoal do programa milho-pipoca UFV, Manu, Yasmim, Leo, Vinicius, em especial ao Gabriel pelos trabalhos desenvolvidos juntos. Ao pessoal do Programa de Melhoramento Genético de cana-de-açúcar da UFV, em especial ao Paulinho, David e ao Júnior. E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

CONTEÚDO

RESUMO.....	v
ABSTRACT.....	vi
INTRODUÇÃO.....	1
MATERIAL E MÉTODOS.....	4
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
CONCLUSÕES.....	19
REFERÊNCIAS.....	20

RESUMO

BRITO, Ciro Maia de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2014. **Variabilidade genética em cana-de-açúcar na tolerância ao alumínio.** Orientador: Leonardo Lopes Bhering. Coorientadores: Felipe Lopes da Silva e Márcio Henrique Pereira Barbosa.

O alumínio tóxico presente em solos tropicais é um problema para produção agrícola. Entretanto, pouco se sabe sobre seus efeitos em cana-de-açúcar. Os objetivos deste trabalho foram determinar a relação entre os caracteres relacionados com o estresse de alumínio e identificar genótipos de cana-de-açúcar tolerantes e sensíveis ao estresse de alumínio. Foram avaliados 11 genótipos com e sem estresse de Al. O estresse de Al causou redução em mais da metade da massa da planta seca e da parte aérea seca. No sistema radical, esse estresse, reduziu as raízes axiais e aumento a formação de raízes laterais. Os genótipos 2, 9 e 10 produziram massa total seca acima da média nos dois ambientes, enquanto os genótipos 4, 5, 7 e 8 produziram abaixo da média. O genótipo 2 se destacou na produção de raízes laterais nos dois ambientes. Em contraste, sob estresse de Al, o genótipo 8 teve o comprimento de raiz lateral reduzido à metade. Houve diferença entre os genótipos no acúmulo de Al na raiz e na parte aérea, indicando diferentes mecanismos de tolerância ao Al dos genótipos. Em condições normais, o efeito direto do teor de Al na raiz e o comprimento de raiz axial foram os maiores e no sentido de reduzir a massa da parte aérea seca. O efeito indireto da massa de raiz seca via teor de Al na raiz, também foi no sentido de reduzir a massa da parte aérea seca. Em estresse MRS e CLR possui efeito direto em sentido favorável sobre MPAS. Pela análise discriminante, considerando o conjunto de características avaliadas, foi possível agrupar os genótipos 2, 4 e 11 como tolerantes ao Al, os genótipos 8, 9 e 10 como sensíveis e os demais com desempenho inconsistente. Diante do exposto o uso de genótipos tolerantes ao alumínio será uma grande oportunidade para produção de cana-de-açúcar em regiões com esse estresse. A identificação de genótipos contrastantes será importante para os programas de melhoramento.

ABSTRACT

BRITO, Ciro Maia de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July 2014. **Sugarcane genetic variability for aluminum tolerance.** Advisor: Leonardo Lopes Bhering. Co-advisors: Felipe Lopes da Silva and Márcio Henrique Pereira Barbosa.

The growing of arable land increasingly requires the development of genotypes that have higher productivity and are able to develop in stress environments. The objectives of this study were to investigate the relationship between variables related to the stress of Al and identify sugarcane genotypes tolerant and sensitive in Al stress. The experiment was conducted with 11 genotypes that were evaluated in two environments, with and without Al stress. The Al stress caused a reduction, by more than half, in the dry plant and shoot dry mass. The axial roots were reduced and the lateral roots were increased in stress condition. The genotypes 2, 9 and 10 produced MTS above average in both environments, while genotypes 4, 5, 7 and 8 were below average. The genotype 2 excelled in the production of lateral roots in both environments. In contrast, genotype 8 reduced about half the CRL under stress. There was a difference among genotypes for Al accumulation in root and shoot, indicating different mechanisms of Al tolerance in genotypes. Under normal conditions the direct selection for ALR and CRA were the largest and the unfavorable direction of the SDW and indirect selection for ALR via MRS also has an unfavorable direction for MPAS. In MRS stress and CLR has a direct effect on favorably on MPAS. Through the discriminant analysis and considering the set of characteristics evaluated, we can group together the genotypes 2, 4 and 11 as tolerant to Al, genotypes 8, 9 and 10 as sensitive to Al and others with inconsistent performance. These groups can be used for future breeding process.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é cultivada em aproximadamente 23 milhões de hectares em mais de 100 países tropicais e subtropicais. Atualmente, a cana-de-açúcar e seus derivados são a segunda principal fonte de energia primária da matriz energética nacional (Brasil, 2009). Diante da expectativa de crescimento populacional e da demanda mundial crescente pela produção de energia renovável é necessária a expansão da produção em novas áreas agrícolas com inclusão de regiões com condições menos favoráveis à produção agrícola (Vance et al. 2003, Godfray et al. 2010).

A área de cana-de-açúcar plantada na safra de 2013/14 foi de aproximadamente 8,8 milhões de hectares, um crescimento de 3,84% em relação à safra anterior e a previsão de crescimento para a safra de 2014/15 é de 7,6% (Conab, 2014). As novas áreas de expansão da cultura compreendem principalmente regiões do Cerrado e áreas de pastagens degradadas, caracterizadas em sua maioria por solos intemperizados de baixa fertilidade e/ou de elevada acidez (Souza et al., 2007).

Na condição de baixo pH ($\text{pH} \leq 5,5$), o Al é solubilizado e permanece na solução do solo como elemento fitotóxico (Al^{3+}). A presença desse elemento pode provocar a fixação do fósforo no solo para formas menos disponíveis para as plantas, diminuir a taxa de respiração da planta e modificar a dinâmica de absorção e translocação de água e nutrientes pela planta. Esses inconvenientes resultam em diminuição do crescimento, queda de produtividade e qualidade da planta (Kochian, 1995).

O primeiro sintoma da toxicidade do Al é a rápida inibição do crescimento radical, sobretudo em condições de déficit hídrico ou limitação de fósforo. O resultado dessa toxidez de Al é a baixa absorção de água e nutrientes minerais, em razão da redução da área superficial de exploração do sistema radical (Foy, 1976; Kochian et al., 2004, Rosiello e Jacob Netto, 2006). A maior parte do Al absorvido permanece nas raízes, mas uma pequena proporção pode ser translocada para as folhas (Kochian et al., 2004). Alguns dos efeitos do Al sobre o processo fotossintético são aparentemente iniciados como consequência de seus efeitos tóxicos manifestados primariamente na raiz. Alguns estudos mostram que o Al interfere na absorção e/ou o transporte de

nutrientes minerais essenciais para as folhas (Giannakoula et al., 2008), resultando em baixas taxas de assimilação líquida de CO₂ e reduzido acúmulo de biomassa (Jiang et al., 2008).

A tolerância da planta ao Al está relacionada à capacidade da planta de continuar a divisão e alongação celular e à possibilidade dela manter áreas meristemáticas viáveis à formação de novos tecidos sob condições de estresse (Foy et al., 1984). As plantas podem resistir ao Al tóxico por dois mecanismos principais. Primeiro, ao evitar o Al tóxico antes da entrada na planta, mecanismo de exclusão do Al. Segundo, ao complexar o Al nas células, mecanismos de tolerância (Inostroza-Blancheteau et al. 2012, Simões et al. 2012).

No mecanismo de exclusão há exsudação de ácidos orgânicos pelo ápice radical na presença de Al ativado. Entre esses ácidos orgânicos está o malato, que é exsudado pelas raízes de tabaco em presença de Al (Delhaize et al. 1993), o citrato, pelas raízes de milho (Kollmeier and Horst 2001, Piñeros et al., 2002), centeio (Ma et al. 2000, Stass et al. 2008) e soja (Silva et al. 2001); e o oxalato pelas raízes de milho (Kidd et al., 2001). Trejo-Tellez et al. (2010) relataram que a superexpressão de piruvato fosfato diquinase (PPDK) em raízes de tabaco aumenta a exsudação de ânions de ácidos orgânicos, com forte decréscimo no acúmulo de Al na planta.

No mecanismo de tolerância, o Al entra no citoplasma da célula onde é desintoxicado pela complexação com ácidos orgânicos e proteínas componentes orgânicos (Kochian, 1995, Simões et al. 2012). Al⁺³ livre ou Al complexado pode ser transportado para o vacúolo celular, onde são estocados sem causar toxicidade (Kochian et al., 2004). Esse mecanismo de tolerância das plantas à solos ácidos e com elevada concentração de Al tóxico envolve interações complexas que são controladas por muitos genes e fatores de transcrição (Inostroza-Blancheteau et al. 2012).

A cana-de-açúcar por ser cultivada em sistema semiperene e permanecer por longo período no mesmo local (em média cinco cortes), o solo sofre intensa acidificação devido ao uso de doses elevadas de fertilizantes. Dessa forma, a seleção de plantas tolerantes ao Al é uma alternativa viável para assegurar uma produção agrícola satisfatória em solos ácidos com altas concentrações de Al.

O desenvolvimento de cultivares de plantas que apresentem alta produtividade e se desenvolvem em ambientes pouco favoráveis é um dos objetivos de programas de melhoramento, pois a cada dia novos ambientes pouco favoráveis são explorados e condições diversas de produção exigem materiais diversificados para atender aos anseios do produtor.

O uso de material genético tolerante ao alumínio pode oferecer importantes subsídios ao programa de melhoramento genético e à recomendação de cultivares visando ao melhor aproveitamento de solos ácidos. Todavia, pouco se sabe sobre a variabilidade genética existente no germoplasma e dos mecanismos fisiológicos e bioquímicos que possam ser utilizados como indicadores das respostas ao estresse ao alumínio em cana-de-açúcar.

Sobral e Guimarães (1992) estabeleceram graus de toxidez do Al na forma trocável e sua porcentagem de saturação para a cana-de-açúcar, mas sem apresentar conclusões acerca da resposta diferencial de cultivares ao estresse de Al. Azeredo (1982) observou que 1,56 ppm de Al causou uma inibição do crescimento radical em alguns genótipos de cana. Landell (1989) trabalhou com genótipos de cana-de-açúcar e observou uma grande variabilidade quanto à sensibilidade ao Al. Esse estresse causou grande redução no crescimento radical em alguns genótipos do gênero *Saccharum spontaneum* enquanto genótipos do gênero *Saccharum officinarum* exibiram maiores níveis de tolerância. Rowland (2006) investigou a influência do estresse de Al na absorção e nutrição da cana-de-açúcar com duas fontes de nitrogênio (NO^{3-} e NH^{4+}). Os genótipos foram mais tolerantes ao Al com a fonte NH^{4+} que com NO^{3-} . Os autores sugerem que isso foi, em partes, devido ao suficiente fornecimento de carbono da fotossíntese para lidar com o desafio simultâneo de assimilar o NH^{4+} e a desintoxicação do Al. O fato de o NH^{4+} e Al aumentarem o crescimento de raízes pode indicar que o NH^{4+} e os cátions de Al competem pelo mesmo acesso ao tecido radical.

Carlin e Santos (2009) avaliaram a interação dos estresses de Al e água no genótipo de cana-de-açúcar IAC91-5155, recomendado como resistente à seca. Os autores observaram que mesmo com a presença de substâncias osmoprotetoras (substâncias que mantêm o equilíbrio hídrico e integridade das membranas, proteínas e enzimas) como a prolina, houve redução na produção de biomassa em estresse de Al. Oliveira (2012) avaliou nove genótipos de cana-de-açúcar submetidos a estresse de

Al. Os genótipos apresentaram no ápice radical, produção de mucilagem, perda de células epidérmicas da coifa, desintegração da coifa e coloração parda. A taxa de alongamento radical foi a variável que mais contribuiu para avaliação da tolerância das variedades ao Al e dependem da interação entre genótipo e a concentração de Al. Além dos efeitos do Al na morfologia e desempenho de genótipos, vários trabalhos tentam elucidar as principais causas da tolerância das plantas ao Al. Chaffai e Marzouk (2009) avaliaram o papel dos ácidos orgânicos em estresse de Al em milho exposto ao estresse a curto (1-8 h) e a longo prazo (quatro dias). O estresse de Al induziu mudanças no sistema radical proporcional às concentrações de Al e consequentemente uma redução na biomassa. Além disso, a indução de exsudação de citrato pela presença de Al, associado com elevados teores de Al acumulados na parede celular da raiz, pode estar envolvido na elevada resistência do milho ao Al.

Estudos sobre estresse de Al em cana-de-açúcar ainda são escassos, principalmente para selecionar genótipos contrastantes para utilização em programas de melhoramento. Logo, estudos para tolerância ao Al utilizando germoplasma em uso nos cruzamentos do programa de melhoramento de cana-de-açúcar tornam-se necessários.

Os objetivos deste estudo foram determinar a relação entre os caracteres relacionados com o estresse de alumínio e identificar genótipos de cana-de-açúcar tolerantes e sensíveis ao estresse de alumínio.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Material vegetal

Os genótipos de cana-de-açúcar foram obtidos do banco de germoplasma do Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-açúcar – PMGCA da Universidade Federal de Viçosa/UFV mantido no Centro de Pesquisa e Melhoramento da Cana-de-Açúcar (CECA) - UFV, localizado em Oratórios-MG. Foram avaliados 11 genótipos RB966928 (G1), RB867515 (G2), RB937570 (G3), RB957610 (G4), RB93509 (G5), RB92579 (G6), RB008041 (G7), SP801842 (G8), SP813250 (G9), RB935744 (G10) e RB928064 (G11) (Tabela 1). Esses genótipos são cultivares e clones que ocupam

extensa área de cultivo no Brasil e/ou são utilizados como genitores nos principais programas de melhoramento (Barbosa et al., 2012).

Tabela 1: Descrição das cultivares e clone de cana-de-açúcar.

Genótipo	Cultivar	Descrição
1	RB966928	Cultivar para ambientes de médio a alto potencial, com colheita no início a meio de safra. Excelente brotação em cana-planta e em soqueiras. Possui elevada sanidade às principais doenças.
2	RB867515	Cultivar se destaca em ambientes de média fertilidade natural, colheita em meados de julho até setembro. Alto teor de sacarose e alta produtividade agrícola. Excelente desenvolvimento, com boa brotação na planta e socas. Excelente desempenho em solos de textura arenosa.
3	RB937570	Plantar em ambientes com bom potencial, colheita a partir de maio a agosto. Alto teor de sacarose e média a alta produtividade agrícola, boa sanidade e excelente brotação em cana-planta e em soqueiras, com bom desempenho no corte mecanizado.
4	RB957610	Cultivar precoce, colheita início de safra, alto teor de açúcar, porém produtividade baixa. Ótima brotação de soqueiras, boa resistência às principais doenças.
5	RB93509	Cultivar recomendada para meio e final de safra. Alta produtividade agrícola. Boa brotação de socaria e rápido crescimento vegetativo.
6	RB92579	Cultivar para colheita no meio de safra. Ótimo perfilhamento e brotação de socaria, alta produtividade agrícola, elevado ATR e rápida recuperação ao estresse hídrico.
7	RB008041	Clone. Maturação média, colheita do meio a final de safra, média produtividade, bom perfilhamento e brotação de soqueiras, suscetível à escaldadura.
8	SP80-1842	Cultivar para ambientes de média a alta fertilidade do solo. Maturação precoce, brotação em soca sem restrição, boa tolerância ao estresse hídrico e suscetível a nematoides.
9	SP81-3250	Cultivar para ambientes de alta fertilidade do solo, maturação média, colheita do meio para o final de safra. Bom desempenho em colheita mecânica, sem restrição na brotação de soca, suscetível a nematoides.
10	RB935744	Cultivar para ambientes de médio a bom potencial; colheita no final de safra; material rústico, excelente sanidade e muito produtivo.
11	RB928064	Cultivar para ambientes de médio a alto potencial, para colheita no final de safra, quando atinge bom teor de sacarose e alta produtividade agrícola. Boa sanidade e excelente brotação em cana-planta e em soqueiras, florescimento raro e interior excelente.

Fonte: Programa de Melhoramento Genético de Cana-de-açúcar da Universidade Federal de Viçosa.

2.2 Condição experimental

O experimento foi conduzido em casa de vegetação localizada no campo experimental Diogo Alves de Melo, pertencente ao Departamento de Fitotecnia da UFV, Viçosa-MG (648 m de altitude; 20°45' S de latitude; e 42°52' W de longitude).

Os colmos dos genótipos foram cortados em toletes com uma gema cada e plantados em bandejas contendo mistura de vermiculita e substrato comercial Plantmax® na proporção 1:1. Após 16 dias de germinação, plântulas uniformes foram selecionadas e transferidas para vasos de PVC (10 cm de diâmetro por 50 cm de altura), com 7 dm³ de substrato. O substrato consistiu da mistura de areia e solo ácido (obtido no Banco de Solos da UFV) na proporção 1:1. Os nutrientes essenciais foram adicionados de acordo com a adubação recomendada para a cultura de acordo com Malavolta et al. (1997) via solução nutritiva, contendo 0,3M NH₄NO₃, 0,43M K₂SO₄, 0,74M NH₄H₂PO₄, 3,88mM FeSO₄.7H₂O, 6,59mM MnCl₂.4H₂O, 2,40mM H₃BO₃, 3,19mM ZnCl₂, 0,26mM CuSO₄.5H₂O e 0,15mM (NH₄)₆MO₇O₂₄.4H₂O, particionada em seis aplicações. A umidade do solo foi mantida entre 80 e 90% da capacidade máxima de retenção por meio de irrigação diária com água deionizada.

Foram avaliados 11 genótipos em dois ambientes. Um ambiente sem estresse de Al, com 0% de saturação de Al (Ambiente 1) e outro caracterizando o estresse com 53% de saturação de Al (Ambiente 2). Segundo Sobral e Guimarães et al. (1992) esse valor de saturação por Al é elevado para a cana-de-açúcar. Portanto, caracteriza o ambiente de estresse. O delineamento adotado foi o de blocos casualizados com três repetições. A parcela experimental foi constituída por uma planta por vaso de PVC. As características químicas do solo utilizado para caracterizar os dois ambientes de cultivo estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Resultados da análise química do solo, proveniente de amostras dos dois ambientes antes do plantio.

Análise		Ambiente 1	Ambiente 2
	pH H ₂ O	6,29	4,49
	pH KCl	5,70	4,42
P	mg/dm ³	5,90	10,90
K	mg/dm ³	8,00	6,67
Na	mg/dm ³	3,03	2,37
Ca ²⁺	cmolc/dm ³	2,81	0,28
Mg ²⁺	cmolc/dm ³	0,86	0,36
Al ³⁺	cmolc/dm ³	0,00	0,77
H + Al	cmolc/dm ³	2,17	5,37
SB	cmolc/dm ³	3,70	0,67
t	cmolc/dm ³	3,70	1,44
T	cmolc/dm ³	5,86	6,04
V	/	63,17	11,17
m	/	0,00	53,67
ISNa	/	0,23	0,18
MO	dag/Kg	1,58	1,71
P-Rem	mg/L	21,53	18,43
Zn	mg/dm ³	3,09	1,88
Fe	mg/dm ³	199,63	233,27
Mn	mg/dm ³	34,03	15,47
Cu	mg/dm ³	11,77	3,61

Ambiente 1: Sem estresse de Al; Ambiente 2: Com estresse de Al. pH em água, KCl e CaCl₂ – Relação 1:2,5. P, Na, K, Fe, Zn, Mn e Cu – Extrator Mehlich 1. Ca, Mg, Al – Extrator KCl 1mol/L. H+Al – Extrator acetato de cálcio 0,5 mol/L, pH 7,0. B – Extrator água quente. S – Extrator Fosfato monocálcico em ácido acético. SB – Soma de bases trocáveis. CTC (t) – Capacidade de troca catiônica efetiva. CTC (T) – Capacidade de troca catiônica a pH 7,0. V – Índice de saturação de bases. m – Índice de saturação de Alumínio. ISNa – Índice de saturação de sódio. Matéria orgânica (MO) – Walkley-Black. P-rem – Fósforo Remanescente.

2.3 Avaliação Fenotípica

As plantas foram colhidas aos 90 dias após o transplântio. A parte aérea foi separada do sistema radical e secas em estufa com ventilação forçada a 70°C por 72h para determinar a massa da parte aérea seca (MPAS, g). As raízes foram lavadas em água corrente e armazenadas em etanol 50%. O sistema radical foi avaliado pela análise de imagens usando o software WinRHIZO Pro 2009a (Basic, Reg, Pro & Arabidopsis for Root Measurement) acoplado a um scanner Epson Perfection V700/V750 equipado com luz adicional na resolução de 400 dpi, como descrito por Bouma et al. (2000). O comprimento do sistema radical foi dividido por classe de

diâmetro (d), em raízes laterais (CRL, $d \leq 0,5$ mm) e raízes axiais (CRA, $d > 0,5$ mm) (Trachsel et al., 2009). Após a avaliação, as raízes foram secas em estufa com ventilação forçada a 70°C por 72h para determinar a massa de raiz seca (MRS, g) e a massa total da planta seca (MTS, g). Após a mensuração das massas, foi avaliado o teor de Al na raiz (ALR, dag kg^{-1}) e teor de Al na parte aérea (ALPA, dag kg^{-1}) de acordo com Fonseca Júnior et al. (2014).

2.4 Análise estatística

Na análise de variância foi considerado o seguinte modelo e todos os efeitos como fixos, $Y_{ijk} = \mu + B/A_{jk} + G_i + A_j + GA_{ij} + E_{ijk}$, onde, Y_{ijk} é a observação do genótipo i , no nível de Al j e bloco k ; μ é a média geral; B/A_{jk} é o efeito de bloco k dentro de ambiente j ; G_i é o efeito de genótipo i ; A_j é o efeito devido ao nível de Al j ; GA_{ij} é o efeito de interação entre o genótipo i e o nível de Al j , e E_{ijk} é o efeito residual da observação Y_{ijk} .

As estimativas dos coeficientes de correlação fenotípica foram obtidas pelo método de Pearson, entre características mensuradas e testadas quanto à sua significância pelo teste t , a 1, 5 e 10% de probabilidade. As estimativas dos efeitos diretos e indiretos foram obtidas por meio da análise de trilha, conforme Wright (1921), citado por Cruz et al. (2004). As variáveis MRS, CRL, CRA, ALR e ALPA foram consideradas independentes explicativas e a MPAS como a variável dependente principal, a qual representa a maquinaria fotossintética da planta. O diagnóstico de multicolinearidade na matriz de correlação foi obtido de acordo com os critérios indicados por Montgomery & Peck (1981), resultando em colinearidade fraca.

Os genótipos foram classificados no ambiente de estresse de Al pela análise multivariada, utilizando a função discriminante de acordo com Anderson (1958). A finalidade foi classificar genótipos de comportamento desconhecido em grupos conhecidos, fazendo-se uso simultâneo das características avaliadas.

Sejam, π_1 e π_2 : populações 1 e 2, tolerantes e sensíveis ao Al, respectivamente; u_1 e u_2 : vetor de médias dos p caracteres avaliados ($p=6$) na população π_1 e π_2 , respectivamente; Σ_1 , Σ_2 : matriz de covariância entre os caracteres avaliados na

população π_1 e π_2 , respectivamente. Considerando que há homogeneidade das matrizes de covariância Σ_1 e Σ_2 , obtém-se a matriz Σ que é obtida a partir de Σ_1 e Σ_2 , levando-se em consideração os respectivos graus de liberdade. Sendo x o vetor de variáveis representativas dos caracteres envolvidos na análise, obtêm-se as seguintes funções discriminantes:

$$Dt(x) = \ln(p_1) + (x - \frac{1}{2} u_1) \Sigma^{-1} u_1 \text{ e } Ds(x) = \ln(p_2) + (x - \frac{1}{2} u_2) \Sigma^{-1} u_2$$

em que, $Dt(x)$ e $Ds(x)$ são as funções discriminantes que possibilitam a obtenção de escores para a classificação dos genótipos nas populações π_1 e π_2 , consideradas tolerantes e sensíveis ao AI, respectivamente, e p_1 e p_2 são as probabilidades, *a priori*, de os genótipos pertencerem às populações π_1 e π_2 respectivamente. As probabilidades *a priori* foram consideradas iguais a 0,5, por não ter informação prévia do comportamento do genótipo a ser classificado. Os genótipos foram classificados por repetição. Assim, classificou-se determinado genótipo como tolerante ao AI se $Dt(x)$ foi maior que $Ds(x)$, e sensível, em caso contrário.

Todas as análises foram realizadas utilizando o programa computacional GENES (Cruz, 2013).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise experimental e desempenho dos genótipos

As variâncias residuais entre os ambientes foram homogêneas, possibilitando a realização da análise de variância conjunta sem ajuste de graus de liberdade. Houve diferenças significativas entre as médias dos genótipos para todas as características, exceto para MTS, indicando a existência de variabilidade genética entre genótipos (Tabela 3). Houve efeito significativo de ambiente sobre todas as características, exceto sobre CRA e ALPA, indicando que as condições foram adequadas para avaliação do estresse de AI em cana-de-açúcar. A interação GxA foi significativa para todas as características, exceto MPAS, MRS e MTS.

Tabela 3: Resultado da análise de variância conjunta para as características relacionadas ao estresse de Al em 11 genótipos de cana-de-açúcar em ambientes sem (Amb 1) e com estresse Al (Amb 2).

FV	GL	MPAS	MRS	MTS	CRL	CRA	ALR	ALPA
Blocos/Amb	4	938,7	2,2	896,3	623771,9	9954,3	0,1	3,0E-05
Genótipos	10	973+	44**	884ns	507188*	14700*	1,03**	1,5E-4**
Ambientes	1	29646**	188**	34559**	2818078+	16810ns	0,85*	01,0E-4ns
GenxAmb	10	340ns	4,3ns	419ns	502574*	21909**	0,57**	1,0E-4**
Gen/Amb 1	10	975ns	21,3+	893ns	203097ns	5119ns	0,81**	1,5E-5**
Gen/Amb 2	10	387ns	26,6*	410ns	806665**	31490**	0,80**	1,0E-4**
Resíduo	40	557	12	624	184156	7046	0,1	2,0E-05

MPAS, massa da parte aérea seca; MRS, massa de raiz seca; MTS, massa total seca; CRL, comprimento de raiz lateral; CRA, comprimento de raiz axial; ALR, teor de Al na raiz; ALPA, teor de Al na parte aérea.

ns, não significativo; **, * e + significativo a $P < 0,01$, $P < 0,05$ e $P < 0,10$ de probabilidade, respectivamente.

O ambiente com estresse de Al proporcionou aos genótipos uma redução da média em todas as características, exceto para CRL e ALPA. A MPAS teve uma maior redução devido ao estresse de Al (44/). As plantas submetidas ao estresse de Al tiveram redução de apenas 8,6/ no CRA e um aumento de 27/ no CRL. A média do teor de Al foi praticamente a mesma nos dois ambientes (Tabela 4).

Tabela 4: Médias e diferença mínima significativa das características nos ambientes com estresse de Al e sem estresse de Al.

Médias	MPAS	MRS	MTS	CRL	CRA	ALR	ALPA
Média Amb 1	95,6	13,6	109,2	1516,1	369,7	1,6	0,02
DMS(5/)	87,9	9,7	90,9	1089,4	233,7	0,9	0,011
DMS(1/)	106,5	11,7	110,1	1319,6	283,1	1,1	0,014
Média Amb 2	53,2	10,2	63,45	1929,4	337,8	1,3	0,02
DMS(5/)	44,2	10,4	51,1	1420,9	260,9	1,0	0,015
DMS(1/)	53,6	12,6	61,9	1721,2	316,0	1,2	0,018
Média Geral	74,4	11,9	86,3	1722,8	353,8	1,4	0,02
CV(/)	31,7	28,7	28,9	24,9	23,7	21,9	28,5

Amb 1- ambiente sem estresse de Al; Amb 2-ambiente com estresse de Al; DMS-Diferença significativa pelo teste de Tukey a 1 e 5/ de probabilidade; CV(/)-Coeficiente de variação.

Os genótipos que obtiveram desempenho acima da média nos dois ambientes, acima da média apenas na condição de estresse, abaixo da média nos ambientes e acima da média apenas no ambiente sem estresse, são alocados nos quadrantes 1, 2, 3 e 4, respectivamente (Figura 1).

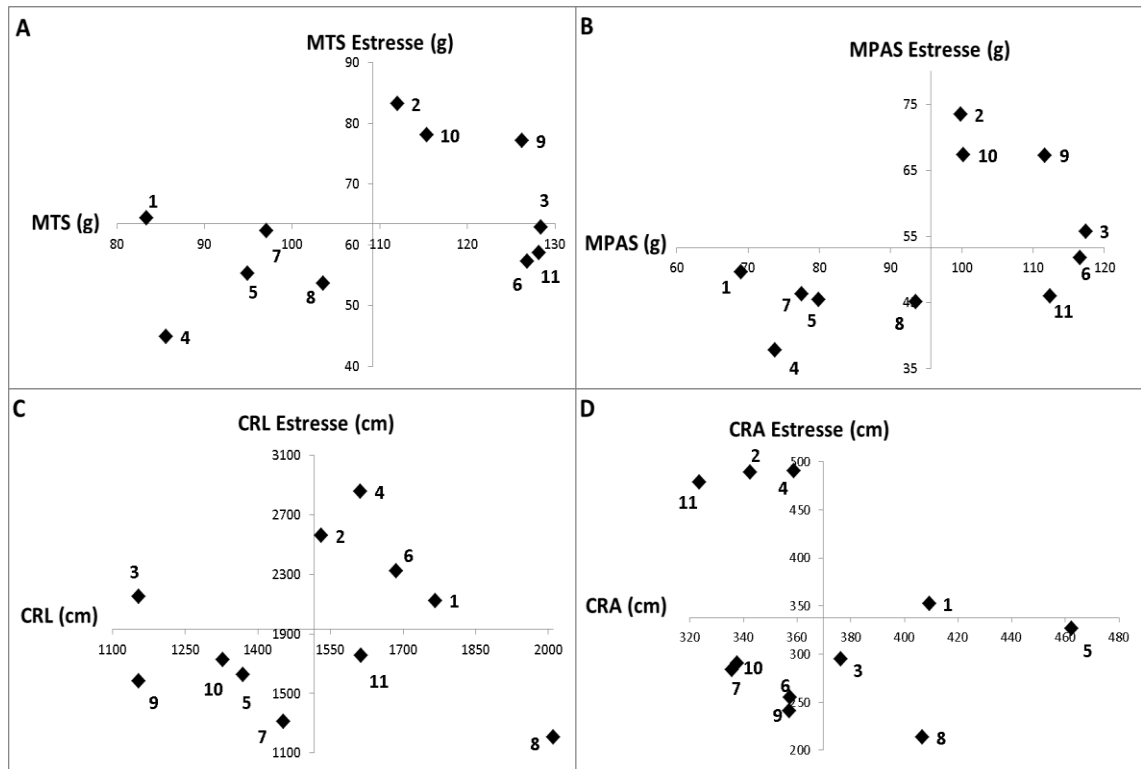


Figura 1: Dispersão das médias de 11 genótipos de cana-de-açúcar avaliados para as características relacionadas ao estresse de AI, em ambiente com condições normais (Eixo X) e com estresse de AI (Eixo Y). Os eixos se interceptam na média da característica. MTS, massa total seca (g); MPAS, massa parte aérea seca (g); CRL, comprimento de raiz lateral (cm); CRA, comprimento de raiz axial (cm).

Os genótipos 2, 9 e 10 produziram elevada MTS nos dois ambientes. Em contraste, os genótipos 4, 5, 7 e 8 foram os que menos produziram MTS nos dois ambientes. Os genótipos 3, 6, 9 e 11 produziram maior MTS no ambiente sem estresse, em contraste, os genótipos 1 e 4 produziram, aproximadamente, 34% menos MTS no mesmo ambiente. O genótipo 2 produziu quase o dobro de MTS no ambiente com estresse de AI, que o genótipo 4, que teve a menor produção de biomassa. A classificação dos genótipos também foi semelhante para a MPAS (Figura 1A e B). Para a produção de biomassa em um ambiente com estresse de AI, os genótipos 2, 9 e 10 são de melhor desempenho, o contrário é observado para os genótipos 4 e 8.

Em relação ao CRL, os genótipos 1, 2, 4 e 6, se destacaram na produção de raízes laterais nos dois ambientes. Já os genótipos 5, 7, 9 e 10 tiveram menor produção de raízes laterais nos dois ambientes.

Em estresse de Al os genótipos 7 e 8 produziram, aproximadamente, a metade de raízes laterais, que os genótipos 2 e 4. Entretanto, sem estresse de Al, o genótipo 8 produziu o maior CRL e os genótipos 3 e 9 os menores. Nenhum genótipo obteve uma produção expressiva de raízes axiais (CRA) nos dois ambientes simultaneamente, com exceção do genótipo 1, o qual apresentou uma discreta produção acima da média no ambiente com estresse de Al. Os genótipos 2, 4 e 11 produziram mais raízes axiais sob estresse e os genótipos 3, 5 e 8 produziram mais em condição sem estresse de Al (Figura 1C e D).

Existe uma clara diferença no comportamento dos genótipos em estresse de Al. O genótipo 2 produz elevada parte aérea e raízes, o genótipo 4 não produz tanta parte aérea, porém tem grande produção de raízes. Em contraste, o genótipo 9 produz elevada parte aérea e baixa formação de raízes. O genótipo 8, que apresentou baixo desempenho, não produz nem parte e nem raízes de forma expressiva.

O teor de Al no sistema radical e na parte aérea dos genótipos em estresse de Al está representado na Figura 2. O genótipo 1 acumulou maior teor de Al na raiz e na parte aérea. Os genótipos 7 e 8 apresentaram maior teor de Al na raiz e abaixo da média na parte aérea. Os genótipos 6, 9 e 10 acumularam menor teor de Al na raiz e maior teor na parte aérea, indicando grande translocação do Al da raiz para a parte aérea. Mesmo assim foram eficientes na produção de biomassa. Isso pode estar relacionado com o mecanismo de desintoxicação interna do Al. O Al entra no citoplasma e, uma vez no interior da célula, é desintoxicado pela complexação com componentes orgânicos (Kochian, 1995). Em milheto, por exemplo, 80% do Al nas folhas são estocados no vacúolo em complexos Al-oxalacetato (Shen et al., 2002). Por outro lado, os genótipos 2 e 5 acumularam Al acima da média na raiz e apresentaram baixos teores na parte aérea, indicando que o elemento ficou quase restrito aos tecidos radicais, com pouca translocação para a parte aérea. Os genótipos 3, 4 e 11 não tiveram um acúmulo expressivo de Al na parte e nem na raiz. Isso pode indicar que esses genótipos possuem genes associados ao mecanismo de tolerância/exclusão do Al. A exclusão pode ocorrer de diferentes maneiras. O complexo Al-carboxilato não é transportado para dentro das raízes ou através das membranas das raízes, as taxas de Al-ativado carboxilado liberados são dose-dependente da atividade do Al na rizosfera. Isso indica que o ambiente de estresse foi suficiente para ativar esse mecanismo nos

genótipos de cana-de-açúcar. Outra possibilidade seria a superexpressão de genes que codificam enzimas envolvidas na síntese de ácidos orgânicos, o que resulta em um aumento da tolerância ao Al (Kochian, 2005). Muitos autores relataram uma forte correlação entre exsudação de Al-ativado com carboxilados e tolerância ao Al em gramíneas, tais como a exsudação de citrato em arroz (Ishikawa et al. 2000), sorgo (Magalhães 2002), milho (Piñeros et al. 2002), de malato em trigo (Papernik et al. 2001), de citrato e malato em aveia (Zheng et al. 1998a).

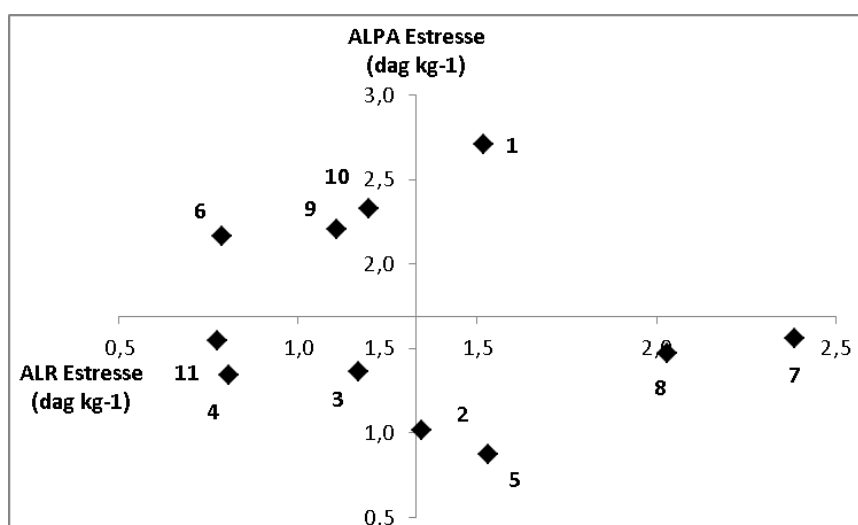


Figura 2: Dispersão das médias de 11 genótipos de cana-de-açúcar avaliados em estresse de Al. ALR, teor de Al na raiz (dag kg⁻¹); ALPA, teor de Al na parte aérea (em 100; dag kg⁻¹). Diferença mínima significativa com Tukey a 1 e 5% de probabilidade para ALPA, 1,8 e 1,5; para ALR, 1,16 e 0,96.

3.2 Correlações e análise de trilha

Apenas as correlações entre MTS e MPAS e entre ALR e CRL foram significativas nos dois ambientes (Tabela 5). No ambiente sem estresse de Al, a correlação entre ALR e MPAS (-0,57) e entre ALPA e MRS (0,53) foram significativas e de magnitudes medianas. Esses resultados indicam que em condições adequadas de nutrientes e ausência de Al trocável, a planta tende a manter produção adequada de biomassa aérea, uma vez que há baixa ou ausência de absorção do elemento fitotóxico pelo

sistema radical (correlação negativa entre ALR e MPAS). A presença de Al na parte aérea não foi, de modo geral, impedimento para o desenvolvimento adequado do sistema radical, como pode ser observado pela correlação positiva entre ALPA e MRS.

No ambiente com estresse de Al, as correlações entre CRL e CRA, CRL e ALR e entre ALR e MRS foram significativas e de magnitude mediana (0,64, -0,64 e 0,58, respectivamente). Houve correlação negativa entre comprimento de raiz e produção de massa pela planta. Esses resultados indicam uma provável tendência da planta investir em produção de mais raízes para substituir o tecido radicular lesionado pelo elemento fitotóxico (correlação positiva entre ALR e MRS). A correlação negativa entre ALR e CRL pode ser explicada indiretamente como resposta à presença do Al no sistema radical, resultando em engrossamento das raízes.

Tabela 5: Correlação fenotípica entre as características relacionadas ao estresse de Al em 11 genótipos de cana-de-açúcar, ambiente com estresse de Al (abaixo da diagonal) e ambiente sem estresse (acima da diagonal).

	<i>MPAS</i>	<i>MRS</i>	<i>MTS</i>	<i>CRL</i>	<i>CRA</i>	<i>ALR</i>	<i>ALPA</i>
MPAS	-	-0,36	0,99**	-0,33	-0,41	-0,57 ⁺	-0,22
MRS	-0,02	-	-0,22	-0,34	-0,19	0,55 ⁺	0,53 ⁺
MTS	0,97**	0,23	-	-0,40	-0,46	-0,51	-0,15
CRL	0,07	-0,43	-0,05	-	0,16	-0,09	-0,06
CRA	-0,08	0,00	-0,08	0,64*	-	-0,14	-0,17
ALR	-0,13	0,58 ⁺	0,03	-0,64*	-0,42	-	0,03
ALPA	0,20	0,31	0,27	-0,08	-0,37	-0,14	-

** , * e ⁺ significativo a P<0,01, P<0,05 e P<0,10 de probabilidade pelo teste t.

A produção de biomassa, bem como a tolerância ao estresse de Al, são características complexas e influenciadas por vários caracteres inter-relacionados. A análise de trilha nos permite avaliar os efeitos diretos e indiretos na quantificação da magnitude e direção das influências de fatores na determinação de características complexas. Os coeficientes de correlação das variáveis explicativas MRS, CRL, CRA, ALR e ALPA sobre a MPAS foram decompostos em efeitos diretos e indiretos (Tabela 6).

Tabela 6: Efeitos diretos e indiretos envolvendo a variável primária dependente MPAS (massa da parte aérea seca, g) e as variáveis independentes MRS (massa de raiz seca, g), CRL (comprimento de raiz lateral, cm), CRA (comprimento de raiz axial, cm), ALR (teor de Al na raiz, dag kg⁻¹), ALPA (teor de Al na parte aérea, dag kg⁻¹) avaliadas em 11 genótipos de cana-de-açúcar sem estresse de Al (AMB1) e com estresse de Al (AMB2).

Variável	Efeito da associação	Estimativas	
		AMB1	AMB2
MRS	DIRETO SOBRE MPAS	-0,10	0,24
	INDIRETO VIA CRL	0,12	-0,09
	INDIRETO VIA CRA	0,10	0,00
	INDIRETO VIA ALR	-0,34	-0,16
	INDIRETO VIA ALPA	-0,14	-0,01
	TOTAL	-0,36	-0,02
CRL	DIRETO SOBRE MPAS	-0,36	0,21
	INDIRETO VIA MRS	0,03	-0,10
	INDIRETO VIA CRA	-0,08	-0,22
	INDIRETO VIA ALR	0,06	0,17
	INDIRETO VIA ALPA	0,02	0,00
	TOTAL	-0,33	0,07
CRA	DIRETO SOBRE MPAS	-0,51	-0,34
	INDIRETO VIA MRS	0,02	0,00
	INDIRETO VIA CRL	-0,06	0,13
	INDIRETO VIA ALR	0,08	0,11
	INDIRETO VIA ALPA	0,04	0,01
	TOTAL	-0,41	-0,08
ALR	DIRETO SOBRE MPAS	-0,61	-0,27
	INDIRETO VIA MRS	-0,05	0,14
	INDIRETO VIA CRL	0,03	-0,13
	INDIRETO VIA CRA	0,07	0,14
	INDIRETO VIA ALPA	-0,01	0,00
	TOTAL	-0,57	-0,13
ALPA	DIRETO SOBRE MPAS	-0,26	-0,03
	INDIRETO VIA MRS	-0,05	0,07
	INDIRETO VIA CRL	0,02	-0,02
	INDIRETO VIA CRA	0,09	0,13
	INDIRETO VIA ALR	-0,02	0,04
	TOTAL	-0,22	0,19
COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO		0,77	0,06
EFEITO DA VARIÁVEL RESIDUAL		0,47	0,97

O elevado coeficiente de determinação e o baixo efeito residual no ambiente sem estresse de Al indicam que a MRS, CRA, ALR e ALPA explicam satisfatoriamente grande parte da variação na MPAS. Entretanto, em estresse de Al, o coeficiente de

determinação foi muito baixo e o efeito residual elevado, o que indica que outras variáveis, não analisadas, podem interferir na variável principal MPAS. Sugere, para trabalhos futuros com estresse de Al em cana-de-açúcar, que outras variáveis além das presentes neste trabalho devem ser mensuradas.

No ambiente sem estresse, os efeitos diretos sobre a variável principal foram negativos. Em condição de estresse de Al o desempenho foi similar, exceto para MRS e CRL. O efeito direto do CRL e MRS sobre a MPAS, 0,24 e 0,21 respectivamente, indica que as características relacionadas com o sistema radical são de grande importância na produção de biomassa pela planta em condição de estresse de Al. Resultado também observado em cana-de-açúcar por Azeredo (1982), Landell (1989) e Oliveira (2012).

Os efeitos indiretos para MPAS, no ambiente sem estresse de Al, apresentaram praticamente as mesmas magnitudes, exceto para MRS via ALR (-0,34) que foi o maior efeito indireto nesse ambiente. Entretanto, com estresse de Al os efeitos indiretos foram maiores. Sendo o maior efeito indireto do CRL sobre a MPAS via CRA (-0,22). Esses resultados indicam que a seleção deve ser realizada em condições de estresse. Ademais, deve-se buscar um desempenho equilibrado entre a produção de biomassa aérea e a produção de raízes.

O efeito direto de MRS sobre MPAS foi negativo (-0,1) e inferior aos efeitos indiretos, evidenciando a baixa contribuição dessa variável para a formação de massa na parte aérea em condições normais. O maior efeito direto, porém de relação negativa sobre a MPAS foi através do teor de Al na raiz (ALR, -0,61). Esse resultado era esperado, uma vez que o acúmulo do Al provoca estresse na planta com efeito na redução da biomassa. Resultado semelhante também ocorreu com o efeito direto de CRA sobre a MPAS (-0,51), em condições normais, confirmando que o equilíbrio na produção de raízes e biomassa aérea é fundamental.

3.3 Análise discriminante

A avaliação em estágios iniciais sob condições de estresse abiótico é um importante passo na condução de um programa de melhoramento focado na eficiência nutricional e/ou tolerância a elementos tóxicos. Para isso, a análise discriminante é uma importante ferramenta para tomada de decisões dos melhoristas.

Os genótipos 2 e 8 devido ao desempenho contrastante em estresse de Al, foram padronizados neste estudo, como tolerante e sensível ao estresse de Al, respectivamente. Com base nos padrões de tolerância e sensibilidade, os demais genótipos, foram classificados, dentre eles os genótipos 2 e 8 foram confirmados como tolerante e sensível ao Al, respectivamente (Tabela 7). Assim, as funções estimadas possuem consistência estatística e as inferências a respeito dos demais genótipos são válidas. As funções estabelecidas poderão ser utilizadas para uma futura classificação de novos genótipos.

Genótipos que possuem as três repetições na mesma classe foram agrupados em tolerante ou sensível ao Al. Caso uma das repetições não fosse classificada como as demais, o genótipo foi classificado como predominantemente sensível ou tolerante. Pela análise discriminante é possível agrupar os genótipos em quatro grupos distintos: genótipos tolerantes (T), 2, 4 e 11; genótipos sensíveis ao Al (S), 8, 9 e 10; genótipos predominantemente tolerantes, 1, 5 e 7; genótipos predominantemente sensíveis, 3 e 6. Dessa forma, os genótipos pertencentes aos grupos extremos, tolerante e sensível, podem ser utilizados como genitores potenciais para formação de populações segregantes para mapeamento de QTL sob estresse de Al. Pouco se sabe sobre estudos de cruzamentos com genótipos contrastantes para estresse abiótico, principalmente com estresse de Al em cana-de-açúcar.

Tabela 7: Classificação dos genótipos de cana-de-açúcar em estresse de Al de acordo com as respectivas estimativas das funções discriminantes, conforme o método de Anderson (1958).

OBS	GEN	REP	Dt(x)	Ds(x)	Grupo	Classe	Classificação
1	1	1	16,17	11,78	1	T	T/S
2	1	2	212,24	206,28	1	T	T/S
3	1	3	-175,57	-172,46	2	S	T/S
4	2	1	201,21	199,45	1	T	T
5	2	2	220,77	219,01	1	T	T
6	2	3	186,72	184,96	1	T	T
7	3	1	150,29	153,57	2	S	S/T
8	3	2	175,27	175,10	1	T	S/T
9	3	3	171,00	172,16	2	S	S/T
10	4	1	254,65	248,39	1	T	T
11	4	2	413,27	405,72	1	T	T
12	4	3	345,27	335,91	1	T	T
13	5	1	14,71	15,23	2	S	T/S
14	5	2	155,18	152,26	1	T	T/S
15	5	3	261,79	260,42	1	T	T/S
16	6	1	123,38	122,27	1	T	S/T
17	6	2	-56,61	-51,35	2	S	S/T
18	6	3	157,93	160,30	2	S	S/T
19	7	1	-153,88	-153,77	2	S	T/S
20	7	2	455,65	452,73	1	T	T/S
21	7	3	-2,68	-4,40	1	T	T/S
22	8	1	208,08	209,66	2	S	S
23	8	2	226,39	227,96	2	S	S
24	8	3	152,21	153,78	2	S	S
25	9	1	-243,42	-239,31	2	S	S
26	9	2	-65,71	-58,19	2	S	S
27	9	3	-161,94	-155,55	2	S	S
28	10	1	-33,32	-32,20	2	S	S
29	10	2	-226,26	-218,66	2	S	S
30	10	3	-101,51	-97,59	2	S	S
31	11	1	-86,79	-89,29	1	T	T
32	11	2	5,06	-2,74	1	T	T
33	11	3	-212,20	-214,03	1	T	T

T - Tolerante; S - Sensível; T/S - Predominantemente Tolerante e S/T - Predominantemente Sensível. Taxa de erro aparente - 0/ . Número de classificados - 6.

A caracterização dos genótipos e o conhecimento da relação entre as características para tolerância ao estresse de Al são as etapas iniciais para o melhoramento para estresse abiótico. A partir disso, os melhoristas possuem o desafio de traçar estratégias de melhoramento para aumentar a produção em condições de estresse. Parentoni et al. (2010) sugeriu para milho que um critério adequado de seleção para aumentar a eficiência em P deveria incluir a produção de grãos em estresse de P e o conteúdo de P no grão em condições de alto P. Mundim et al. (2013) concluíram para milho-pipoca que a seleção em ambientes contrastantes de P deve ser realizada para cada ambiente, podendo ser realizada via seleção direta ou indireta. A identificação de genótipos de cana-de-açúcar tolerantes ao Al deve levar em consideração características radiculares e da parte aérea, bem como uma correlação com produtividades em estágios de maior desenvolvimento da planta. A tentativa de seleção em condições de baixos insumos dificulta a expressão ideal de muitas características desejadas, particularmente aqueles relacionados à produtividade e qualidade (Hawkesford, 2012).

4. CONCLUSÕES

As relações entre as características não possuem uma magnitude e efeito semelhante nos ambientes. Em estresse de Al a relação entre as variáveis não teve consistência através dos efeitos diretos e indiretos. Foram identificados os genótipos tolerantes (2, 4 e 11) e sensíveis (8, 9 e 10) ao Al, que podem ser utilizados como possíveis genitores no programa de melhoramento de cana-de-açúcar para estresse de Al.

5. REFERÊNCIAS

- Anderson TW (1958) An introduction to multivariate statistical analysis. John Wiley & Sons, New York pp 345
- Azeredo DF (1982) Alumínio no crescimento e na concentração de nutrientes em diferentes cultivares de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) Dissertação Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba pp 67
- Barbosa MHP, Resende MDV, Dias LAS, Barbosa GVS, Oliveira RAd, Peternelli LA, Daros, E (2012) Genetic improvement of sugar cane for bioenergy: the Brazilian experience in network research with RIDESA. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* 12:87-98
- Bouma TJ, Nielson KL, Koutstaal BAS (2000) Sample preparation and scanning protocol for computerized analysis of root length and diameter. *Plant and Soil* 218: 185-196
- Brasil (2009) Anuário Estatístico da Agroenergia. Mapa/ACS, Brasília 160p
- Carlin SM, Santos DMM (2009) Indicadores fisiológicos da interação entre déficit hídrico e acidez do solo em cana-de-açúcar. *Pesq agropec bras* 44:1106-1113
- Chaffai R, Marzouk B (2009) The role of organic acids in the short- and long-term aluminum tolerance in maize seedlings (*Zea mays L*). *Acta Physiol Plant* 31:805-814
- Conab (2014) Companhia Nacional de Abastecimento Acompanhamento da Safra Brasileira de Cana-de-Açúcar - Quarto Levantamento. Conab, Brasília p14
- Cruz CD (2013) GENES - a software package for analysis in experimental statistics and quantitative genetics. *Acta Scientiarum Agronomy* 5:271-276
- Cruz CD, Regazzi AJ, Carneiro PCS (2004) Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Editora UFV, Viçosa pp 390
- Espósito DP, Peternelli LA, Paula TOM, Barbosa MHP (2012) Análise de trilha usando valores fenotípicos e genotípicos para componentes do rendimento na seleção de famílias de cana-de-açúcar. *Ciência Rural* 42:38-44

- Fonseca Júnior EM, Cambraia J, Ribeiro C, Oliva MA, Oliveira JÁ, Damatta FM (2014) The effects of aluminium on the photosynthetic apparatus of two rice cultivars. *Experimental Agriculture* 50:343-352
- Foy CD (1984) Physiological Effects of Hydrogen, Aluminium and Manganese Toxicities in Acid Soils. In: Adams F (ed) *Soil Acidity and Liming*, 2nd Ed Medison, Wisconsin: Soil Sci Soc Am, Amer Soc Agron, and Crop Sci Soc Am pp 57-97
- Foy CD (1976) General principles involved in screening plants for aluminum and manganese tolerance. In: WRIGHT, Mi (ed) *Plant adaptation to mineral stress in problem soils* Ithaca, Cornell University Agricultural Experiment Station, pp 255-267
- Giannakoula A, Moustakas M, Mylona P, Papadakis I, Yupsanis T (2008) Aluminum tolerance in maize is correlated with increased levels of mineral nutrients, carbohydrates and proline and decreased levels of lipid peroxidation and Al accumulation. *J Plant Physiol* 165:385-396
- Godfray HCJ, Beddington JR, Crute IR, Haddad L, Lawrence D, Muir J F, Pretty J, Robinson S, Thomas SM, Toulmin C (2010) Food Security: The Challenge of Feeding 9 Billion People. *Science* 327:812-818
- Hawkesford M J (2012) *Improving nutrient use efficiency in crops*. eLS, John Wiley & Sons Ltd, Chichester. doi: 10.1002/9780470015902.a0023734
- Inostroza-Blancheteau C, Rengel Z, Alberdi M, Mora ML, Aquea F, Arce-Johnson P, Reyes-Díaz M (2012) Molecular and physiological strategies to increase aluminum. *Mol Biol Rep* 39:2069-2079
- Ishikawa S, Wagatsuma T, Sasaki R, Ofei-Manu P (2000) Comparison of the amount of citric and malic acids in Al media of seven plant species and two cultivars each in five plant species. *Soil Sci Plant Nutr* 46:751-758
- Jiang H-X, Chen L-S, Zheng J-G, Han S, Tang N, Smith BR (2008) Aluminum-induced effects on Photosystem II photochemistry in citrus leaves assessed by the chlorophyll *a* fluorescence transient. *Tree Physiol* 28:1863-1871

- Kidd PS, Llugany M, Poschenrieder C, Gunse B (2001) The role of root exudates in aluminium resistance and silicon-induced amelioration of aluminium toxicity in three varieties of maize (*Zea mays*L). *J Exp Bot* 52:1339-1352
- Kochian LV (1995) Cellular mechanism of aluminum toxicity and resistance in plants. *Annu Rev Plant Physiol* 46:237-260
- Kochian LV, Hoekenga AO, Piñeros MA (2004) How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annu Rev Plant Biol* 55:459-93
- Kollmeier M, Horst WJ (2001) Aluminium-induced exudation of citrate from the root tip of *Zea mays* (L): are differential impacts of Al on citrate metabolism involved in genotypical differences? In: Horst WJ, Schenk MK, Burckert A et al (eds) *Plant nutrition: food security and sustainability of agroecosystems through basic and applied research*. Kluwer, Dordrecht pp 492-493
- Landell MGA (1989) Comportamento da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp) frente a níveis de alumínio, em solução nutritiva. Tese Doutorado, Universidade Estadual de São Paulo pp 117
- Ma JF, Taketa S, Yang ZM (2000) Aluminum tolerance genes on the short arm of chromosome 3R are linked to organic acid release in triticale. *Plant Physiol* 122:687-694
- Magalhaes J (2002) Molecular genetic and physiological investigations of aluminum tolerance in sorghum (*Sorghum bicolor* L Moench). PhD thesis Cornell Univ pp 192
- Malavolta E, Vitti GC, Oliveira SA (1997) Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações 2 ed Piracicaba, pp 319
- Montgomery DC, Peck EA (1981) *Introduction to linear regression analysis*. John Wiley & Sons, New York pp 504
- Mundim GB, Viana JMS, Maia C (2013) Early evaluation of popcorn inbred lines for phosphorus use efficiency. *Plant Breeding* 132:613-619

- Oliveira MS (2012) Tolerância de variedades de cana-de-açúcar (*Sccharum spp*) à toxidez por alumínio em solução. UFSCAR, São Carlos pp 109
- Papernik LA, Kochian LV (1997) Possible involvement of Al-induced electrical signals in Al tolerance in wheat. *Plant Physiol* 115:657-667
- Parentoni SN, Souza CLJr, Carvalho Alves VM, Gama EEG, Coelho AM, Oliveira AC, Guimaraes PEO, Guimaraes CT, Vasconcelos MJV, Pacheco CAP, Meirelles WF, Magalhaes JV, Guimaraes LJM, Silva AR, Mendes FF, Schaffert RE (2010) Inheritance and breeding strategies for phosphorus efficiency in tropical maize (*Zea Mays L*). *Maydica* 55:1-15
- Piñeros MA, Magalhaes JV, Carvalho Alves VM, Kochian LV (2002) The physiology and biophysics of an aluminum tolerance mechanism based on root citrate exudation in maize. *Plant Physiol* 129:1194-1206
- Rossiello ROP, Netto JJ (2006) Toxidez por alumínio em plantas: novos enfoques para um velho problema In: Fernandes, MS (ed) *Nutrição mineral de plantas*. SBCS, Viçosa, pp 375-418
- Rowland R (2006) Responses of sugarcane to aluminium toxicity. MSc Thesis University of Stellenbosch pp 85
- Shen R, Ma J, Kyo M, Iwashita T (2002) Compartmentation of aluminium in leaves of an Al-accumulator, *Fagopyrum esculentum* Moench. *Planta* 215:394-398
- Silva FL, Pedrozo CA, Barbosa MHP, Resende MDV, Peternelli LA, Costa PMA, Vieira MS (2009) Análise de trilha para os componentes de produção de cana-de-açúcar via blup. *Revista Ceres* 56:308-314
- Silva IR, Smyth TJ, Raper CD, Carter TE, Rufty T (2001) Differential aluminum tolerance in soybean: an evaluation of the role of organic acids. *Physiol Plant* 112:200-210
- Simões CC, Melo JO, Magalhaes JV, Guimarães CT (2012) Genetic and molecular mechanisms of aluminum tolerance in plants. *Genetics and Molecular Research* 11: 1949-1957

- Sobral AF, Guimarães VOS (1992) Relação entre a toxidez do alumínio e a produção de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*). *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 27:287-292
- Souza DMG, Miranda LN, Oliveira SA (2007) Acidez do Solo e sua Correção, In: Novais, RF; et al Fertilidade do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa pp 205-274
- Stass A, Smit I, Eticha D, Oettler G, Horst WJ (2008) The significance of organic-anion exudation for the aluminum resistance of primary triticale derived from wheat and rye parents differing in aluminum resistance. *J Plant Nutr Soil Sci* 171:634-642
- Trachsel S, Messmer R, Stamp P, Hund A (2009) Mapping of QTLs for lateral and axile root growth of tropical maize. *Theor Appl Genet* 119: 1413-1424
- Trejo-Téllez LI, Stenzel R, Gómez-Merino FC, Schmitt JM (2010) Transgenic tobacco plants overexpressing pyruvate phosphate dikinase increase exudation of organic acids and decrease accumulation of aluminum in the roots. *Plant Soil* 326:187-198
- Vance CP, Uhde-Stone C, Allan DL (2003) Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist* 157:423-447
- Wright S (1921) Correlation and causation. *Journal of Agricultural Research* 20:557-585
- Zheng S, Ma J, Matsumoto H (1998) Continuous secretion of organic acids is related to aluminum resistance during relatively long-term exposure to aluminum stress. *Physiol Plant* 103:209-214