

**VALIDAÇÃO DO EFEITO DO GENE *Alt<sub>SB</sub>* QUE  
CONTROLA A TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO  
EM SORGO**

**LIDIANNE ASSIS SILVA**

**2008**

**LIDIANNE ASSIS SILVA**

**VALIDAÇÃO DO EFEITO DO GENE *Alt<sub>SB</sub>* QUE CONTROLA A  
TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO EM SORGO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. João Cândido de Souza

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2008

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da  
Biblioteca Central da UFLA**

Silva, Lidianne Assis.

Validação do efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>* que controla a tolerância ao  
alumínio em sorgo / Lidianne Assis Silva. – Lavras : UFLA, 2008.  
75 p. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2008.

Orientador: João Cândido de Souza.

Bibliografia.

1. Sorgo. 2. Tolerância. 3. Alumínio. 4. Gene *Alt<sub>SB</sub>*. 5. Solos ácidos. 6.  
*Sorghum bicolor*. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 581.13356

**LIDIANNE ASSIS SILVA**

**VALIDAÇÃO DO EFEITO DO GENE *Alt<sub>SB</sub>* QUE CONTROLA A  
TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO EM SORGO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento de Plantas, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 31 de julho de 2008

Dr. Robert Eugene Schaffert

Embrapa Milho e Sorgo

Dr. Flávio Dessaune Tardin

Embrapa Milho e Sorgo

Dr. Renzo Garcia Von Pinho

UFLA

Prof. Dr. João Cândido de Souza

UFLA  
(Orientador)

LAVRAS  
MINAS GERAIS - BRASIL

*Todas as vezes que eu senti a desesperança, o medo e o temor lembrava-me que, lá no final, bem no final do túnel, existia um sonho, e esse sonho era muito maior que o meu: era o sonho de **DEUS pra mim!** E foi nesse sonho que eu acreditei. Obrigado, Senhor, por sonhar pra mim e me fazer acreditar que tudo posso naquele que me fortalece!!*

*A minha querida e amada mãe, por todo o seu esforço, incentivo e, o fundamental, seu amor incondicional durante toda a minha vida e, ao meu pai, Geraldo Francisco de Souza (in memoriam), pelo exemplo de vida e seu amor por mim,*  
***Dedico.***

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me concedido o que há de mais belo neste mundo, a vida.

A minha mãe, pela sua intensa dedicação, mesmo estando longe de mim. Sem você, minha querida mãezinha, eu jamais conseguiria.

Ao meu companheiro, Fábio, pelo seu carinho, amor, paciência, incentivo e, principalmente, pela sua cumplicidade.

À Capes, pela concessão da bolsa de estudos.

À Embrapa Milho e Sorgo, especialmente ao pesquisador Dr. Robert Eugene Schaffert, pelo incentivo, ensinamentos, disponibilidade, amizade e paciência nas horas mais difíceis, desde a graduação até o atual momento.

Ao professor Dr. João Cândido de Souza orientador, pelos ensinamentos, sugestões e disponibilidade para me atender quando as dúvidas surgiram.

Ao pesquisador Dr. Flávio Dessaune Tardin, pelas importantes contribuições dadas, durante a execução deste trabalho, além da disponibilidade em me socorrer nas análises estatísticas. Agradeço também pela participação na banca examinadora deste trabalho e, principalmente, pela amizade construída.

Ao professor Dr. Renzo Garcia Von Pinho, pela disponibilidade de participar da banca examinadora deste trabalho.

Aos professores do curso de Genética e Melhoramento de Plantas: César Brasil, Magno Ramalho, Lisete Davide, Wagner e Samuel, pela amizade e conhecimentos transmitidos.

Ao professor Dr. Walter Vieira da Cunha (ULBRA), por abrir as portas para essa longa jornada e, principalmente, pelo incentivo, além da amizade.

Às amigas Daniela, Gisele, Vanda e Camila, pela amizade dedicada apesar da distância... que saudade de vocês.

A equipe da Embrapa Milho e Sorgo, Geraldo Magela, Edimar, Eidinilson, Alex, Marcos André, Geraldo Maria, Adilson, Leandro, Luciano, Tarcisio, Heraldo, Gislene, Francine, Fabricio, Juliana, Heliete, Lauro, Sedimar, Aydano e Marquinhos, pela imensa colaboração neste trabalho.

A Fundação McKnight e Generation Challenge Program, pelo apoio financeiro na execução do trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Biologia, Irondina, Zélia, Rafaela e, em especial, Elaine.

A todos os amigos do GEN, em especial Cristiana, Fernando, Isabela, Paula, Flávia Barbosa, Jeanne, Ranoel, Matheus, Lívia e Camila.

À querida família GOMES, Juarez, Marli, Fernanda, Flávio, Ana Flávia, Ana Luisa, Isabela e Eduardo, pelo carinho e amizade.

Enfim, a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
RESUMO .....	i
ABSTRACT .....	ii
CAPÍTULO 1.....	01
1 Introdução.....	02
2 Referencial teórico.....	04
2.1 Solos Ácidos .....	04
2.2 Toxicidade do Alumínio em Plantas .....	06
2.3 Mecanismos de Tolerância ao Alumínio .....	08
2.4 Métodos de Seleção para Tolerância ao Alumínio.....	11
2.5 Controle Genético da Tolerância ao Alumínio .....	13
2.5.1 Controle Genético da Tolerância ao Alumínio em Sorgo.....	13
3 Referências bibliográficas .....	16
CAPÍTULO 2 Validação do efeito do gene <i>Alt<sub>SB</sub></i> que controla tolerância ao alumínio em linhagens recombinantes endogâmicas de sorgo cultivadas em solução nutritiva.....	23
Resumo.....	24
Abstract .....	25
1 Introdução.....	26
2 Material e métodos.....	28
2.1 Local.....	28
2.2 Material genético.....	28
2.3 Delineamento experimental e condução do experimento .....	29
2.4 Características avaliadas.....	31
2.5 Análises estatísticas e genéticas.....	32
2.5.1 Parâmetros genéticos e correlação genética e fenotípica.....	33



3 Resultados e discussão .....	35
4 Conclusão .....	47
5 Referências bibliográficas .....	48
CAPÍTULO 3 Validação do efeito do gene <i>Alt<sub>SB</sub></i> em linhagens recombinantes endogâmicas de sorgo cultivadas em três níveis de saturação de alumínio.....	50
Resumo.....	51
Abstract .....	53
1 Introdução.....	54
2 Material e métodos.....	56
2.1 Local.....	56
2.2 Material genético.....	56
2.3 Delineamento experimental e condução do experimento.....	57
2.4 Características avaliadas.....	58
2.5 Análises estatísticas e genéticas.....	58
2.5.1 Parâmetros genéticos e correlação fenotípica.....	61
3 Resultados e discussão.....	63
4 Conclusão.....	73
5 Referências bibliográficas.....	74

## RESUMO

SILVA, Lidianne Assis. **Validação do efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>* que controla a tolerância ao alumínio em sorgo**. 2008. 75 p. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.\*

A toxicidade ao alumínio é um dos principais fatores limitantes à expansão da produção em solos ácidos, os quais representam uma grande área com capacidade produtiva de regiões tropicais e subtropicais. O presente trabalho foi realizado com os objetivos de realizar a validação, no campo, de linhagens de sorgo classificados como tolerantes e susceptíveis ao alumínio tóxico, avaliando o efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>* que controla a tolerância ao alumínio, em plantas cultivadas em três níveis de saturação de alumínio, bem como avaliar o crescimento de raiz seminal em solução nutritiva e, posteriormente, calcular correlação entre as características avaliadas em ambos os experimentos. Os experimentos foram realizados em câmara de crescimento, no ano de 2007 e no sítio de fenotipagem para tolerância ao alumínio nas safras 2007 e 2008, na Embrapa Milho e Sorgo. Avaliaram-se 92 acessos, sendo 90 linhagens, obtidas do cruzamento de BR007B (susceptível) x SC283 (tolerante) contrastantes ao alumínio tóxico e os dois parentais em solução nutritiva, bem como no campo. Em solução nutritiva, o experimento foi avaliado em blocos ao acaso, num esquema fatorial 92x2, sendo 90 linhagens com os dois parentais em dois níveis de concentração de Al (0 e 27 $\mu$ M), com duas repetições. As características avaliadas foram comprimento raiz inicial (CRI), crescimento líquido de raiz (CLR) após 5 dias com e sem Al, crescimento líquido de raiz (CLR) após 5 dias com Al relativo à zero, crescimento relativo raiz seminal (CRRS) e crescimento relativo raiz seminal (CRRS) relativo à zero. Os experimentos de campo (safras 2007 e 2008) foram avaliados em blocos ao acaso, num esquema fatorial 92x3x2, sendo 90 linhagens e dois parentais cultivados em 3 níveis de saturação de Al (0%, 20% e 40%), por 2 anos, com 3 repetições. As características avaliadas foram florescimento (dias), altura (cm) e produtividade (t ha<sup>-1</sup>). Houve diferenças significativas entre médias das linhagens para todas as características avaliadas, tanto em solução nutritiva como no campo, em todos os níveis de saturação de alumínio. Houve correlação significativa entre as características crescimento líquido de raiz 5 dias no nível 27 $\mu$ M de Al e produtividade de grãos no nível 40% de saturação de Al na safra 2007, cuja magnitude foi de 0,44. Isto demonstra que plântulas, com maiores crescimentos líquidos de raiz aos 5 dias com Al (27 $\mu$ M) tendem a ser mais produtivas, validando, assim, o efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>*.

---

\*Comitê de Orientação: Prof. Dr. João Cândido de Souza (Orientador), Pesquisador Dr. Robert Eugene Schaffert (Co-orientador)

## ABSTRACT

SILVA, Lidianne Assis. **Validation of the effect of the gene *Alt<sub>SB</sub>* that controls the tolerance to aluminum toxicity in Sorghum.** 2004. 75 p. Dissertation (Master in Plant Genetics and Breeding) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brazil.\*

Aluminum toxicity is one of the principal factors limiting the expansion of crop production on acid soils, which represent a large area with crop production capacity in tropical and subtropical regions. The objective of this study was to validate the effect of the sorghum aluminum tolerant gene *Alt<sub>SB</sub>* for grain production in field conditions and correlate grain production with seedling seminal root growth in nutrient solution. The nutrient solution experiments was conducted in a growth chamber at Embrapa Maize and Sorghum in 2007 and the field studies were conducted at the aluminum tolerant phenotyping site with three levels of aluminum saturation in 2007 and 2008. Ninety two entries, 90 recombinant inbred lines derived from the cross of BR007B (susceptible) and SC283 (tolerant), lines contrasting for tolerance to aluminum toxicity and the two parents, were evaluated in nutrient solution and in the field. Seedlings of the entries were evaluated as a factorial 92x2 in nutrient solution in a randomized complete block design; 90 recombinant inbred lines plus the parents at two concentrations of Al (0 e 27 $\mu$ M) with two replications. The characteristics evaluated were initial seminal root length, net seminal root growth in five days (NSRG), relative root growth (RSRG), NSRG relative to zero Al and RSRG relative to zero Al. The field experiments in 2007 and 2008 were conducted as a factorial 92x3x2; 90 recombinant inbred lines with 2 parents, three replications for two years in a randomized complete block in each of three levels of Al saturation in the topsoil (0, 20, and 40%). The characteristics evaluated were days to flower, plant height (cm) and grain productivity (t ha<sup>-1</sup>). Significant differences of were obtained for all the characteristics evaluated in nutrient solution and in the field. Significant correlation ( $r = 0,44$ ) was observed for NSRG at 27 $\mu$ M Al in nutrient solution and grain production in the field at 40% Al saturation in 2007. These results together with genotyping data for the presence of Al tolerant *Alt<sub>SB</sub>* provided the validation of *Alt<sub>SB</sub>* in the field.

---

\*Guidance Committee: Dr. João Cândido de Souza (Major Professor), Dr. Robert Eugene Schaffert

## **CAPÍTULO 1**

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, o sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) é cultivado, principalmente, para a produção de grãos e forragem, embora também seja utilizado para a produção de álcool e açúcar e, até mesmo, para a produção de vassoura (Sawazaki, 1998). Esta cultura apresentou expressiva expansão, nos últimos anos; na safra 2007/2008, a produção de sorgo granífero foi de 2,4 milhões de toneladas. A produtividade foi 2,400 kg ha<sup>-1</sup>, segundo dados da Associação Paulista dos Produtores de Sementes e Mudanças - APPS (2008), em uma área plantada de um milhão de hectares. O Centro-Oeste brasileiro continua liderando a produção, com destaque para os estados de Goiás, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. O sorgo forrageiro também obteve um aumento de área plantada no Brasil, na safra 2006/2007, em relação à safra 2007/2008, de 293,894 para 373,306 hectares cultivados.

A toxicidade ao alumínio é um dos principais fatores limitantes à expansão da produção de plantas em solos ácidos, os quais representam uma grande área com capacidade produtiva em regiões tropicais e subtropicais. O alumínio trocável, além de ser um elemento nocivo ao crescimento do sistema radicular, interfere na absorção de fósforo, cálcio e magnésio, contribuindo também para a adsorção do fósforo no solo. A demanda por germoplasma e cultivares de sorgo com tolerância aos estresses abióticos tem aumentado significativamente em decorrência da expansão da cultura e da busca por cultivares eficientes, com base genética ampla e adaptada às condições de cultivo em diversas regiões do país (Echart & Cavalli-Molina, 2001).

A obtenção de cultivares tolerantes à toxicidade de alumínio vem despertando o interesse de muitas áreas da pesquisa agrícola, particularmente quando se pretende explorar eficientemente solos com acidez subsuperficial e elevado nível de alumínio, de difícil correção por meio de manejo químico.

Níveis elevados de alumínio associados a períodos de deficiência hídrica reduzem drasticamente a produtividade, inviabilizando, às vezes, o cultivo em área de solos ácidos.

A produção brasileira de grãos depende, quase que exclusivamente, da precipitação pluviométrica. Em anos com a ocorrência de condições desfavoráveis, normalmente, há déficit na produção de grãos e o sorgo. Sendo uma cultura de vocação para cultivo em condições adversas de clima e solo, poderia reduzir o impacto desse fator no abastecimento de grãos. Atualmente, o sorgo granífero vem sendo plantado, na maioria das vezes, no período de safrinha, principalmente na região Centro-Oeste. Como a utilização do sorgo vem crescendo no Brasil, é necessário o advento de novas tecnologias para que os produtores possam produzir sorgo de forma mais sustentável.

Dentre essas tecnologias encontra-se o melhoramento genético, o qual possibilita o aumento da produtividade, sem, necessariamente, aumentar os sítios de produção. A meta desse trabalho foi a validação do efeito positivo no campo do gene *Alt<sub>SB</sub>* (Magalhães et al., 2007), que controla a tolerância ao Al tóxico em sorgo. A clonagem do gene, o desenvolvimento de linhagens isogênicas, a fenotipagem de fontes de resistência e a obtenção de linhagens recombinantes endogâmicas têm sido realizadas em solução nutritiva.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de realizar a validação de genótipos classificados como tolerantes e susceptíveis ao alumínio tóxico, avaliando o efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>*, em plantas cultivadas no campo em três diferentes níveis de saturação de alumínio, avaliando o crescimento de raiz seminal de plântulas cultivadas em solução nutritiva. Também se buscou obter uma correlação entre as características avaliadas no cultivo em campo e em câmara de crescimento.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Solos ácidos

O alumínio ( $Al^{3+}$ ) é um dos fatores limitantes da produção agrícola em solos ácidos, presente em mais de 50% dos solos cultiváveis no mundo, estando a maior porção localizada nas regiões tropicais e subtropicais (60%) (Uexkull & Mutert, 1995). Os solos do Cerrado brasileiro são ácidos e ocupam 205 milhões de hectares. Portanto, é comum encontrar diversas espécies de plantas, nativas ou cultivadas, que já apresentem certo grau de resistência ao Al tóxico (Borgonovi et al., 1987).

A associação das características dos solos ácidos e da nutrição da planta é complexa e envolve o conhecimento de muitas áreas de pesquisa. As maiores limitações dos solos ácidos do Cerrado brasileiro podem ser agrupadas em:

- (i) altos teores de  $H^+$  e  $Al^{3+}$  ativos na solução do solo;
- (ii) baixa capacidade de troca catiônica;
- (iii) alta capacidade da fase sólida em absorver ânion, especialmente o íon fosfato, e
- (iv) baixa atividade orgânica e biológica na fração do solo.

Uma das propriedades que afetam o equilíbrio solo/planta é o nível de atividade de  $H^+$  na solução do solo, o qual é relativamente alto nos solos ácidos. Em solos tropicais e subtropicais úmidos, com altas precipitações pluviométricas, nutrientes solúveis, como cálcio, magnésio, potássio e outros elementos básicos, foram lixiviados nos últimos milhões de anos.

Quando a remoção de cátions básicos é maior que sua taxa de liberação pelas intempéries, o pH do solo diminui. A mineralização da matéria orgânica por microrganismos do solo resulta na liberação de nitrato e de hidrogênio, ocasionando a diminuição do pH. Em pH baixo, o  $H^+$  atua sobre os minerais

liberando íons alumínio ( $\text{Al}^{3+}$ ) que ficam retidos pelas cargas negativas das partículas de argila do solo, em equilíbrio com o  $\text{Al}^{3+}$  em solução. Assim, a quantidade de  $\text{Al}^{3+}$  em solução aumenta com a acidez do solo (Bohneh, 1995). Em solos com pH acima de 5,5, o Al encontra-se em formas precipitadas e não tem efeito negativo no crescimento de plantas (Jones, 1979; Bohneh, 1995).

O processo natural de acidificação do solo é, muitas vezes, intensificado por práticas agrícolas, pela mineração e por práticas de descarte de resíduos (Foy et al., 1978; Rao et al., 1993). No que se refere aos efeitos da agricultura, pode-se salientar que todos os resíduos de plantas orgânicas, fertilizantes à base de nitrogênio, fósforo, potássio e materiais nitrogenados são fontes de acidez (Jones, 1979; Bohneh, 1995).

Alternativas de manejo vêm sendo utilizadas para contornar o problema causado pela toxidez provocada pelo Al. Essas alternativas se dividem em duas práticas. Uma seria o processo realizado por meio da calagem, que consiste na precipitação do Al solúvel pela adição de calcário agrícola ( $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$ ) ao solo. Contudo, a calagem é uma prática cuja eficiência se limita apenas à camada superficial do solo, pois a incorporação de calcário em profundidades maiores é economicamente e mecanicamente inviável, devido à baixa mobilidade dos componentes solúveis do solo. Sendo assim, a calagem favorece o desenvolvimento radicular apenas nas camadas superficiais do solo, o que favorece a planta a se tornar mais susceptível aos períodos de veranicos, que são bastante comuns em regiões do Cerrado brasileiro. Além disso, os efeitos da calagem nas camadas superficiais são ainda mais reduzidos sob condições de plantio direto, em que não há utilização de implementos agrícolas para revolver o solo (Hartwig et al., 2007).

A outra prática que vem sendo bastante enfatizada é a utilização de cultivares mais tolerantes ao Al. Muitos estudos têm sido realizados, com estas práticas, pela Embrapa Milho e Sorgo, na tentativa de unir a utilização da prática



da calagem e o uso de genótipos mais adaptados às condições de solo ácido com elevada saturação de Al. Foi este conjunto de tecnologias que contribuiu para a abertura do Cerrado para a produção agrícola, nas décadas 1970 e 80.

## **2.2 Toxicidade do Al em plantas**

O Al é um dos mais abundantes metais e o terceiro elemento mais comum na crosta terrestre. Quando em soluções ácidas ( $\text{pH} < 5,0$ ), apresenta-se na forma de  $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ , a qual é tóxica para as plantas (Kochian, 1995). Os primeiros sintomas da toxicidade do Al em plantas foram observados por Beckmann (1954), que constatou, em trigo e em outros cereais, sintomas de amarelecimento e de redução de crescimento de planta, sintoma o qual denominou de “crestamento”.

O primeiro sintoma da toxicidade do Al é extremamente rápido. Em apenas questão de minutos, este cátion, quando em contato com as raízes, promove, rapidamente, a paralisação do crescimento radicular, resultando em redução e danos no sistema radicular. Outros sintomas conhecidos também são de deficiência de nutrientes, como P, Ca, Mg, K e Mo, devido à interferência do Al nos processos de absorção, transporte e uso desses nutrientes (Silva et al., 1984; Jones & Kochian, 1995; Barceló & Poschenrieder, 2002).

A resposta rápida da raiz indica que, em um primeiro instante, o Al inibe a expansão e a alongação das células das raízes e, depois, a divisão celular também passa a ser inibida (Kochian, 1995; Matsumoto, 2000). O sítio da toxicidade do Al está localizado no ápice da raiz. Dessa forma, as pesquisas de tolerância ao Al são focadas nestas regiões (Ryan et al., 1993; Sivaguru et al., 1999).

A cargo da acelerada reatividade do Al, as injúrias podem ocorrer na parede celular, na membrana plasmática, no citoesqueleto e até no núcleo celular. Porém, a maior associação do Al com a raiz ocorre no apoplasto: uma

pequena fração do Al rapidamente entra e interage no simplasto (Silva et al., 2000; Taylor et al., 2000). O Al interage com as vias de transdução de sinais, em especial os relacionados com a homeostase e o transporte do cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), podendo alterar os níveis de  $\text{Ca}^{2+}$  (Zhang & Rengel, 1999) e pode interagir e inibir a enzima fosfolipase C, associada às vias de transporte do Ca (Jones & Kochian, 1995).

Mesmo que vários trabalhos já tenham mostrado os efeitos negativos do Al, alguns trabalhos mostram efeitos benéficos em algumas espécies. Em arroz, Fageria & Zimmermann (1979) e Fageria et al. (1989) mostraram que algumas cultivares produziram maior quantidade de matéria seca sob  $10 \text{ mg L}^{-1}$  de Al. De acordo com estes autores, uma possível explicação é o aumento da disponibilidade de Fe no meio de crescimento, resultando na hidrólise de Al a pH mais baixo. Fageria (1982) mostrou, em três cultivares de arroz, a maior produção de peso seco com  $10 \text{ mg L}^{-1}$  de Al, quando comparado com a dose zero de Al, em qualquer dos estádios de desenvolvimento, até os 80 dias avaliados no trabalho. Thawornwong & Diest (1974) e Howeler & Cadavid (1976) também mostraram que o desenvolvimento do arroz foi estimulado na presença de baixas concentrações de Al em solução nutritiva. Isto sugere que, em arroz, uma pequena quantidade de Al seja necessária para o desenvolvimento normal da planta.

Em espécies perenes, Salvador et al. (2000) observaram, em mudas de goiabeira (*Psidium guajava* L.), que concentrações de Al abaixo de  $10,0 \text{ mg L}^{-1}$  aumentaram a altura da planta e a área foliar, respectivamente, aos 30 e aos 90 dias de cultivo em solução nutritiva. Para as espécies florestais do hemisfério norte, também tem sido verificado que os sintomas de toxidez somente ocorrem em concentrações acima  $10,0 \text{ mg L}^{-1}$  de Al. Keltjens & Loenen (1989) verificaram que, na presença de  $30,0 \text{ mg L}^{-1}$  de Al, não houve redução de crescimento e na produção de massa seca em *Betula pendula* e *Pinus silvestris*, e

nas espécies *Larix decidua* e *Quercus robur* houve até um estímulo na produção de massa seca na presença de Al em solução nutritiva.

### 2.3 Mecanismos de tolerância ao Al

Espécies e cultivares de plantas variam quanto ao grau de tolerância ao excesso de Al no meio em que se desenvolvem. Bennet & Breen (1991) explicam que o alumínio possui algumas propriedades inerentes, distintas de elementos biologicamente importantes, como o Ca, as quais são de extrema importância para as plantas desenvolverem mecanismos de tolerância ao Al.

As categorias de mecanismos de tolerância ao Al que têm sido propostas pela literatura são duas. A primeira consiste nos mecanismos simplásticos, que são decorrentes da imobilização ou da neutralização do Al dentro da célula. A hortênsia é um exemplo deste mecanismo. Trata-se de uma planta ornamental cujas pétalas vão do vermelho ao azul quando o solo é acidificado. A alteração na cor é dada pela acumulação de complexos de Al nas pétalas. Esta espécie pode acumular até 3.000 mg L<sup>-1</sup> de Al em suas folhas e pétalas, complexado com o citrato (Ma et al., 1997). Em trigo sarraceno, Zheng et al. (1998b) indicaram que parte da tolerância ao Al abrangia exsudação de oxalato pelos ápices das raízes nesta espécie. Mas, ao mesmo tempo, elevadas concentrações de Al nas folhas eram acumuladas (até 15 mg L<sup>-1</sup>), quando cultivado em solos ácidos (Ma et al., 2001).

Outra espécie que faz jus à atenção em termos de tolerância ao Al é o capim *Brachiaria decumbens*, forrageira amplamente difundida nas regiões tropicais. A espécie é bem tolerante ao Al e um estudo hidropônico comparativo mostrou ser consideravelmente mais tolerante do que genótipos tolerantes de trigo, milho e triticale (Wenzl et al., 2001). É conhecido que há apenas uma porção de exclusão de Al pelas raízes de brachiaria. Em outra espécie, a brachiária-peluda (*Brachiaria ruziziensis*), adveio a acumulação de duas vezes

mais de Al em relação a *B. decumbens* nos ápices radiculares. No entanto, não foi examinada a exsudação de ácidos orgânicos na superfície do ápice da raiz em ambas as espécies. Em um estudo seguinte, no intuito de investigar o processo de desintoxicação interna do Al, Wenzl et al. (2002) identificaram um incremento significativo de citrato nas pontas de raízes em ambas as espécies de brachiaria e somente uma pequena fração deste ácido orgânico foi secretado pelo ápice radicular. Os autores sugerem que um processo interno de desintoxicação e seqüestro do Al através do citrato pode exercer importante papel na tolerância ao Al, em ambas as espécies.

Provavelmente, estas espécies empenham importantes recursos em mecanismos e genes de tolerância ao Al e esta curiosidade levou, nos últimos anos, a muitos projetos de investigação genética e molecular das bases da tolerância ao Al, principalmente na *B. decumbens*.

A segunda categoria de mecanismo seriam os mecanismos de exclusão ou apoplásticos, que consistem na imobilização ou na neutralização do Al externamente à célula (Taylor, 1991; Kochian, 1995). No geral, há genótipos tolerantes ao Al em inúmeras espécies de plantas que participam deste mecanismo de tolerância. Também, há uma especificidade do ácido orgânico que desempenha a resposta de tolerância ao Al entre as inúmeras espécies. Além dos trabalhos realizados em trigo, outros são encontrados, com os referentes ácidos orgânicos exsudados, podendo-se citar: em milho, citrato (Pellet et al., 1995; Korn et al., 1997; Piñeros et al., 2002); em centeio, citrato e malato (Li et al., 2000); em triticale, citrato e malato (Ma et al., 2000); em aveia, citrato e malato (Zheng et al., 1998a); em cevada, citrato (Zhao et al., 2003; Ma et al., 2004); em soja, citrato (Silva et al., 2000; Yang et al., 2000); em fumo, citrato (Delhaize et al., 2001); em arábido, malato (Hoekenga et al., 2003); em sorgo, citrato (Magalhães, 2002); em nabo, citrato e malato (Zheng et al., 1998a) e em trigo sarraceno, oxalato (Zheng et al., 1998b).

O ácido orgânico exsudado na presença de Al mais comum entre as espécies é o citrato. Além disso, é o mais efetivo entre os ácidos orgânicos. Por ser um ânion di e tricarboxilado, ele pode formar quelatos com o  $Al^{3+}$  extremamente mais estáveis, se comparados com os quelatos formados pelo malato (ânion dicarboxilado). Desta forma, fica confirmada a importância do citrato como ácido orgânico associado à tolerância ao Al tóxico. Entretanto, o que não está explicado ainda é como diferentes espécies regulam esta especificidade do ácido orgânico exsudado na presença do Al. Ocorre ainda diferença entre o local onde o ácido orgânico é exsudado. Por exemplo, em trigo, a exsudação do malato ocorre no ápice da raiz (até aproximadamente em torno de 0,2 a 0,3 mm da ponta da raiz), o que faz com que a eficiência da ação contra o Al aumente, visto que é a zona crítica da raiz e necessita de maior proteção ao Al.

Na cultura do milho, o efluxo do citrato ocorre até 50 mm do ápice radicular diante da presença do Al na solução do solo (Piñeros et al., 2002) e, no sorgo, tanto o processo de exclusão do Al quanto o de ativação do citrato ocorre até os 30 mm do ápice radicular (Magalhães, 2002). Desse modo, é perceptível que no milho e no sorgo, parte do citrato exsudado de regiões da raiz muito além do ápice radicular não esteja diretamente envolvida com a tolerância ao Al.

Outra função extremamente importante dos ácidos orgânicos está ligada à fitodisponibilização do fósforo, pois estes compostos são capazes de dissociar os complexos P-Al e P-Fe, formando compostos estáveis com o Al e Fe e liberando o fosfato ( $H_2PO_4^{-3}$ ) para a solução do solo (Sposito, 1989). Dessa maneira, a presença de grandes quantidades dessas substâncias no solo pode ter importantes consequências na nutrição de plantas (Gardner et al., 1982).

Alguns possíveis mecanismos de tolerância ao Al, porém somente em fase de especulações por parte dos pesquisadores, poderão vir a ser desvendados futuramente. Entre os mecanismos de exclusão do Al são considerados possíveis

outros exsudatos orgânicos quelantes do Al ainda não descobertos, formação de barreiras via componentes que alteram o pH da rizosfera, complexação do Al por mucilagens secretadas pelas raízes e exclusão do Al acumulado por algum transportador específico do Al. Entre os mecanismos de desintoxicação interna do Al, especula-se sobre a fixação do Al na parede celular e a complexação no simplasto via diferentes compostos orgânicos.

#### **2.4 Métodos de seleção para tolerância ao Al**

A seleção de plantas tolerantes ao Al tem sido considerada a alternativa adequada para aumentar a produção em solos ácidos com altas concentrações de Al. Diferentes métodos de seleção têm sido empregados, como cultivos em campo ou em soluções nutritivas (hidropônicas). Ambas as metodologias têm vantagens e desvantagens distintas. Técnicas de seleção a campo selecionam germoplasmas sob condições climáticas e de solo naturais e os dados finais refletem uma integração dos efeitos do estresse da toxicidade do Al e todas as condições do solo com o ciclo de crescimento completo. As desvantagens dos testes a campo são: o tempo requerido, geralmente um ciclo completo da cultura; problemas da variabilidade das características do solo; efeitos de resistência diferencial a doenças e pragas; vulnerabilidade do material às intempéries ambientais, como seca ou inundação e a inabilidade em interpretar o desempenho das plantas em função da complexidade das interações do meio ambiente (Furlani & Clark, 1981).

Devido às limitações da seleção a campo, a maioria dos trabalhos de seleção de cultivares tolerantes ao Al tem sido conduzida utilizando-se metodologias que utilizam solução de nutrientes, ou seja, solução nutritiva (hidropônica). Com esta metodologia é possível avaliar um grande número de plantas em um período de tempo relativamente pequeno e com alta precisão, analisando somente a influência do alumínio. O critério utilizado para avaliar a

toxicidade ao Al consiste na avaliação de comprimento da raiz inicial (CRI), imediatamente antes da aplicação do estresse por Al. Em seguida, é medido o comprimento da raiz seminal de cada plântula, às 48, 96 e 144 horas após ocorrência do estresse, este considerado como comprimento de raiz final (CRF). Esses valores são utilizados, posteriormente, para calcular o crescimento líquido diário de raiz e o crescimento relativo de raiz seminal. O crescimento líquido diário de raiz (CLDR) é obtido para cada intervalo de leitura e calculado pela fórmula:  $CLDR = CRT_i - CRT_{i-1}$ , em que  $CRT_i$  é o comprimento de raiz no tempo  $i$  e  $CRT_{i-1}$  é o comprimento de raiz medido anteriormente ao tempo  $i$ . Já o crescimento relativo de raiz seminal (CRRS) é obtido pela fórmula:  $CRRS = [(CRF - CRI)/CRI]*100$ .

Além desses parâmetros de resposta ao Al, têm sido utilizados métodos de coloração da raiz que possuem a vantagem de serem mais rápidos. Um método utilizando o corante hematoxilina foi desenvolvido tendo como base a formação do complexo corado entre a hematoxilina e o Al ligado na raiz (Polle et al., 1978). Esse método tem sido empregado para avaliar tolerância em trigo (Takagi et al., 1981) e em cevada (Minella & Sorrells, 1997), entre outros. Ainda, coloração com *erichrome cyaneine R* tem sido utilizada para avaliar o recrescimento da raiz após tratamento com Al (Aniol, 1995; Feng Ma et al., 1997). Nesse método, quando o Al não destrói o meristema apical da raiz, a parte da raiz que cresce após tratamento com Al permanece branca (não corada), enquanto raízes que foram afetadas pelo Al ficam densamente coradas (cor de rosa). Outro método de seleção para tolerância ao Al, que vem sendo bastante utilizado, é a seleção assistida por marcadores moleculares que funciona para a cultura do sorgo.

## **2.5 Controle genético da tolerância ao Al**

Espécies de plantas diferem significativamente na tolerância ao excesso de Al disponível em solos ácidos ou em soluções nutritivas. Entre os cereais, a espécie mais tolerante é o centeio, seguido por aveia, trigo e cevada (Gallego & Benito, 1997).

A tolerância ao alumínio é uma característica que depende da espécie e do cruzamento, podendo apresentar um padrão de herança monogênica ou poligênica. Khatiwada et al. (1996), analisando o crescimento relativo da raiz de 62 cultivares de arroz, verificaram que apenas três foram susceptíveis ao Al, o que indica que a maioria dos cultivares tradicionais desta espécie que crescem em solos ácidos já possui tolerância à toxicidade do Al. Na tribo *Triticeae*, que inclui espécies como trigo, cevada e centeio, o controle genético da tolerância ao Al deve-se a uma série alélica de genes ortólogos, isto é, genes presentes em diferentes espécies que evoluíram a partir de um gene ancestral comum (Garvin & Carver, 2003).

Genes de tolerância ao alumínio têm sido mapeados em regiões sintênicas nos cromossomos 4DL em trigo (*Alt<sub>BH</sub>*, Riede & Anderson, 1996), 4H em cevada (*Alp*, Tang et al., 2000) e 4RL em centeio (*Alt3*, Miftahudin et al., 2002). Contudo, vários trabalhos demonstram que outros genes podem estar envolvidos na tolerância ao alumínio nessas espécies (Aniol & Gustafson, 1984; Ma et al., 2000; Tang et al., 2000; Matos et al., 2005).

### **2.5.1 Controle genético da tolerância ao Al em sorgo**

Magalhães et al. (2007), conduzindo estudos de herança e mapeamento molecular em populações F2 e F2:3 derivadas do cruzamento entre linhagens tolerantes (SC283 e SC566-14) e sensíveis (BR007B) ao Al, obtiveram distribuições de frequências claramente bimodais para crescimento radicular, em que a segregação de um único loco com dominância parcial foi responsável pela



tolerância em SC283 e SC566-14. Esse loco, contendo o gene denominado *Alt<sub>SB</sub>*, gene que foi mapeado no cromossomo 3 de sorgo, que não é homeólogo ao cromossomo 4 de espécies como trigo, centeio e cevada, foi responsável por 80% da variação fenotípica observada para o crescimento radicular sob níveis tóxicos de Al em solução nutritiva. Assim, esta característica é controlada por um gene de efeito maior, que é um transportador de ácido orgânico. No caso específico de sorgo, o ácido orgânico transportado é o citrato, o gene pertence à família *Multidrug And Toxic Compound Extrusion (MATE)* e tem sua maior expressividade no ápice das raízes do sorgo, em que há maior concentração de ácidos orgânicos e atua formando uma espécie de barreira que impede que o alumínio tóxico se associe à planta. Deste ponto, conseqüentemente, se origina a tolerância.

Caniato et al. (2007) avaliaram a tolerância ao Al em 12 linhagens de sorgo, apresentando larga variação fenotípica para a tolerância ao Al, compreendendo as linhagens BR007, SC283 e SC566, que foram avaliadas por Magalhães et al. (2004). Dois marcadores flanqueando *Alt<sub>SB</sub>* foram utilizados para estudar o envolvimento desse loco na tolerância ao Al em populações geradas a partir do cruzamento dos diferentes genótipos de sorgo com uma linhagem testadora comum, BR012R. Para estudar o efeito fenotípico isolado dos alelos no loco *Alt<sub>SB</sub>*, foram desenvolvidas linhagens semi-isogênicas, utilizando duas linhagens tolerantes como doadores (3DX e CMS225) e a linhagem sensível BR012 como parental recorrente. Os resultados indicam que as diferenças na tolerância ao Al entre as linhagens de sorgo avaliadas estão relacionadas aos alelos diferentes do gene *Alt<sub>SB</sub>* e podem ser classificadas em ordem ascendente de efeito fenotípico de tolerância, sendo BR012<3DX<CMS225. No entanto, nas linhagens SC112 e 5DX, genes diferentes ao *Alt<sub>SB</sub>*, contribuíram para a tolerância ao Al. Desse modo, Caniato et

al. (2007) identificaram ampla variabilidade em termos de genes e alelos abrangidos na tolerância ao alumínio, em um painel de 12 linhagens de sorgo.

### 3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANIOL, A.; GUSTAFSON, J. P. Chromosome location of genes controlling aluminum tolerance in wheat, rye and triticale. **Canadian Journal of Genetics and Cytology**, Ottawa, v. 26, p. 701-705, 1984.

ANIOL, A. M. Physiological aspects of aluminium tolerance associated with the long arm of chromosome 2D of the wheat (*Triticum aestivum* L.) genome. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 91, p. 510-516, 1995.

ASSOCIAÇÃO PAULISTA DOS PRODUTORES DE SEMENTES E MUDAS. **Evolução da área plantada e produção de sorgo no Brasil**. Disponível em: <<http://www.apps.agr.br>>. Acesso em: 30 jun. 2008.

BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, C. Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: a review. **Environmental and Experimental Botany**, Oxford, v. 48, n. 1, p. 75-92, 2002.

BECKMANN, I. Sobre o cultivo e melhoramento do trigo (*Triticum vulgare* Vill) no sul do Brasil. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v. 1, n. 1/4, p. 64-72, 1954.

BENNET, R. J.; BREEN, C. M. The aluminium signal: new dimensions to mechanisms of aluminium tolerance. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 134, p. 153-166, 1991.

BOHNEN, H. Acidez e calagem. In: GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; TEDESCO, M. J. (Ed.). **Princípios de fertilidade de solo**. Porto Alegre: UFRGS, 1995. p. 51-76.

BORGONOVI, R. A.; SCHAFFERT, R. E.; PITTA, G. V. E. Breeding aluminum-tolerant sorghums. In: WORKSHOP ON EVALUATING SORGHUM FOR TOLERANCE TO AL-TOXIC TROPIC SOILS IN LATIN AMERICA, 1987, Cali, Colombia. **Proceedings...** Cali: CIAT, 1987. p. 271-292.

CANIATO, F. F.; GUIMARÃES, C. T.; SCHAFFERT, R. E.; ALVES, V. M. C.; KOCHIAN, L. V.; BORÉM, A.; KLEIN, P. E.; MAGALHÃES, J. V.

Genetic diversity for aluminum tolerance in sorghum. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 114, p. 863-876, 2007.

DELHAIZE, E.; HEBB, D. M.; RYAN, P. R. Expression of a *Pseudomonas aeruginosa* citrate synthase gene in tobacco is not associated with either enhanced citrate accumulation or efflux. **Plant Physiology**, Rockville, v. 125, n. 4, p. 2059-2067, 2001.

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

FAGERIA, N. K. Tolerância diferencial de cultivares de arroz ao alumínio em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 17, n. 1, p. 1-9, 1982.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; WRIGHT, R. J. The effects of aluminium on growth and uptake of Al and P by rice. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 24, n. 6, p. 677-682, 1989.

FAGERIA, N. K.; ZIMMERMANN, F. J. P. Seleção de cultivares de arroz para tolerância a toxidez de alumínio em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 14, n. 2, p. 141-147, 1979.

FENG MA, J.; ZENG, S. J.; FENG LI, X. A rapid hydroponic screening for aluminium tolerance in barley. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 191, p. 133-137, 1997.

FOY, C. D.; CHANEL, R. L.; WRITE, M. C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review Plant Physiology**, Bethesda, v. 29, p. 511-566, 1978.

FURLANI, P. R.; CLARK, R. B. Screening sorghum for aluminium tolerance in nutrient solution. **Agronomy Journal**, Madison, v. 73, p. 587-594, 1981.

GALLEGO, F. J.; BENITO, C. Genetic control of aluminium tolerance in rye (*Secale cereale* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 92, p. 688-695, 1997.

GARDNER, W. K.; PARBERY, D. G.; BARBER, D. A. The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L. I: some characteristics of the soil/root interface. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 68, n. 1, p. 19-32, 1982.

- GARVIN, D. F.; CARVER, B. F. The role of the genotype in tolerance to acidity and aluminum toxicity. In: RENGEL, Z. (Ed.). **Handbook of soil acidity**. New York: M. Dekker, 2003. p. 387-406.
- HARTWIG, I.; OLIVEIRA, A. C.; CARVALHO, F. I. F.; BERTAN, I.; SILVA, J. A. G.; SCHMIDT, D. A. M.; VALÉRIO, I. P.; MAIA, L. C.; FONSECA, D. A. R.; REIS, C. E. S. Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 2, p. 219-228, 2007.
- HOEKENGA, O. A.; VISION, T. J.; SHAFF, J. E.; MONFORTE, A. J.; LEE, G. P.; HOWELL, S. H.; KOCHIAN, L. V. Identification and characterization of aluminum tolerance loci in *Arabidopsis* (*Landsberg erecta* x Columbia) by quantitative trait locus mapping: a physiologically simple but genetically complex trait. **Plant Physiology**, Rockville, v. 132, n. 2, p. 936-948, 2003.
- HOWELER, R. H.; CADAVID, L. F. Screening of rice cultivars for tolerance to Al toxicity in nutrient solutions and compared with a field screening method. **Agronomy Journal**, Madison, v. 68, n. 5, p. 551-555, 1976.
- JONES, D. L.; KOCHIAN, L. V. Aluminum inhibition of the inositol 1,4,5-triphosphate signal transduction pathway in wheat roots: a role of aluminum toxicity. **Plant Cell**, Rockville, v. 7, n. 11, p. 1913-1922, 1995.
- JONES, U. S. **Fertilizers & soil fertility**. Reston: [s.n.], 1979. 368 p.
- KELTJENS, W. G.; LOENEN, E. van. Effects of aluminium on growth and chemical composition of hydroponically grown seedlings of five different forest tree species. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 119, n. 1, p. 39-50, 1989.
- KHATIWADA, S. P.; SENADHIRA, D.; CARPENA, A. L. Variability and genetics of tolerance for aluminum toxicity in rice (*Oriza sativa* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 93, p. 738-744, 1996.
- KOCHIAN, L. V. Cellular mechanisms of aluminium toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 46, p. 237-260, 1995.
- KORN, M.; JORGE, R. A.; ARRUDA, P. Aluminium induced organic acid exudation by roots of an aluminium tolerant tropical maize. **Phytochemistry**, Oxford, v. 45, n. 4, p. 675-681, 1997.

LI, X. F.; MA, J. F.; MATSUMOTO, H. Pattern of aluminum-induced secretion of organic acids differs between rye and wheat. **Plant Physiology**, Rockville, v. 123, n. 4, p. 1537-1544, 2000.

MA, J. F.; HIRADATE, S.; NOMOTO, K.; IWASHITA, T.; MATSUMOTO, H. Internal detoxification mechanism of Al in hydrangea (Identification of Al form in the leaves). **Plant Physiology**, Rockville, v. 113, n. 4, p. 1033-1039, 1997.

MA, J. F.; NAGAO, K.; SATO, K.; ITO, H.; FURUKAWA, J.; TAKEDA, K. Molecular mapping of a gene responsible for Al-activated secretion of citrate in barley. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 55, n. 401, p. 1335-1341, 2004.

MA, J. F.; RYAN, P. R.; DELHAIZE, A. Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. **Trends Plant Science**, London, v. 6, n. 6, p. 273-278, 2001.

MA, J. F.; TAKETA, S.; YANG, Z. M. Aluminum tolerance genes on the short arm of chromosome 3R are linked to organic acid release in triticale. **Plant Physiology**, Rockville, v. 122, n. 3, p. 687-694, 2000.

MAGALHÃES, J. V. **Molecular genetic and physiological investigation of aluminum tolerance in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench)**. 2002. Thesis (Ph.D. in Plant Genetics) – Cornell University, New York.

MAGALHÃES, J. V.; GARVIN, D. F.; WANG, Y.; SORRELLS, M. E.; KLEIN, P. E.; SCHAFFERT, R. E.; LI, L.; KOCHIAN, L. V. Comparative mapping of a major aluminum tolerance gene in sorghum and other species in the Poaceae. **Genetics**, Maryland, v. 167, p. 1905-1914, 2004.

MAGALHÃES, J. V.; LIU, J.; GUIMARÃES, C. T.; LANA, U. G. P.; ALVES, V. M. C.; WANG, Y.; SCHAFFERT, R. E.; HOEKENGA, O. A.; PIÑEROS, M. A.; SCHAFF, J. E.; KLEIN, P. E.; CARNEIRO, N. P.; COELHO, C. M.; TRICK, H. N.; KOCHIAN, L. V. A gene in the multidrug and toxic compound extrusion (MATE) family confers aluminum tolerance in sorghum. **Nature Genetics**, London, v. 39, p. 1156-1161, 2007.

MATOS, M.; CAMACHO, M. V.; PÉREZ-FLORES, V.; PERNAUTE, B.; PINTOCARNIDE, O.; BENITO, C. A new aluminum tolerance gene located on rye chromosome arm 7RS. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 111, p. 360-369, 2005.

MATSUMOTO, H. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. **International Review Cytology**, San Diego, v. 200, p. 1-46, 2000.

MIFTAHUDIN; SCOLES, G. J.; GUSTAFSON, J. P. AFLP markers tightly linked to the aluminum tolerance gene *Alt3* in rye (*Secale cereale* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 104, p. 626-631, 2002.

MINELLA, E.; SORRELLS, M. E. Inheritance and chromosome location of *Alp*, a gene controlling aluminum tolerance in "Dayton" barley. **Plant Breeding**, Berlin, v. 116, p. 465-469, 1997.

PELLET, D. M.; GRUNES, D. L.; KOCHIAN, L. V. Organic acid exudation as an aluminum-tolerance mechanism in maize (*Zea mays* L.). **Planta**, New York, v. 196, p. 788-795, 1995.

PIÑEROS, M. A.; MAGALHAES, J. V.; ALVES, V. M. C.; KOCHIAN, L. V. The physiology and biophysics of an aluminum tolerance mechanism based on root citrate exudation in maize. **Plant Physiology**, Rockville, v. 129, n. 3, p. 1194-1206, 2002.

POLLE, E.; KONZAC, C. F.; KITTRICK, J. A. Visual detection of aluminium tolerance levels in wheat by hematoxylin staining of seedling roots. **Crop Science**, Madison, v. 18, p. 823-827, 1978.

RAO, I. M.; ZEIGLER, R. S.; VERA, R. Selection and breeding for acid-soil tolerance in crop. **BioScience**, Washington, v. 43, n. 7, p. 454-465, 1993.

RIEDE, C. R.; ANDERSON, J. A. Linkage of RFLP markers to an aluminium tolerance gene in wheat. **Crop Science**, Madison, v. 36, p. 905-909, 1996.

RYAN, P. R.; DITOMASO, J. M.; KOCHIAN, L. V. Aluminum toxicity in roots: an investigation of spatial sensitivity and the role of the root cap. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 44, n. 2, p. 437-446, 1993.

SALVADOR, J. O.; MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; CABRAL, C. P. Influência do alumínio no crescimento e na acumulação de nutrientes em mudas de goiabeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 24, n. 4, p. 787-796, 2000.

SAWAZAKI, E. Sorgo forrageiro ou misto, sorgo granífero, sorgo vassoura *Sorghum bicolor* L. Moench. In: FALH, J. L. (Ed.). **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. 6. ed. Campinas: IAC, 1998. p. 44-49.

SILVA, I. R.; SMYTH, T. J.; MOXLEY, D. F.; CARTER, T. E.; ALLEN, N. S.; UFTY, T. W. Aluminum accumulation at nuclei of cells in the root tip fluorescence detection using lumogallion and confocal laser scanning microscopy. **Plant Physiology**, Rockville, v. 123, n. 2, p. 543-552, 2000.

SILVA, J. B. C.; NOVAIS, R. F.; SEDIYAMA, C. S. Comportamento de genótipos de soja em solo com alta saturação de alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 3, p. 287-298, 1984.

SIVAGURU, M.; BALUSKA, F.; VULKMANN, D.; FELLE, H. H.; HORST, W. J. Impacts of aluminum on the cytoskeleton of maize root apex: short-term effects on the distal part of the transition zone. **Plant Physiology**, Rockville, v. 119, n. 3, p. 1073-1082, 1999.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University, 1989. 210 p.

TAKAGI, H.; NAMAI, H.; MURAKAMI, K. Evaluation of the hematoxylin staining method for detecting wheat tolerance to aluminum. **Japanese Journal Breeding**, Tokyo, v. 31, p. 152-160, 1981.

TANG, Y.; SORRELLS, M. E.; KOCHIAN, L. V.; GARVIN, D. F. Identification of RFLP markers linked to the barley aluminum tolerance gene *Alp*. **Crop Science**, Madison, v. 40, p. 778-782, 2000.

TAYLOR, G. J. Overcoming barriers to understanding the cellular basis of aluminium resistance. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 171, p. 89-103, 1991.

TAYLOR, G. J.; MCDONALD-STEPHENS, J. L.; HUNTER, D. B.; BERTSCH, P. M.; ELMORE, D.; RENGEL, Z.; REID, R. J. Direct measurement of aluminum uptake and distribution in single cells of *Chara corallina*. **Plant Physiology**, Rockville, v. 123, n. 3, p. 987-996, 2000.

THAWORNWONG, N.; DIEST, A. V. Influence of high acidity and aluminum on the growth of lowland rice. **Plant and Soil**, Netherlands, v. 41, n. 1, p. 141-159, 1974.

UEXKULL, H. R. von; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. In: DATE, R. A.; GRUNDON, N. J.; RAYMET, G. E.; PROBERT, M. E. (Ed.). **Plant-soil interactions at low pH: principles and management**. Dordrecht: Kluwer Academic, 1985. p. 5-19.



WENZL, P.; CHAVES, A. L.; PATIÑO, G. M.; MAYER, J. E.; RAO, I. M. Aluminium stress stimulates the accumulation of organic acids in root apices of *Brachiaria* species. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 165, n. 5, p. 582-588, 2002.

WENZL, P.; PATIÑO, G. M.; CHAVES, A. L.; MAYER, J. E.; RAO, I. M. The high level of aluminum resistance in signalgrass is not associated with known mechanisms of external aluminum detoxification in root apices. **Plant Physiology**, Rockville, v. 125, n. 3, p. 1473-1484, 2001.

YANG, Z. M.; SIVAGURU, M.; HORST, W. J.; MATSUMOTO, H. Aluminum tolerance is achieved by exudation of citric acid from roots of soybean (*Glycine max*). **Physiologia Plantarum**, Oxford, v. 110, n. 1, p. 72-77, 2000.

ZHANG, W. H.; RENGEL, Z. Aluminium induces an increase in cytoplasmic calcium in intact wheat root apical cells. **Australian Journal of Plant Physiology**, Collingwood, v. 26, n. 5, p. 401-409, 1999.

ZHAO, Z.; MA, J. F.; SATO, K.; TAKEDA, K. Differential Al resistance and citrate secretion in barley (*Hordeum vulgare* L.). **Planta**, New York, v. 217, n. 5, p. 794-800, 2003.

ZHENG, S. J.; MA, J. F.; MATSUMOTO, H. Continuous secretion of organic acids is related to aluminum resistance during relatively long-term exposure to aluminum stress. **Physiologia Plantarum**, Oxford, v. 103, n. 2, p. 209-214, 1998a.

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**, Rockville, v. 117, n. 3, p. 745-751, 1998b.

**CAPÍTULO 2**  
**VALIDAÇÃO DO EFEITO DO GENE *Alt<sub>SB</sub>* QUE CONTROLA**  
**TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO EM LINHAGENS RECOMBINANTES**  
**ENDOGÂMICAS DE SORGO CULTIVADAS EM SOLUÇÃO**  
**NUTRITIVA**

## RESUMO

SILVA, Lidianne Assis. Validação do efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>* que controla tolerância ao alumínio em linhagens recombinantes endogâmicas de sorgo cultivadas em solução nutritiva. In: \_\_\_\_\_. **Validação do efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>* que controla tolerância ao alumínio em sorgo**. 2008. Cap. 2, p. 26-49. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.\*

Este trabalho foi realizado com o objetivo de estudar e validar o gene *Alt<sub>SB</sub>* que controla tolerância ao Al tóxico no crescimento de raiz seminal (CRS) de linhagens recombinantes endogâmicas, cultivadas em solução nutritiva com 2 níveis de Al tóxico (0 e 27 $\mu$ M). Foram avaliadas 90 linhagens derivadas do cruzamento de BR007B (susceptível) e SC283 (tolerante), linhagens contrastantes quanto à resposta ao Al tóxico e os dois parentais. O experimento foi realizado em blocos ao acaso, num esquema fatorial (92x2) sendo 90 linhagens e os dois parentais, cultivadas em dois níveis de Al (0 e 27 $\mu$ M), com duas repetições. As características avaliadas foram crescimento de raiz seminal inicial (CRI), crescimento líquido de raiz (CLR) após 5 dias com e sem Al, crescimento líquido de raiz (CLR) 5 dias relativo à zero, crescimento relativo de raiz seminal (CRRS) e crescimento relativo raiz seminal (CRRS) relativo à zero. Foram observadas diferenças significativas entre linhagens para CLR 5 dias e CRRS em ambos os níveis de Al (0 e 27 $\mu$ M). Todas as linhagens com CLR 5 dias abaixo de 15 cm, no nível 27 $\mu$ M de Al, foram classificadas corretamente como susceptíveis e todas as linhagens com CLR 5 dias acima 20 cm foram classificadas corretamente como tolerantes. Seis linhagens com CLR 5 dias estimados entre 15-20 cm não foram claramente fenotipadas. Usando o valor de 20% para a classificação de linhagens no CRRS, a 27 $\mu$ M de Al, 87 das 90 linhagens foram corretamente classificadas de acordo com a fenotipagem. Somente três linhagens tolerantes obtiveram CRRS menor que 20%. A validação do gene *Alt<sub>SB</sub>*, que controla a tolerância ao Al, foi obtida com sucesso no crescimento de raiz seminal em solução nutritiva, na concentração 27 $\mu$ M de Al. O gene *Alt<sub>SB</sub>* foi validado em todas as características avaliadas.

---

\*Comitê de Orientação: Prof. Dr. João Cândido de Souza (Orientador), Pesquisador Dr. Robert Eugene Schaffert (Co-orientador)

## ABSTRACT

SILVA, Lidianne Assis. Validation of the effect of the gene that controls aluminum tolerance in nutrient solution with sorghum recombinant lines. In: \_\_\_\_\_. **Validação do efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>* que controla tolerância ao alumínio em sorgo**. 2008. Cap. 2, p. 26-49. Dissertation (Master in Plant Genetics and Breeding) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.\*

The objective of this study was to validate and characterize the effect of the gene in sorghum for tolerance to Al toxicity, *Alt<sub>SB</sub>*, on seminal root growth in nutrient solution with and without Al using recombinant inbred lines. Ninety recombinant inbred lines derived from the cross of BR007B (susceptible) and SC283 (tolerant), lines contrasting for tolerance to aluminum toxicity and the two parents were evaluated. A factorial experiment (92x 2x2) with 90 entries with two parents, two levels of Al (0 e 27 $\mu$ M) and two replications was used with a randomized complete block design. The characteristics evaluated were initial seminal root length, net seminal root growth in five days (NSRG), relative seminal root growth (RSRG), NSRG relative to zero Al and RSRG relative to zero Al. Significant differences between genotypes were observed for NSRG and RSRG at both levels of Al (0 $\mu$ M and 27 $\mu$ M). Both NSRG and RSRG were effective in grouping the recombinant inbred lines into their appropriate genotype based on genotyping data available at Embrapa Maize and Sorghum. All genotypes with NSRG below 15 cm in the 27 $\mu$ M solution were correctly classified as susceptible and all genotypes with NSRG above 20 cm were correctly classified as tolerant. Six recombinant inbred lines with NSRG values between 15 – 20 cm were not clearly phenotyped. Using the value of 20 for RSRG at 27 $\mu$ M Al to separate the recombinant inbred lines into their appropriate class correctly phenotyped 87 of the 90 recombinant inbred lines. Only three tolerant recombinant inbred lines had RSRG of less than 20. The validation of the gene *Alt<sub>SB</sub>* that controls the tolerance to Al was, it was obtained with success in the growth of seminal root in nutritious solution, in Al concentration 27 $\mu$ M, and the gene *Alt<sub>SB</sub>* was validated in all the appraised characteristics.

---

\*Guidance Committee: Dr. João Cândido de Souza (Major Professor), Dr. Robert Eugene Schaffert

## 1 INTRODUÇÃO

O sorgo (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) é o quinto cereal mais produzido no mundo, depois do milho, do trigo, do arroz e da cevada. A produção mundial, em 2007, foi de, aproximadamente, 58,7 milhões de toneladas de grãos, obtidas em uma área plantada de 44,7 milhões de hectares. As maiores áreas cultivadas com sorgo encontram-se nos continentes africano e asiático (Ryan et al., 1993).

No Brasil, 127 milhões de hectares do cerrado são viáveis para a utilização agrícola e estes são compostos por solos ácidos, dos quais uma das principais limitações à produção vegetal é a toxidez de alumínio. O ápice radicular é o sítio primário da ação tóxica desse metal, que ocasiona uma inibição do crescimento do sistema radicular, restringindo a absorção de água e de nutrientes pela planta. Vários mecanismos de tolerância ao alumínio vêm sendo postulados e podem ser classificados, segundo Jorge & Arruda (1997), em dois grupos: I) mecanismos externos, em que as plantas tolerantes liberam ácidos orgânicos pela raiz, principalmente citrato e ou malato, que se ligam ao alumínio formando complexos estáveis, impedindo a absorção pela planta e II) mecanismos internos, em que o alumínio é absorvido para o interior da planta e, conseqüentemente, para a célula, em que é inativado ou isolado no interior do vacúolo.

Apesar de haver práticas agronômicas capazes de minimizar os efeitos danosos do alumínio, é muito difícil corrigir o problema no subsolo (20-60 cm). A forma mais eficiente e economicamente viável de aumentar a produtividade agrícola e a estabilidade de produção em solos ácidos consiste na prática de calagem na superfície (0-20 cm) e na utilização de cultivares mais tolerantes. Com o propósito de aperfeiçoar o programa de melhoramento de sorgo para AA

obtenção de genótipos tolerantes a solos ácidos, a Embrapa Milho e Sorgo vem realizando um programa de pesquisa para desenvolver cultivares de sorgo com maior tolerância ao Al tóxico.

Este trabalho foi realizado com o objetivo de estudar e validar o gene *Alt<sub>SB</sub>* (Magalhães et al., 2007) que controla tolerância ao Al tóxico no crescimento de raiz seminal (CRS) de linhagens recombinantes endogâmicas, cultivadas em solução nutritiva com dois níveis de Al tóxico (0 e 27 $\mu$ M).

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Local

A avaliação de linhagens recombinantes endogâmicas foi conduzida em maio de 2007, na Câmara de Crescimento da Embrapa Milho e Sorgo, localizada no município de Sete Lagoas, MG, à uma altitude de 766,73 metros e coordenadas de latitude 19° 27' 57" e longitude 44° 14' 49".

### 2.2 Material Genético

Um conjunto de linhagens recombinantes endogâmicas foi desenvolvido pela Embrapa Milho e Sorgo, com finalidade de estudar e validar o efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>* que controla a tolerância ao AI. A partir do cruzamento das linhagens BR007B e SC283 (Tabela 1), as quais são contrastantes quanto à tolerância ao AI, sendo a primeira susceptível e a segunda tolerante portadora do gene *Alt<sub>SB</sub>*, obtiveram-se as gerações F<sub>1</sub> e F<sub>2</sub>. Nesta geração selecionaram-se 500 progênies, que foram conduzidas pelo método SSD até a geração F<sub>2.8</sub> (S<sub>7</sub>). Destas, 90 progênies de porte variando entre 90 a 160 cm foram selecionadas e utilizadas neste trabalho.

**TABELA 1.** Características das linhagens de sorgo BR007B (susceptível) e SC283(tolerante) contrastantes para tolerância ao Al, utilizadas no estudo da validação do gene *Alt<sub>SB</sub>*. “Grupos” correspondem às raças morfológicas (“working groups”, segundo Murty et al., 1967).

Linh.	Outro Nome	Identificador IS <sup>b</sup>	Pedigree <sup>c</sup>	Grupos	Sítios de coleta
BR007B	CMSXS101B	-	PU932242	-	USA
SC283	CMSXS136	IS7173C	IS7173CRC4-dwarf Martin B	Conspicuuum	Tanzânia

<sup>b</sup> IS corresponde à denominação do ICRISAT

<sup>c</sup> Caniato et al., 2007.

### 2.3 Delineamento experimental e condução do experimento

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com duas repetições, sendo avaliados em esquema fatorial 92x2, com 92 acessos (90 linhagens recombinantes endogâmicas e os 2 parentais) em 2 níveis de Al tóxico, com as seguintes atividades (entre chaves) e concentrações (entre colchetes), respectivamente, {0}[0] µM, ou seja, o controle e {27}[148] µM. Cada parcela experimental foi constituída de sete plântulas e as atividades das soluções nutritivas foram estimadas com o software de especiação GEOCHEM-PC (Parker et al., 1995).

Sementes das linhagens foram escarificadas com areia esterilizada, por cinco minutos, para a quebra de dormência, sendo posteriormente esterilizadas com hipoclorito de sódio (0,525%), por 10 minutos, sob agitação constante e enxaguadas oito vezes com água destilada. As sementes foram germinadas em rolos de papel de germinação umedecidos em água deionizada por um período de quatro dias, em câmara de crescimento, com temperatura diurna média de 27±3°C, noturna de 20±3°C e fotoperíodo de 12 horas. As plântulas foram, então, transferidas para copos plásticos perfurados, acomodados em placas de PVC dentro de bandejas plásticas contendo 8,5 litros de solução nutritiva. As plântulas foram mantidas, por 24 horas, em solução nutritiva completa sem Al,



como preconizado por Magnavaca et al. (1987), com a seguinte composição (Tabela 2):

Após esse período, foi adicionada solução nutritiva com a mesma constituição anterior, porém, com a adição de  $\text{AlK}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$  no nível  $27\mu\text{M}$ , nos tratamentos contendo Al e pH 4,0. A solução foi continuamente aerada durante todo o período experimental. Os experimentos foram conduzidos em câmara de crescimento, utilizando-se as mesmas condições ambientais utilizadas para germinação, ou seja, temperatura diurna média de  $27\pm 3^\circ\text{C}$ , noturna de  $20\pm 3^\circ\text{C}$  e fotoperíodo de 12 horas.

**TABELA 2.** Composição de solução nutritiva sem Al.

Nutrientes	Concentração ( $\mu\text{M}$ )
Ca	3527
K	2354
Mg	855
N-NO <sub>3</sub>	10857
NNH <sub>4</sub>	1300
P	45
S	587
B	25
Fe	77
Mn	9,1
Cu	0,63
Mo	0,83
Zn	2,29
Na	1,74
Fe-HEDTA	75
Cl	596

## **2.4 Características avaliadas**

### **a) Crescimento de raiz inicial (CRI)**

O crescimento de raiz inicial foi obtido com auxílio de uma régua graduada em mm, após 24 horas de adaptação das plântulas em solução nutritiva sem Al. Em seguida, as plântulas pertencentes ao tratamento com estresse foram submetidas à solução nutritiva, com concentração de 27 $\mu$ M de Al.

### **b) Crescimento líquido de raiz (CLR) após cinco dias (120h), com e sem Al (mm)**

Após 5 dias da medição do CRI, o crescimento líquido de raiz (mm) foi obtido por meio da fórmula:  $CLR = CRT_i - CRI_{i-1}$ , em que  $CRT_i$  é o comprimento de raiz no tempo i e  $CRI_{i-1}$  é o comprimento de raiz, medido anteriormente ao tempo i.

### **c) Crescimento líquido de raiz (CLR) 5 dias com Al relativo à zero**

O crescimento líquido 5 dias com Al relativo a zero (%) foi obtido pela fórmula:  $CLR\ 5\ dias\ com\ Al\ relativo\ a\ zero = (CLR\ 5\ dias_{27\mu M} / CLR\ 5\ dias_{0\mu M}) * 100$ .

### **d) Crescimento relativo de raiz seminal (CRRS)**

O crescimento relativo de raiz seminal (%) foi obtido por meio da fórmula:  $CRRS = [(CLR - CRI) / CRI] * 100$ .

### **e) Crescimento relativo de raiz seminal relativo (CRRS) a zero**

O crescimento relativo raiz seminal relativo a zero (%) foi obtido por meio da fórmula:  $CRRS\ relativo\ a\ zero = (CRRS_{27\mu M} / CRRS_{0\mu M}) * 100$ .

Para análise estatística dos dados, foi considerada a média aritmética dos comprimentos das sete plântulas por parcela. Os resultados foram usados para

determinar se as linhagens são ou não susceptíveis ao AI tóxico em solução nutritiva.

## 2.5 Análises estatísticas e genéticas

Todas as análises genético-estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa computacional GENES (Cruz, 2001). Foi realizada uma análise de variância de acordo com o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + A_j + GA_{ij} + B/A_{jk} + e_{ijk};$$

em que:

$Y_{ijk}$ : valor observado para a característica obtida no k-ésimo bloco, avaliada dentro do j-ésimo nível de AI para i-ésima linhagem;

$\mu$ : média geral;

$G_i$ : efeito da i-ésima linhagem, sendo  $i= 1, 2, \dots, 92$ , considerado fixo;

$A_j$ : efeito do j-ésimo nível de AI, sendo  $j= 1$  e  $2$ , considerado fixo;

$GA_{ij}$ : efeito da interação entre a linhagem e o nível de AI, considerado fixo;

$B/A_{jk}$ : efeito do k-ésimo bloco dentro do j-ésimo nível de AI, considerado aleatório;

$e_{ijk}$ : efeito do erro experimental associado à observação de ordem  $ijk$ , considerado aleatório.

Na Tabela 3 é apresentado o esquema da análise de variância, com as respectivas esperanças de quadrados médios e teste F.

**TABELA 3.** Esquema da análise de variância com as respectivas fontes de variação (FV), graus de liberdade (GL), quadrados médios (QM), esperanças de quadrados médios [E(QM)] e estatística F.

FV	GL	QM	E (QM) <sup>1/</sup>	F
<b>Blocos/Nível</b>	a(b - 1)	QMB	$\sigma^2 + g\sigma_B^2$	
<b>Nível (A)</b>	a - 1	QMA	$\sigma^2 + g\sigma_B^2 + gr\Phi_a$	<i>QMA/QMB</i>
<b>Linhagem (G)</b>	g - 1	QMG	$\sigma^2 + ar\Phi_g$	<i>QMG/QMR</i>
<b>GxA</b>	(g - 1)(a - 1)	QMGA	$\sigma^2 + r\Phi_{ga}$	<i>QMGA/QMR</i>
<b>Resíduo</b>	a(g - 1)(b - 1)	QMR	$\sigma^2$	
<b>Total</b>	bga - 1			

<sup>1/</sup> a = número de níveis de AI; b = número de blocos; g = número de linhagens

Para as características que demonstraram diferenças estatísticas significativas pelo teste F, no intuito de verificar diferenças entre médias, foi realizado o teste de agrupamento de Scott-Knott, a 5% de probabilidade, entre as linhagens, dentro de cada nível de AI.

### 2.5.1 Parâmetros genéticos e correlação genética e fenotípica

A partir dos quadrados médios foram estimadas as variâncias fenotípica ( $\sigma_f^2$ ) e ambiental ( $\sigma_e^2$ ), componente quadrático genotípico ( $\Phi_g$ ), coeficiente de determinação genotípico ( $H^2$ ), coeficientes de variação genética ( $CV_g$ ) e o índice de variação, que é a razão entre o coeficiente de variação genética e ambiental ( $CV_g/CV_e$ ).

#### a) Variância fenotípica ( $\sigma_f^2$ )

$$\hat{\sigma}_f^2 = \frac{QMG}{ar}$$

#### b) Componente quadrático genotípico ( $\Phi_g$ )

$$\Phi_g = \frac{QMG - QMR}{ar}$$

c) Variância ambiental ( $\sigma_e^2$ )

$$\sigma_e^2 = \text{QMR}$$

d) Coeficiente de determinação ( $H^2$ )

$$H^2 = \frac{\Phi_g}{\text{QMG}/ar}$$

e) Índice de variação ( $I_v$ )

$$I_v = \frac{CV_g}{CV_e}$$

Foram estimados, também, os coeficientes de correlação genética ( $r_G$ ) e fenotípica ( $r_F$ ) das linhagens entre as características CLR 5 dias com e sem Al e crescimento relativo raiz seminal (CRRS), utilizando-se as seguintes expressões.

$$r_G = \frac{COV_{G(X,Y)}}{\sqrt{(\Phi_X \cdot \Phi_Y)}}$$

$$r_F = \frac{COV_{F(X,Y)}}{\sqrt{(\sigma_F^2_X \cdot \sigma_F^2_Y)}}$$

Em que:

$COV_{G(x,y)}$  corresponde aos componentes quadráticos genotípicos entre os caracteres X e Y;

$\Phi_x$  corresponde ao componente quadrático genotípico do caráter X;

$\Phi_y$  corresponde ao componente quadrático genotípico do caráter Y;

$COV_{Fxy}$  corresponde às covariâncias fenotípicas entre os caracteres X e Y ;

$\sigma_{F_x}^2$  corresponde à variância fenotípica do caráter X;

$\sigma_{F_y}^2$  corresponde à variância fenotípica do caráter Y.

As significâncias dos coeficientes de correlação genotípica e fenotípica foram avaliadas pelo teste t, a 1 e 5% de probabilidade.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo da análise de variância para o crescimento líquido de raiz (CLR) após cinco dias (120h), com e sem alumínio e crescimento relativo de raiz seminal (CRRS) está apresentado na Tabela 4. Para as duas características avaliadas, ocorreram diferenças significativas ( $P < 0,01$ ) para interação entre linhagens x níveis de Al. O desdobramento da fonte de variação linhagens dentro de cada nível de Al demonstrou diferenças significativas ( $P < 0,01$ ) entre as linhagens dentro dos dois níveis de Al avaliados para as duas características.

É importante enfatizar que o sucesso na avaliação de linhagens está diretamente ligado com a precisão experimental. No presente caso, a precisão foi avaliada pelo coeficiente de variação (CV%) e os resultados evidenciaram que os CV das características avaliadas ficaram dentro do limites que são geralmente relatados em experimentos similares com a cultura do sorgo (Paes et al., 2007; Silva et al., 2007).

A diferença significativa para níveis de Al (Tabela 4) já era esperada, pois o nível  $0\mu\text{M}$  de Al não recebeu estresse como o nível  $27\mu\text{M}$ . As linhagens apresentaram diferenças para CLR (mm) e CRRS (%) em ambos os níveis de concentração de Al (0 e  $27\mu\text{M}$ ). Como as 90 linhagens foram obtidas do cruzamento BR007B (susceptível) x SC283 (tolerante), linhagens contrastantes para a tolerância ao Al, sugere-se, assim, que as mesmas tenham variabilidade no nível de  $0\mu\text{M}$  de Al, e que tenham crescimento de raiz diferente nos períodos iniciais. A linhagem BR007B cresce com muito mais intensidade do que a linhagem SC283 nos períodos iniciais de crescimento no nível de  $0\mu\text{M}$  de Al, podendo ser este o motivo da formação de quatro grupos, obtidos pelo teste de agrupamento Scott-Knott.

**TABELA 4.** Resumo da análise de variância para as características de crescimento líquido de raiz (CLR) após cinco dias e crescimento relativo raiz seminal (CRRS), obtidas no experimento conduzido em câmara de crescimento da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

F.V	GL	Quadrado Médio	
		CLR 5 Dias	CRRS
<b>Bloco/Nível</b>	2	2152,7163	3997,5507
<b>Níveis (A)</b>	1	138469,4417*	162082,2652*
<b>Linhagem (G)</b>	91	591,4818**	657,7306**
<b>G*A</b>	91	806,6038**	886,2653**
<b>G/A</b>	182	699,0428**	771,9979**
<b>G/A 1</b>	91	1117,9099**	976,4491**
<b>G/A 2</b>	91	280,1758**	567,5467**
<b>Resíduo</b>	182	76,9580	166,3656
<b>CV (%)</b>		20,29	26,20

\*\*, \*Significativo a 1% e 5% de probabilidade, pelo teste de F e CV(%) Coeficiente de variação.

É possível observar as médias de crescimento de raiz das linhagens que foram agrupadas pelo teste Scott-Knott a ( $P < 0,05$ ) na Tabela 5. No nível  $0\mu\text{M}$  de Al, ou seja, sem Al formaram-se quatro grupos de médias para as características CLR 5 dias sem Al e quatro grupos na característica CRRS (%), não coincidindo com os resultados de classificação das linhagens quanto à tolerância ao Al, que foram obtidos no nível  $27\mu\text{M}$  de Al.

**TABELA 5.** Crescimento líquido diário de raiz (CLR mm) com 5 dias e crescimento relativo raiz seminal (CRRS%) no nível 0µM de Al de plântulas de 90 linhagens de sorgo e seus 2 parentais avaliadas em solução nutritiva, com o referente teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade e a genotipagem de classificação quanto à tolerância ao Al. Dados obtidos no experimento conduzido em câmara de crescimento da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Nível 0 µM							
Linhagem	Genótipo**	CLR 5 Dias*	CRRS*	Linhagem	Genótipo**	CLR 5 Dias*	CRRS*
117	T	53,9c	58,4c	349	S	75,2b	79,2b
442	T	95,9a	86,1b	375	S	77,4	71,7c
316	T	27,7d	48,5d	73	S	70,3b	75,3b
451	T	100,6a	129,3a	447	S	59,3c	66,2c
88	T	28,3d	34,1d	67	S	87,6b	82,9b
344	T	41,6d	42,9d	445	S	54,0c	58,6c
81	T	84,8b	122,7a	36	S	98,4a	93,5b
13	T	42,5d	53,9d	453	S	63,7c	84,2b
462	T	49,5c	60,1c	262	S	85,7b	75,7b
105	T	62,4c	70,5c	156	S	117,5a	108,6a
134	T	23,2d	28,6d	374	S	76,6b	74,9b
456	T	49,1c	63,2c	377	S	103,9a	95,8b
370	T	79,3b	79,0b	122	S	64,6c	69,5c
409	T	26,2d	31,4d	60	S	102,2a	108,7a
310	T	58,5c	70,6c	24	S	55,9c	56,0c
305	T	86,3b	80,4b	355	S	89,6b	89,1b
225	T	53,9c	59,1c	406	S	34,4d	32,0d
480	T	30,3d	53,2c	250	S	53,8c	67,9c
324	T	45,1a	49,9d	228	S	60,6c	57,1c
220	T	42,6d	51,1d	28	S	87,2b	83,4b
348	T	33,2d	54,1c	26	S	36,7d	45,3d
41	T	54,5c	77,3b	80	S	64,7c	68,0c
454	T	57,6c	83,4b	443	S	50,4c	54,7c
275	T	43,7d	54,2c	217	S	87,6b	113,3a
436	T	40,6d	59,1c	274	S	51,7c	55,2c
261	T	79,4b	88,3b	BR007B	S	22,0d	28,4d

“...continua...”



“TABELA 5, Cont.”

Linhagem	Genótipo**	CLR 5 Dias*	CRRS*	Linhagem	Genótipo**	CLR 5 Dias*	CRRS*
SC283	T	4,7d	36,5d	79	S	58,4c	67,1c
59	T	46,5c	59,3c	230	S	59,3c	59,0c
66	T	44,5d	60,9c	386	S	85,7b	91,5b
56	T	109,9a	99,9a	475	S	88,0b	99,5a
325	T	107,8a	107,8a	259	S	48,9c	54,8c
300	T	101,3a	114,6a	283	S	36,9d	49,7d
363	T	33,8d	45,7d	65	S	30,5d	42,0d
478	T	66,4c	117,4a	328	S	80,5b	90,4b
69	T	29,8d	45,4d	439	S	65,6c	66,3c
309	T	72,8b	74,5b	315	S	64,7c	86,4b
201	T	93,7a	104,5a	139	S	96,4a	87,9b
189	T	46,8c	61,3c	123	S	47,1c	51,3d
441	T	24,6d	38,6d	302	S	79,8b	66,4c
7	T	54,1c	51,9d	108	S	38,0d	50,4d
461	T	66,9c	87,2b	160	S	59,5c	65,9c
306	T	77,2b	79,3b	172	S	58,4c	68,9c
362	T	99,1a	95,7b	-	-	-	-
304	T	55,4c	61,9c	-	-	-	-
133	T	74,7b	64,9c	-	-	-	-
188	T	38,6d	49,4d	-	-	-	-
208	T	89,0b	78,2b	-	-	-	-
203	T	36,4d	58,6c	-	-	-	-
345	T	79,0b	80,4b	-	-	-	-
422	T	60,4c	78,0b	-	-	-	-
<b>Média</b>		<b>59,2</b>	<b>69,5</b>			<b>68,5</b>	<b>72,3</b>

\*Médias seguidas da mesma letra, dentro de uma mesma característica não diferem entre si, pelo teste de agrupamento Scott-Knott, a 5% de probabilidade. \*\*Classificação quanto à genotipagem de linhagens. (T) tolerantes: presença do gene *Alt<sub>SB</sub>* do parental SC283 e (S) susceptível: ausência do gene *Alt<sub>SB</sub>* do parental BR007B. Dados obtidos em um laboratório externo, utilizando os marcadores moleculares *ISU52*, *M181g10* e *ctg29* flanqueando o gene *Alt<sub>SB</sub>*.

Na Tabela 6 são apresentados o CLR 5 dias com Al (mm), CLR 5 dias relativo à zero (%), CRRS (%) e CRRS relativo à zero (%) de 90 linhagens e dois parentais com suas respectivas classificações quanto à tolerância ao Al no nível 27 $\mu$ M de Al. Todas as linhagens com CLR 5 dias abaixo de 15 mm foram classificadas corretamente como susceptíveis e todas as linhagens com CLR 5 dias acima 20 mm foram classificadas corretamente como tolerantes. Seis linhagens com CLR 5 dias estimados entre 15-20 mm não foram claramente fenotipadas. Utilizando-se o valor de 20% para a classificação de linhagens no CRRS, 87 das 90 linhagens foram corretamente classificadas de acordo com a fenotipagem. Somente três linhagens tolerantes obtiveram CRRS menor que 20%.

Vale a ressalva de que os genótipos de classificação das linhagens em tolerantes (T), presença do gene *Alt<sub>SB</sub>* e susceptíveis (S), ausência do gene *Alt<sub>SB</sub>*, foram obtidas por meio de genotipagem, ou seja, dois marcadores STS flanqueando o gene *Alt<sub>SB</sub>* foram avaliados entre as linhagens parentais BR007B e SC283. Os locos STS *m181* e *ctg29*, que foram desenvolvidos como parte de um projeto conjunto entre a Embrapa Milho e Sorgo, a Universidade de Cornell e a Universidade do Texas A&M, estão ligados ao gene *Alt<sub>SB</sub>* à 0,1 cM e 0,5 cM, segundo estimativa obtida em uma população de 2.085 progênies F2 derivadas de BR007B x SC283. Os marcadores polimórficos entre os parentais foram avaliados nas populações F2 (Magalhães et al., 2007).

Pode-se observar que o teste de agrupamento Scott-Knott (P <0,05) não foi eficiente na separação de linhagens tolerantes e susceptíveis de acordo com as características avaliadas quanto ao efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>*. Mas, de acordo com as características avaliadas e a genotipagem, foi confirmada a presença do gene *Alt<sub>SB</sub>* e a variabilidade das linhagens neste nível de concentrações de Al. Isto também sugere que as características avaliadas podem ser utilizadas para a seleção de linhagens tolerantes ao Al.

**TABELA 6.** Crescimento líquido diário de raiz (CLR mm) com 5 dias no nível 27 $\mu$ M de Al, CLR 5 dias relativo à zero, crescimento relativo raiz seminal (CRRS%) e CRRS relativo à zero de plântulas de 90 linhagens de sorgo e seus 2 parentais, avaliados em solução nutritiva, com o referente teste Scott-Knott, a 5% de probabilidade e a genotipagem de classificação quanto à tolerância ao Al. Dados obtidos no experimento conduzido em câmara de crescimento da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Nível 27 $\mu$ M											
Lin.	Gen.**	CLR5 dias*	CLR5 dias0	CRRS*	CRRS0	Lin.	Gen.**	CLR 5 dias*	CLR5 dias0	CRRS*	CRRS0
117	T	48,3a	89,6	51,9a	88,9	349	S	17,6b	23,4	18,7b	23,6
442	T	45,9a	47,9	41,0a	47,6	375	S	16,2b	20,9	14,9b	20,8
316	T	43,7a	157,8	68,7a	141,6	73	S	16,1b	22,9	16,2b	21,5
451	T	43,7a	43,4	50,7a	39,2	447	S	15,4b	26,0	16,2b	24,5
88	T	42,3a	149,5	48,7a	142,8	67	S	15,2b	17,4	13,7b	16,5
344	T	42,2a	101,4	44,8a	104,4	445	S	15,2b	28,1	16,1b	27,5
81	T	41,7a	49,2	69,6a	56,7	36	S	14,6b	14,8	13,1b	14,0
13	T	41,3a	97,2	52,3a	97,0	453	S	14,5b	22,8	18,3b	21,7
462	T	41,1a	83,0	51,9a	86,4	262	S	14,4b	16,8	12,3b	16,2
105	T	39,6a	63,5	44,5a	63,1	156	S	14,2b	12,1	12,2b	11,2
134	T	39,5a	170,3	46,7a	163,3	374	S	14,0b	18,3	12,5b	16,7
456	T	39,0a	79,4	46,0a	72,8	377	S	13,8b	13,3	12,0b	12,5
370	T	38,6a	48,7	38,0a	48,1	122	S	13,5b	20,9	12,7b	18,3
409	T	38,5a	146,9	44,8a	142,7	60	S	13,4b	13,1	14,0b	12,9
310	T	38,3a	65,5	46,5a	65,9	24	S	13,3b	23,8	12,8b	22,9
305	T	37,9a	43,9	33,0a	41,0	355	S	13,3b	14,8	12,6b	14,1
225	T	37,8a	70,1	41,9a	70,9	406	S	13,3b	38,7	11,4b	35,6
480	T	37,8a	124,8	60,3a	113,3	250	S	13,0b	24,2	16,0b	23,6
324	T	37,2a	82,5	39,8a	79,8	228	S	12,9b	21,3	11,8b	20,7
220	T	37,1a	87,1	43,1a	84,3	28	S	12,8b	14,7	11,2b	13,4
348	T	36,8a	110,8	59,3a	109,6	26	S	12,7b	34,6	13,7b	30,2
41	T	36,1a	66,2	51,6a	66,8	80	S	12,7b	19,6	12,3b	18,1
454	T	35,5a	61,6	46,7a	56,0	443	S	12,6b	25,0	13,4b	24,5
275	T	35,0a	80,1	40,4a	74,5	217	S	12,4b	14,2	13,9b	12,3
436	T	34,7a	85,5	45,0a	76,1	274	S	12,4b	24,0	12,1b	21,9
261	T	33,4a	42,1	37,5a	42,5	BR7	S	12,3b	55,9	18,7b	65,8

“...continua...”

“TABELA 6, Cont.”

Lin.	Gen.**	CLR5 dias*	CLR5 dias0	CRRS*	CRRS0	Lin.	Gen.**	CLR 5 dias*	CLR5 dias0	CRRS*	CRRS0
SC283	T	33,2a	93,0	55,6a	87,3	79	S	12,2b	20,9	13,5b	20,1
59	T	32,8a	70,5	40,8a	68,8	230	S	12,2b	20,6	11,1b	18,8
66	T	32,6a	73,3	41,4a	68	386	S	12,1b	14,1	12,2b	13,3
56	T	32,2a	29,3	28,7b	28,7	475	S	12,0b	13,6	12,8b	12,9
325	T	32,2a	29,9	30,3b	28,1	259	S	11,8b	24,1	13,5b	24,6
300	T	31,8a	31,4	34,1a	29,8	283	S	11,7b	31,7	15,3b	30,8
363	T	31,7a	93,8	43,0a	94,1	65	S	11,4b	37,4	14,4b	34,3
478	T	30,9a	46,5	51,8a	44,1	328	S	11,4b	14,2	13,0b	14,4
69	T	29,3a	98,3	43,5a	95,8	439	S	10,5b	16,0	10,4b	15,7
309	T	29,0a	39,8	30,5b	40,9	315	S	10,1b	15,6	13,9b	16,1
201	T	27,6a	29,5	28,0b	26,8	139	S	9,9b	10,3	8,5b	9,7
189	T	27,5a	58,8	34,6a	56,4	123	S	9,8b	20,8	10,5b	20,5
441	T	26,4a	107,3	41,3a	107	302	S	9,7b	12,2	8,4b	12,7
7	T	26,0a	48,1	23,1b	44,5	108	S	9,2b	24,2	11,5b	22,8
461	T	26,0a	38,9	30,6b	35,1	160	S	8,9b	15,0	9,6b	14,6
306	T	24,9b	32,3	24,9b	31,4	172	S	8,6b	14,7	9,2b	13,4
362	T	23,7b	23,9	22,0b	23	-	-	-	-	-	-
304	T	23,5b	42,4	25,7b	41,5	-	-	-	-	-	-
133	T	21,8b	29,2	18,9b	29,1	-	-	-	-	-	-
188	T	20,3b	52,6	24,7b	50	-	-	-	-	-	-
208	T	20,3b	22,8	16,6b	21,2	-	-	-	-	-	-
203	T	19,1b	52,5	28,9b	49,3	-	-	-	-	-	-
345	T	18,6b	23,5	17,5b	21,8	-	-	-	-	-	-
422	T	16,9b	28,0	22,4b	28,7	-	-	-	-	-	-
<b>Média</b>		<b>33,2</b>	<b>68,4</b>	<b>39,8</b>	<b>66,1</b>			<b>12,7</b>	<b>20,4</b>	<b>13,0</b>	<b>19,4</b>

\*Médias seguidas da mesma letra, dentro de uma mesma característica, não diferem entre si pelo teste de agrupamento Scott-Knott, a 5% de probabilidade. \*\*Classificação quanto à genotipagem de linhagens. (T) tolerantes: presença do gene *Alt<sub>SB</sub>* do parental SC283 e (S) susceptível: ausência do gene *Alt<sub>SB</sub>* do parental BR007B. Dados obtidos em um laboratório externo, utilizando os marcadores moleculares *ISU52*, *M181g10* e *ctg29* flanqueando o gene *Alt<sub>SB</sub>*.

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados o crescimento líquido de raiz 5 dias (CLR) e CRRS de linhagens de sorgo classificadas como tolerantes ou susceptíveis ao Al, cultivadas nas duas concentrações de Al avaliadas. Pode-se observar que o crescimento médio entre linhagens tolerantes e susceptíveis no nível 0 $\mu$ M de Al foi semelhante, dentro das duas características avaliadas. Já no nível 27 $\mu$ M de Al as linhagens tolerantes apresentaram médias para o crescimento líquido de raiz (CLR) 5 dias superiores em relação às linhagens susceptíveis com valor médio superior de 20,5 mm. O mesmo ocorreu para o CRRS de linhagens tolerantes com um valor de 26,8% superior às susceptíveis. Com esses valores médios pode-se confirmar a variabilidade existente entre as linhagens e a eficiência das características avaliadas para a validação do gene *Alt<sub>SB</sub>*.

**TABELA 7.** Valores máximos, mínimos e médios de crescimento líquido raiz (CLR mm) 5 dias de linhagens de sorgo tolerantes e susceptíveis ao Al, nas concentrações 0 e 27 $\mu$ M de Al e valores médios dos parentais BR007B e SC283. Dados obtidos na câmara de crescimento da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

CLR 5 dias (mm)	Nº Linhagens: 49 Tolerantes		Nº Linhagens 41 Susceptíveis	
	0 $\mu$ M	27 $\mu$ M	0 $\mu$ M	27 $\mu$ M
<b>BR007B</b>	-	-	22,0	12,3
<b>SC283</b>	4,7	33,2	-	-
<b>Máximo</b>	109,9	48,3	117,5	17,6
<b>Mínimo</b>	23,2	16,9	22,0	8,6
<b>Médio</b>	59,2	33,2	68,5	12,7

**TABELA 8.** Valores máximos, mínimos e médios de crescimento relativo raiz seminal (CRRS%), de linhagens de sorgo tolerantes e susceptíveis ao Al, nas concentrações 0 e 27 $\mu$ M de Al e valores médios dos parentais BR007B e SC283. Dados obtidos na câmara de crescimento da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

CRRS (%)	N° Linhagens: 49 Tolerantes		N° Linhagens 41 Susceptíveis	
	0 $\mu$ M	27 $\mu$ M	0 $\mu$ M	27 $\mu$ M
<b>BR007B</b>	-	-	28,4	18,1
<b>SC283</b>	36,5	55,6	-	-
<b>Máximo</b>	129,3	69,6	113,3	18,7
<b>Mínimo</b>	28,6	16,6	28,4	8,4
<b>Médio</b>	69,5	39,8	72,3	13,0

Na tabela 9 são apresentados valores de crescimento líquido de raiz (CLR) 5 dias relativo a zero e crescimento relativo de raiz seminal (CRRS) relativo à zero de linhagens de sorgo tolerantes e susceptíveis ao Al cultivadas no nível 27 $\mu$ M de Al. Observa-se que as linhagens tolerantes obtiveram crescimento líquido de raiz relativo a zero superior ao das linhagens susceptíveis em, aproximadamente, 50%. O mesmo ocorreu com o crescimento relativo de raiz seminal relativo à zero, cujo valor de linhagens tolerantes foi 46% superior ao das linhagens susceptíveis.

Assim como as características mensuradas nas Tabelas 7 e 8 foram eficientes para confirmar a variabilidade existente entre as linhagens e eficientes para validar o efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>*, o mesmo ocorreu para as características mensuradas na Tabela 9.

**TABELA 9.** Valores máximos, mínimos e médios de crescimento líquido de raiz 5 dias (CLR) relativo a zero e crescimento relativo de raiz seminal (CRRS) relativo à zero de linhagens de sorgo tolerantes e susceptíveis ao Al na concentração 27 $\mu$ M de Al e valores médios dos parentais BR007B e SC283. Dados obtidos na câmara de crescimento da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Linhagens	49 Tolerantes	41 Susceptíveis	49 Tolerantes	41 Susceptíveis
	CLR 5 dias Rel. à zero	CLR 5 dias Rel. à zero	CRRS Rel. à zero	CRRS Rel. à zero
Nível 27 $\mu$ M de Al				
BR007B	-	55,9	-	65,8
SC283	93,0	-	87,3	-
Máximo	170,3	55,9	163,3	65,8
Mínimo	22,8	10,3	21,2	9,7
Médio	68,4	20,4	66,1	19,4

As estimativas de parâmetros genéticos e fenotípicos são informações importantes e de muita utilidade para auxiliar o melhorista nas tomadas de decisão quando necessárias. As estimativas de variância fenotípica ( $\sigma^2_f$ ) e variância ambiental ( $\sigma^2_e$ ) foram de maior magnitude para a característica CRRS. O mesmo não ocorreu para componente quadrático genotípico ( $\hat{\Phi}_g$ ), cuja maior magnitude foi para a característica CLR 5 dias (Tabela 10).

Os resultados correspondentes ao coeficiente de variação genética ( $CV_g$ ) (Tabela 10) que representa a razão, expressa em porcentagem, entre o desvio padrão genético e a média das linhagens, transmitem uma boa variação entre as linhagens, não variando muito nas duas características avaliadas. Uma variação análoga foi notada no índice de variação ( $I_v$ ) que expressa a razão coeficiente de variação genético e ambiental ( $CV_g/CV_e$ ), os quais apontam uma situação favorável para seleção, nas características avaliadas.

**TABELA 10.** Estimativas de variâncias fenotípica ( $\sigma^2_f$ ) e ambiental ( $\sigma^2_e$ ), e componente quadrático genotípico ( $\sigma^2_g$ ), coeficientes de variação genética ( $CV_g$ ), índice de variação ( $I_v$ ), avaliadas na Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

	CLR 5 Dias	CRRS
$\sigma^2_f$	147,8704	164,4326
$\sigma^2_e$	76,9580	166,3656
$\sigma^2_g$	128,6309	122,8412
$CV_g$ (%)	26,2368	22,5208
$I_v$	1,2928	0,8593

O coeficiente de determinação genotípico ( $H^2$ ) permite prever a probabilidade de sucesso com a seleção, uma vez que ela transmite a magnitude da variação fenotípica que pode ser herdada.

Pode-se observar, pelos dados da Tabela 11, que o menor valor de  $H^2$  foi obtido na característica crescimento relativo de raiz seminal (CRRS), no nível 27 $\mu$ M de Al (77,71%) e o valor obtido para esta mesma característica no nível 0 $\mu$ M de Al foi de 78,88%. Porém, para a característica crescimento líquido de raiz (CLR) 5 dias, o menor valor de  $H^2$  foi obtido no 27 $\mu$ M de Al (86,15%), seguido do nível 0 $\mu$ M de Al, com  $H^2$  de (89,7%). Desse modo, com esses valores de  $H^2$  obtidos, a seleção poderá ser feita com grande probabilidade de sucesso, mesmo para características quantitativas que, geralmente, apresentam valores menores para  $H^2$ .



**TABELA 11.** Coeficiente de determinação genotípico ( $H^2$  %) de crescimento líquido de raiz (CLR) 5 dias e crescimento relativo de raiz seminal (CRRS) de linhagens de sorgo avaliadas nos níveis 0 e 27 $\mu$ M de Al, na Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Níveis de Al	$H^2$	
	0 $\mu$ M	27 $\mu$ M
CLR 5 Dias	89,70	86,15
CRRS	78,88	77,71

A correlação genética e fenotípica entre as características avaliadas CLR 5 dias e CRRS foram positiva e altamente significativas, pelo teste de t ( $P < 0,01$ ). A correlação genética foi estimada em 92,93% confirmando que as duas características são controlados pelo mesmo gene *Alt<sub>SB</sub>*, que controla a tolerância ao Al e a correlação fenotípica foi 88,39%

#### 4 CONCLUSÃO

A validação do gene *Alt<sub>SB</sub>*, que controla a tolerância ao Al foi, foi obtida com sucesso no crescimento de raiz seminal em solução nutritiva, na concentração 27 $\mu$ M de Al, tendo o gene *Alt<sub>SB</sub>* sido validado em todas as características avaliadas.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CANIATO, F. F.; GUIMARÃES, C. T.; SCHAFFERT, R. E.; ALVES, V. M. C.; KOCHIAN, L. V.; BORÉM, A.; KLEIN, P. E.; MAGALHÃES, J. V. Genetic diversity for aluminum tolerance in sorghum. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 114, p. 863-876, 2007.

CRUZ, C. D. **Programa Genes**: versão Windows. Viçosa, MG: UFV, 2001. 642 p.

JORGE, R. A.; ARRUDA, P. Aluminum induced roots of aluminum-tolerant tropical maize. **Phytochemistry**, Dordrecht, v. 45, n. 4, p. 675-681, 1997.

MAGALHÃES, J. V.; LIU, J.; GUIMARÃES, C. T.; LANA, U. G. P.; ALVES, V. M. C.; WANG, Y.; SCHAFFERT, R. E.; HOEKENGA, O. A.; PIÑEROS, M. A.; SCHAFF, J. E.; KLEIN, P. E.; CARNEIRO, N. P.; COELHO, C. M.; TRICK, H. N.; KOCHIAN, L. V. A gene in the multidrug and toxic compound extrusion (MATE) family confers aluminum tolerance in sorghum. **Nature Genetics**, London, v. 39, p. 1156-1161, 2007.

MAGNAVACA, R.; GARDNER, C. O. E.; CLARK, R. B. Inheritance of aluminum tolerance in maize. In: GABELMAN, H. W.; LOUGHMAN, B. C. (Ed.). **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Dordrecht: M. Nijhoff, 1987. p. 201-212.

MURTY, B. R.; ARUNACHALEN, V.; SAXENA, R. L. Classification and catalogue of a word collection of sorghum. **Indian Journal Genetics Plant Breeding**, New Delhi, v. 27, p. 1-74, 1967.

PAES, L. W.; TARDIN, F. D.; SILVA, L. A.; MAGALHÃES, J. V.; SCHAFFERT, R. E. Desenvolvimento radicular de plântulas de sorgo avaliadas em diferentes níveis de Alumínio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 2007, São Lourenço, MG. **Resumos expandidos...** Lavras: SBMP/UFLA, 2007. CD-ROM.

PARKER, D. R.; NORVELL, W. A.; CHANEY, R. L. GEOCHEM-PC: a chemical speciation program for IBM and compatible computers. In: LOEPPERT, R. H. (Ed.). **Chemical equilibrium and reaction models**. Madison: Soil Science Society of America, 1995. p. 253-269.

RYAN, P. R.; DITOMASO, J. M.; KOCHIAN, L. V. Aluminum toxicity in roots: an investigation of spatial sensitivity and the role of the root cap. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 44, n. 2, p. 437-446, 1993.

SILVA, L. A.; MAGALHÃES, J. V.; TARDIN, F. D.; SCHAFFERT, R. E. Avaliação de linhagens e híbridos de sorgo quanto a tolerância ao alumínio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 2007, São Lourenço, MG. **Resumos expandidos...** Lavras: SBMP/UFLA, 2007. CD-ROM.

### **CAPÍTULO 3**

#### **VALIDAÇÃO DO EFEITO DO GENE *Alt<sub>SB</sub>* EM LINHAGENS RECOMBINANTES ENDOGÂMICAS DE SORGO CULTIVADAS EM TRÊS NÍVEIS DE SATURAÇÃO DE ALUMÍNIO**

## RESUMO

SILVA, Lidianne Assis. Validação do efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>* em linhagens recombinantes endogâmicas de sorgo cultivadas em três níveis de saturação de alumínio. In: \_\_\_\_\_. **Validação do efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>* que controla tolerância ao alumínio em sorgo**. 2008. Cap. 3, p. 54-75. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.\*

O trabalho foi realizado com o objetivo de validar o efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>* em linhagens recombinantes endogâmicas de sorgo cultivadas em três níveis de saturação de Al (0%, 20% e 40%), na camada 0-20 cm, num Latossolo Vermelho Escuro e realizar uma correlação entre características das linhagens obtidas no experimento de campo e aquelas obtidas em solução nutritiva. Avaliaram-se 92 acessos, sendo 90 linhagens obtidas do cruzamento de BR007B x SC283 contrastantes ao Al<sup>3+</sup> e os 2 parentais, quanto ao florescimento (dias), altura (cm) e produtividade (t ha<sup>-1</sup>). O delineamento utilizado foi blocos ao acaso, no esquema fatorial: 92x3x2 com 3 repetições. Realizaram-se uma análise de variância conjunta para ambas as safras. Houve interação significativa entre linhagens x anos x níveis (P<0,01). Sendo assim, foi realizado o desdobramento de linhagens x níveis dentro de cada ano. No ano 2007 houve diferença significativa para a interação linhagem x níveis (P<0,01), em todas as características avaliadas. O mesmo não ocorreu no ano 2008, onde somente houve significância (P<0,01) para a característica florescimento, cujo desdobramento mostra variabilidade genética das linhagens para todos os níveis de saturação de Al. Os resultados indicam existência de variabilidade genética em todos os níveis de saturação de Al, para todas as características avaliadas, bem como respostas diferenciadas entre os níveis de saturação de Al. No ano de 2008 o experimento foi implantado em janeiro, ou seja, mais cedo e, além disso, volume de chuva foi muito maior nos meses de março e abril, fugindo das condições ideais de safrinha. Este foi um dos motivos pelos quais não houve interação significativa entre linhagem x níveis, para as características altura e produtividade. Na variável produtividade, as linhagens tolerantes obtiveram médias de produtividade superiores às susceptíveis, em todos os níveis de saturação de Al, tanto na safra 2007 como na safra 2008. A maior vantagem do uso de linhagens tolerantes em relação às linhagens susceptíveis foi em 2007 no nível 40% de saturação de Al, em que a produtividade das linhagens tolerantes foi 900 kg ha<sup>-1</sup> superior às susceptíveis. Com esses resultados, torna-se claro a vantagem do uso de linhagens tolerantes. Observou-se, ainda, a correlação significativa entre as características crescimento líquido de raiz seminal

cultivadas por 5 dias em solução nutritiva no nível  $27\mu\text{M}$  e produtividade no nível 40% de saturação de Al na safra 2007, cuja magnitude foi de 0,44. Isto demonstra que plântulas com maiores crescimentos líquidos de raiz 5 dias no nível  $27\mu\text{M}$  tendem a ser mais produtivas.

---

\*Comitê de Orientação: Prof. Dr. João Cândido de Souza (Orientador), Pesquisador Dr. Robert Eugene Schaffert (Co-orientador).

## ABSTRACT

SILVA, Lidianne Assis. Validation of the effect of the gene that controls aluminum tolerance in the field with three levels of aluminum saturation using sorghum recombinant lines. In: \_\_\_\_\_. **Validação do efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>* que controla tolerância ao alumínio em sorgo**. 2008. Cap. 3, p. 54-75. Dissertation (Master in Plant Genetics and Breeding) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, Brazil.\*

The objective of this study was to validate and characterize the effect of the gene in sorghum for tolerance to Al toxicity, *Alt<sub>SB</sub>*, on grain yield ( $t\ ha^{-1}$ ), plant height (cm) and days to 50% flowering and correlate these results with seminal root traits obtained in nutrient solution with Al. Ninety recombinant inbred lines derived from the cross of BR007B and, lines contrasting for tolerance to aluminum toxicity were evaluated in the phenotyping site Embrapa Maize and Sorghum in 2007 and 2008. The phenotyping site was developed with three levels of Al saturation in the topsoil, 0, 20, and 40%, of a dark red oxisol. Ninety two entries, 90 recombinant inbred lines and the two parental lines were evaluated in a 92x3x2 factorial experiment in a randomized complete block in each of three levels of Al saturation, with 92 entries, three replications and two years. A significant genotype by year by Al saturation level interaction was detected in the analyses of variance analysis (ANOVA). In 2007, the interaction of genotype by Al saturation level was significant as expected. The experiment was managed with irrigation to approximate the conditions of post flowering moisture stress normally encountered in the second crop at the end of the rainy season. In 2008, the experiment was planted earlier (January) and above average rainfall occurred in March and April eliminating the post flowering moisture stress. No interaction of genotype by Al saturation level was observed, most likely influenced by the lack of any post flowering moisture stress. Significant genetic variability was observed for all the traits for each level of Al saturation. The average level of productivity for the Al tolerant recombinant inbred lines for the *Alt<sub>SB</sub>* locus was  $900\text{kg}\ ha^{-1}$  superior than for the Al susceptible recombinant inbred lines in the 40% Al saturation environment in 2007, clearly demonstrating the effect of this allele on grain productivity. The level of productivity of the Al tolerant recombinant inbred lines was superior to the Al susceptible recombinant inbred lines at all three levels of Al saturation in both years. The correlation between net seminal root growth in nutrient solution with  $27\mu\text{M}$  Al and grain yield in the 40% Al saturation in 2007 of 0.44 was significant. It demonstrates that plant with larger liquid growth of root 5 days I in the level  $27\mu\text{M}$  tends to be more productive.

---

\*Guidance Committee: Dr. João Cândido de Souza (Major Professor), Dr. Robert Eugene Schaffert



## 1 INTRODUÇÃO

A área cultivada e a produção brasileira de sorgo granífero cresceram substancialmente nos últimos 30 anos (Coelho et al., 2002). Além de ser uma alternativa acessível para o abastecimento das indústrias de rações, o sorgo se adapta melhor do que a cultura do milho a regiões secas e áridas. Entretanto, não se considera o sorgo como concorrente do milho. Ele é visto, principalmente, como complementação para a fabricação de rações ou como substituição na época de pouca oferta do milho. A importância da cultura do sorgo é maior na região Centro-Oeste, sendo cultivado, principalmente, na safrinha, em sucessão à soja ou, mesmo, ao milho. Esta região se encontra, predominantemente, em áreas do cerrado, cujas características são solos ácidos.

Plantas não adaptadas, que crescem em solos contendo alumínio trocável em níveis tóxicos, têm o crescimento do sistema radicular prejudicado, ou paralisado, uma vez que as raízes se tornam curtas e grossas. As anomalias e os danos causados ao sistema radicular ocasionam exploração de menor volume de solo pelas plantas, resultando em prejuízos na absorção de nutrientes e no aproveitamento da água do solo (Malavolta et al., 1997). O sistema radicular concentrado na camada superficial do solo fica mais exposto a déficits hídricos, ocorrendo maior estresse da planta, pelo fato de esta sofrer maiores variações de temperatura. Ainda, quando as plantas atingem certo desenvolvimento, elas podem tombar devido à incidência de ventos fortes.

Baligar et al. (1990) observaram diferenças significativas entre genótipos de sorgo cultivados em diferentes concentrações de Al. Todavia, o parâmetro crescimento de plantas foi negativamente afetado pelo estresse ao Al. O desempenho das cultivares com relação ao Al em experimentos realizados em solução nutritiva foi semelhante ao observado em campo. Cambraia et al. (1991)

verificaram que as diferenças máximas entre duas cultivares de sorgo, quanto à tolerância ao alumínio, foram observadas com as concentrações de 0,65 mM de Ca, 0,60 mM de Mg, 0,14 mM de P, 0,04 mM de Fe-EDTA, pH 3,8 e 2 ppm de Al. De acordo com estes autores, o crescimento da raiz seminal foi o melhor parâmetro para discriminar a tolerância ao alumínio, devido à facilidade de avaliação e à possibilidade de recuperar o material, efetuando transplântio no solo para trabalhos futuros.

Em função da acelerada expansão das fronteiras agrícolas brasileiras e da utilização do sorgo na safrinha em sucessão à soja e o uso cada vez maior de solos do cerrado, a seleção de genótipos de sorgo com tolerância ao alumínio apresenta-se como alternativa para melhor exploração destas áreas. De acordo com Zeigler et al. (1995), não há dados que indiquem correlação negativa entre a tolerância a solos ácidos e o desempenho produtivo sob condições de solos férteis.

Estudos realizados por Magalhães et al. (2007), na cultura do sorgo, identificaram o gene *Alts<sub>SB</sub>*, que condiciona tolerância ao Al. Este gene é um transportador de ácido orgânico. No caso específico de sorgo, o ácido orgânico transportado é o citrato. O gene é pertencente à família *Multidrug And Toxic Compound Extrusion (MATE)*, tem sua maior expressividade no ápice das raízes do sorgo, onde há uma maior concentração de ácidos orgânicos, e atua formando uma espécie de barreira que impede que o alumínio tóxico se associe à planta. Deste ponto, conseqüentemente, se origina a tolerância.

O presente trabalho foi realizado com o objetivo de validar o efeito do gene *Alts<sub>SB</sub>* na produtividade de linhagens recombinantes endogâmicas de sorgo cultivadas em três níveis de saturação de alumínio (0%, 20% e 40%), na camada 0-20 cm, num Latossolo Vermelho Escuro e realizar uma correlação entre características das linhagens recombinantes endogâmicas avaliadas no experimento de campo e em solução nutritiva.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Local

Os ensaios para validação do efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>* que controla a tolerância ao Al em linhagens recombinantes endogâmicas foram realizados no sítio de fenotipagem para a tolerância ao Al da Embrapa Milho e Sorgo, localizada no município de Sete Lagoas, MG, à altitude de 766,73 metros, nas coordenadas: latitude 19°27'57" e longitude 44°14'49", nas safras de 2007 e 2008.

### 2.2 Material Genético

Um conjunto de linhagens recombinantes endogâmicas foi desenvolvido pela Embrapa Milho e Sorgo, com a finalidade de validar o efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>* que controla tolerância ao Al. A partir do cruzamento das linhagens BR007B e SC283, as quais são contrastantes quanto à tolerância ao Al, sendo a primeira susceptível ao Al e a segunda tolerante ao Al, obtiveram-se F<sub>1</sub> e F<sub>2</sub>. Nesta geração, selecionaram-se 500 progênies, que foram conduzidas pelo método SSD até a geração F<sub>2:8</sub> (S<sub>7</sub>). Destas, 90 progênies de porte entre 90 e 160 cm foram selecionadas e utilizadas neste trabalho.

**TABELA 1.** Características das linhagens de sorgo BR007B (susceptível) e SC283 (tolerante) ao Al, utilizadas no estudo da validação do gene *Alt<sub>SB</sub>*. “Grupos” correspondem às raças morfológicas (“working groups” segundo Murty et al., 1967).

Linhagens	Outro Nome	Identificador IS <sup>b</sup>	Pedigree <sup>c</sup>	Grupos	Sítios de coleta
BR007B	CMSXS101B	-	PU932242	-	USA
SC283	CMSXS136	IS7173C	IS7173CRC4-dwarf Martin B	Conspicuum	Tanzânia

<sup>b</sup> IS corresponde à denominação do ICRISAT

<sup>c</sup> Caniato et al., 2007.

### 2.3 Delineamento experimental e condução dos experimentos

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, em um esquema fatorial triplo 92x3x2, sendo 90 linhagens e 2 parentais cultivados em 3 níveis de saturação de Al (0%, 20% e 40%), por 2 anos. As parcelas experimentais foram constituídas por 2 linhas de 5 m, com espaçamento entre plantas de 0,15 m e entre linhas de 0,45 m.

O preparo do solo foi realizado de forma convencional, com uma aração e duas gradagens, para ambas as safras (2007 e 2008). A adubação de plantio foi realizada de acordo com análise de solo, nas proporções de 300 kg de 8-28-16, para a safra 2007 e 200 kg de 8-28-16. A semeadura foi realizada utilizando-se a plantadeira manual. Na safra de 2007, os ensaios foram implantados em 12 de abril, tendo o ensaio do nível 0% de saturação de Al sido implantado, aproximadamente, 15 dias após o plantio dos ensaios nos níveis 20% e 40% e na safra 2008, em 21 de janeiro.

O desbaste foi realizado manualmente 30 dias após a emergência das plantas. O controle de plantas daninhas foi realizado por meio de capina manual com enxada e aplicação do herbicida Atrazina, deixando as parcelas totalmente livres de plantas daninhas. A adubação de cobertura foi realizada em seguida ao desbaste, utilizando-se somente uréia.

A colheita foi realizada manualmente, à medida que as linhagens atingiram o ponto de colheita, aproximadamente 130 dias após a emergência.

## **2.4 Características avaliadas**

### **a) Florescimento**

Número de dias decorridos do plantio até o florescimento de 50% da plantas da parcela.

### **b) Altura de plantas**

Média da altura de plantas competitivas de cada parcela, medidas (cm), do nível do solo até a ponta da panícula.

### **c) Produtividade**

A produtividade foi obtida por meio do peso de grãos da parcela experimental corrigido para área de um hectare. A produtividade foi apresentada em t ha<sup>-1</sup>. Ainda com esta característica, foi realizada uma correlação fenotípica com as características avaliadas em solução nutritiva com e sem estresse de Al apresentadas no capítulo 2.

## **2.5 Análises estatísticas e genéticas**

Todas as análises genético-estatísticas foram realizadas com o auxílio do programa computacional GENES (Cruz, 2001). Efetuou-se uma análise de variância para cada safra 2007 e 2008, de acordo com o modelo estatístico:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + A_j + GA_{ij} + B/A_{jk} + e_{ijk};$$

em que:

$Y_{ijk}$ : valor observado para a característica obtida no k-ésimo bloco, avaliada dentro do j-ésimo nível de Al para i-ésima linhagem;

$\mu$ : média geral;

$G_i$ : efeito da i-ésima linhagem, sendo  $i= 1, 2, \dots, 92$ , considerado fixo;  
 $A_j$ : efeito do j-ésimo nível de AI, sendo  $j= 1, 2, 3$ , considerado fixo;  
 $GA_{ij}$ : efeito da interação entre a i-ésima linhagem e o j-ésimo nível de saturação de AI, considerado fixo;  
 $B/A_{jk}$ : efeito do k-ésimo bloco dentro do j-ésimo nível de AI, considerado aleatório;  
 $e_{ijkm}$ : efeito do erro experimental associado à observação de ordem  $ijk$  considerado aleatório.

Na Tabela 2 é apresentado o esquema da análise de variância, com as respectivas esperanças de quadrados médios e teste F.

Em seguida, verificou-se se os quadrados médios dos erros obtidos em cada safra eram homogêneos, por meio do teste F de Hartley (Snedecor & Cochran, 1978).

**TABELA 2.** Esquema da análise de variância com as respectivas fontes de variação (FV), graus de liberdade (GL), quadrados médios (QM), esperanças de quadrados médios [E(QM)] e estatística F.

FV	GL	QM	E (QM) <sup>1/</sup>	F
<b>Blocos/Nível</b>	$a(b - 1)$	QMB	$\sigma^2 + g\sigma_B^2$	
<b>Nível (A)</b>	$a - 1$	QMA	$\sigma^2 + g\sigma_B^2 + gr\Phi_a$	$QMA/QMB$
<b>RILs (G)</b>	$g - 1$	QMG	$\sigma^2 + ar\Phi_g$	$QMG/QMR$
<b>GxA</b>	$(g - 1)(a - 1)$	QMGA	$\sigma^2 + r\Phi_{ga}$	$QMGA/QMR$
<b>Resíduo</b>	$a(g - 1)(b - 1)$	QMR	$\sigma^2$	
<b>Total</b>	$bga - 1$			

<sup>1/</sup> a = número de níveis de AI; b = número de blocos; g = número de linhagens

Em seguida, verificou-se se os quadrados médios dos erros obtidos em cada safra eram homogêneos, por meio do teste F de Hartley (Snedecor & Cochran, 1978). Como os erros foram homogêneos, pôde-se realizar a análise conjunta, sendo uma análise em um esquema fatorial triplo, envolvendo os três níveis de saturação de Al (0%, 20% e 40%), em ambas as safras, 2007 e 2008, utilizando-se o seguinte modelo estatístico:

$$Y_{ijk} = \mu + G_i + A_j + L_k + GA_{ij} + GL_{ik} + AL_{jk} + GAL_{ijk} + (B/L)A_{jkm} + e_{ijk}$$

Em que:

$Y_{ijk}$ : é a observação do i-ésimo tratamento no bloco j e na repetição k;

$\mu$ : é a da média geral;

$G_i$ : efeito da i-ésima linhagem sendo  $i = 1, 2, \dots, 92$  considerado fixo;

$A_j$ : efeito do j-ésimo ano sendo  $j = 1$  e  $2$  considerado aleatório;

$L_k$ : efeito do k-ésimo nível de Al, sendo  $k = 1, 2, 3$  considerado fixo;

$GA_{ij}$ : efeito da interação entre a i-ésima linhagem e o j-ésimo ano, considerado fixo;

$GL_{ik}$ : efeito da interação entre a i-ésima linhagem e o k-ésimo nível de Al considerado fixo;

$AL_{jk}$ : efeito da interação entre o j-ésimo ano e k-ésimo nível de Al considerado fixo;

$GAL_{ijk}$ : efeito da interação entre i-ésima linhagem, j-ésimo ano e o k-ésimo nível de Al considerado fixo;

$(B/L)A_{jkm}$ : efeito m-ésimo bloco dentro da k-ésimo nível de Al dentro do j-ésimo ano considerado fixo

$e_{ijk}$ : erro experimental.

Na Tabela 3 é apresentado o esquema da análise de variância conjunta, com as respectivas esperanças de quadrados médios e teste F.

**TABELA 3.** Esquema da análise de variância com as respectivas fontes de variação variação (FV), graus de liberdade (GL), quadrados médios (QM), esperanças de quadrados médios [E(QM)], e estatística F.

FV	GL	QM	E (QM) <sup>1/</sup>	F
(B/A)/L	(r-1)al	QMB	$\sigma^2 + g\sigma_B^2$	
Ano (A)	a-1	QMA	$\sigma^2 + g\sigma_A^2 + rgl\sigma_B^2$	QMA/QMB
Níveis de AI (L)	l-1	QML	$\sigma^2 + g\sigma_L^2 + rg\phi\sigma_{a1}^2 + rga\phi_l$	QML/QMAL
Linhagens (G)	g-1	QMG	$\sigma^2 + r\lambda\sigma_{ga}^2 + ral\phi_g$	QMG/QMGA
GxA	(g-1)(a-1)	QMGA	$\sigma^2 + r\lambda\sigma_{ga}^2$	QMGA/QMR
GxL	(g-1)(l-1)	QMGL	$\sigma^2 + r\lambda\sigma_{gal}^2 + ra\phi_{gl}$	QMGL/QMGAL
AxL	(a-1)(l-1)	QMAL	$\sigma^2 + g\sigma_L^2 + rg\phi\sigma_{a1}^2$	QMAL/QMB
GxAxL	(g-1)(a-1)(l-1)	QM GAL	$\sigma^2 + r\lambda\sigma_{gal}^2$	QM GAL/QMR
Resíduo	(r-1)(g-1)al	QMR	$\sigma^2$	
Total	ralg-1			
$\alpha = \Phi\lambda$		$\Phi = 1/(l-1)$	$\lambda = g/(g-1)$	

### 2.5.1 Parâmetros genéticos e correlação fenotípica

A partir dos quadrados médios foram estimadas as variâncias fenotípica ( $\sigma_f^2$ ) e ambiental ( $\sigma_e^2$ ), componente quadrático genotípico ( $\phi_g$ ), coeficiente de determinação genotípico ( $H^2$ ), índice de variação ( $I_V$ ).

#### a) Variância fenotípica

$$\sigma_f^2 = \frac{QMG}{ar}$$

#### b) Componente quadrático genotípico

$$\phi_g = \frac{QMG - QMR}{ar}$$

#### c) Variância ambiental

$$\sigma_e^2 = QMR$$

#### d) Coeficiente de determinação genotípico

$$H^2 = \frac{\phi_g}{QMG/ar}$$

#### e) Índice de Variação

$$I_V = \frac{CV_g}{CV_e}$$



Foram estimados, também, o coeficiente de correlação fenotípica ( $r_F$ ) das linhagens entre as duas características avaliadas, utilizando-se a seguinte expressão.

$$r_F = \frac{COV_{F(X,Y)}}{\sqrt{(\sigma_{F_X}^2 \cdot \sigma_{F_Y}^2)}}$$

Em que:

$COV_{F_{xy}}$  corresponde às covariâncias fenotípicas entre os caracteres X e ;

$\sigma_{F_X}^2$  corresponde à variância fenotípica do caráter X;

$\sigma_{F_Y}^2$  corresponde à variância fenotípica do caráter Y.

A significância dos coeficientes de correlação fenotípica foi avaliada pelo teste t, a 1 e 5% de probabilidade.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo da análise de variância conjunta, para ambas as safras, 2007 e 2008, com todas as características avaliadas, está apresentado na Tabela 4. Houve significância para a interação linhagens x anos x níveis de Al ( $P < 0,01$ ), para todas as características. Devido a esta interação, foi realizado o desdobramento de linhagens x níveis dentro de cada ano (2007 e 2008). Os dados estão apresentados nas Tabelas 5 e 6.

Por se tratar de desdobramento, o resíduo considerado foi da análise conjunta, mostrado na Tabela 4. Para a safra 2007 (Tabela 5) verificou-se interação linhagens x níveis de Al para todas as características avaliadas. No desdobramento desta interação e avaliando-se a resposta das linhagens dentro de cada nível de saturação de Al, podem-se observar as diferenças significativas ( $P < 0,01$ ) entre as linhagens, para todas as características.

**TABELA 4.** Resumo da análise de variância conjunta para as características de florescimento (dias), altura (cm) e produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ), nas safras 2007 e 2008, obtidas nos experimentos conduzidos no sítio de fenotipagem para tolerância ao Al da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

F.V.	G.L.	Quadrado Médio		
		Florescimento	Altura	Produtividade
(B/N)/A	12	23,74	169,4	3,68
Linhagens (G)	91	159,44**	4736,97**	8,86**
Anos (A)	1	27939,13**	40792,24**	547,118**
Nível (N)	2	2728,81 <sup>NS</sup>	52786,37 <sup>NS</sup>	12,24 <sup>NS</sup>
G x A	91	35,90**	230,986*	2,5**
G x N	182	8,52 <sup>NS</sup>	363,13**	0,99**
A x N	2	889,09**	5998,55 <sup>NS</sup>	74,5**
G x A x N	182	10,84**	242,54**	0,68**
Resíduo	1092	4,50	168,4	0,5
Média		68,8 dias	130,3 cm	2,6 $t\ ha^{-1}$
C.V. (%)		3,1	10,0	27,8

\*\*,\*Significativo a 1% e 5% de probabilidade, pelo teste de F, <sup>NS</sup>Não significativo ao nível de 1% e 5% de probabilidade, pelo teste de F e CV(%) coeficiente de variação.

**TABELA 5.** Resumo da análise de variância individual, da safra 2007, para as características de florescimento (dias), altura (cm) e produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ), obtidas no experimento conduzido no sítio de fenotipagem para tolerância ao Al da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

<b>1º Ano</b>				
<b>F.V.</b>	<b>Quadrado Médio</b>			
	<b>G.L.</b>	<b>Florescimento</b>	<b>Altura</b>	<b>Produtividade</b>
<b>Blocos/Nível</b>	6	18,39	1939,79	2,5
<b>Linhagens (G)</b>	91	158,53**	2562,06**	6,81**
<b>Nível (N)</b>	2	3366,29**	38472,51**	190,94**
<b>G x N</b>	182	13,74**	476,84**	1,36**
<b>G/N</b>	273	62,01**	1171,92**	3,18**
<b>G/Nível 0</b>	91	39,94**	1519,21**	4,034**
<b>G/Nível 20</b>	91	51,27**	1242,05**	3,51**
<b>G/Nível 40</b>	91	94,81**	754,49**	1,99**
<b>Resíduo*</b>	1092	4,50	168,4	0,5
<b>Média</b>		72,92 dias	130,35 cm	3,13 $t\ ha^{-1}$
<b>C.V. (%)</b>		3,29	11,31	27,3

\*Resíduo utilizado da análise conjunta, \*\*Significativo a 1% de probabilidade pelo teste de F e CV(%) coeficiente de variação obtido da análise individual.

Já para a safra 2008 (Tabela 6), apenas a característica florescimento demonstrou interação entre linhagens e níveis de saturação de Al, cujo desdobramento mostra variabilidade genética das linhagens para todos os níveis de saturação de Al. As características altura e produtividade, nas quais não foram verificadas interação linhagens x níveis de Al para esta safra, demonstraram diferença entre médias nos níveis de Al, bem como entre as linhagens.

Os resultados indicam existência de variabilidade genética em todos os níveis de saturação de Al, para todas as características avaliadas, bem como respostas diferenciadas entre os níveis de saturação de Al, o que já era esperado. Isso porque os níveis de Al no solo na camada arável 0-20 cm são diferentes, sendo que os níveis 20% e 40% causam inibição do crescimento radicular, afetando o desenvolvimento das plantas.

**TABELA 6.** Resumo da análise de variância individual da safra 2008, para as características de florescimento (dias), altura (cm) e produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ), obtidos no experimento conduzido no sítio de fenotipagem para tolerância ao Al da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

<b>2º Ano</b>				
<b>F.V.</b>	<b>Quadrado Médio</b>			
	<b>G.L.</b>	<b>Florescimento</b>	<b>Altura</b>	<b>Produtividade</b>
<b>Blocos/Nível</b>	6	29,08	1457,02	4,85
<b>Linhagens (G)</b>	91	36,80**	2405,89**	4,55**
<b>Nível (N)</b>	2	251,60**	20312,41**	4,81**
<b>G x N</b>	182	5,62**	128,83 <sup>NS</sup>	0,30 <sup>NS</sup>
<b>G/N</b>	273	16,01**	-	-
<b>G/Nível 0</b>	91	16,54**	-	-
<b>G/Nível 20</b>	91	20,85**	-	-
<b>G/Nível 40</b>	91	10,63**	-	-
<b>Resíduo*</b>	1092	4,50	168,4	0,5
<b>Média</b>		64,7 dias	125,3 cm	2,0 $t\ ha^{-1}$
<b>CV (%)</b>		2,7	8,0	26,5

\*Resíduo utilizado da análise conjunta, \*\*Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste de F e CV(%) coeficiente de variação obtido da análise individual.

Os dados sobre florescimento médio das linhagens tolerantes e susceptíveis estão apresentados na Tabela 7. Nos níveis de saturação de Al 0%, 20% e 40% nas safras de 2007 e 2008, nota-se que quanto maior o nível de saturação de Al maior é o número de dias para o florescimento em ambas as safras avaliadas. Isto pode estar relacionado com o efeito do Al no desenvolvimento das plantas, segundo Jones & Kochian (1995). Também se pode observar que o florescimento da safra 2007 foi tardio, comparado ao da safra de 2008. Uma possível causa disso é que o plantio da safra 2007 foi realizado em 12 de abril e na safra 2008, em 21 de janeiro, ou seja, aproximadamente três meses de diferença, o que fez o ciclo da cultura aumentar na safra de 2007, devido ao clima frio.

**TABELA 7.** Valores máximos, mínimos e médios de florescimento (dias) de linhagens tolerantes e susceptíveis, nos níveis de saturação de alumínio 0%, 20% e 40% nas safras de 2007 e 2008, obtidos no sítio de fenotipagem para tolerância ao Al da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Linhagens	Florescimento (dias)											
	1º ano safra 2007						2º ano safra 2008					
	Tolerantes			Susceptíveis			Tolerantes			Susceptíveis		
Níveis de Al (%)	0	20	40	0	20	40	0	20	40	0	20	40
Máximo	76	87	89	76	88	89	70	70	71	67	69	72
Mínimo	63	67	67	61	67	68	61	61	64	61	61	64
Médio	70	73	76	69	72	77	64	65	65	64	65	66

Só não ocorreu decréscimo no nível 20% de saturação de Al em relação ao nível 0%, na safra 2007. Isto pode ter ocorrido devido a um estresse hídrico causado por problemas no sistema de irrigação no estágio vegetativo inicial, tanto para as linhagens tolerantes, bem como as susceptíveis aos Al tóxico.

A Tabela 8 é apresentada os valores máximos, mínimos e médios de altura para linhagens tolerantes e susceptíveis ao Al, nos níveis 0%, 20% e 40% de saturação de Al, nas safras de 2007 e 2008. A média do nível 0% de saturação de Al, para as linhagens tolerantes ao Al na safra de 2007, foi 139 cm, com valores oscilando entre 188 e 92 cm.

Esses valores foram semelhantes neste mesmo nível, para a safra de 2008, mostrando, assim, que as linhagens tolerantes tiveram comportamento semelhante nas duas safras, no nível 0% de saturação de Al. Já para o nível 20% de saturação de Al, o mesmo não ocorreu. A diferença no valor médio de altura para as linhagens tolerantes ao Al entre as duas safras foi de 26 cm. Para o nível 40% de saturação de Al ocorreu uma pequena diferença de 9 cm. De acordo com esses resultados, pode-se observar que as linhagens não obtiveram comportamento tão similar quanto o ocorrido no nível 0% de saturação de Al.

**TABELA 8.** Valores máximos, mínimos e médios de altura (cm) de linhagens tolerantes e susceptíveis ao Al, nos níveis de saturação de alumínio 0%, 20% e 40% nas safras de 2007 e 2008, obtidos no sítio de fenotipagem para tolerância ao Al da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Linhagens		Altura (cm)										
		1º ano safra 2007						2º ano safra 2008				
		Tolerantes			Susceptíveis			Tolerantes			Susceptíveis	
Níveis de Al (%)	0	20	40	0	20	40	0	20	40	0	20	40
<b>Máximo</b>	188	201	128	192	188	158	188	185	178	182	168	140
<b>Mínimo</b>	92	103	95	103	105	67	93	95	92	110	100	93
<b>Médio</b>	139	146	126	139	145	117	133	120	117	132	126	115

Observando-se os valores médios de acordo com o aumento do nível de saturação de Al, pode-se notar que os valores médios vão decrescendo de acordo com o aumento do nível de saturação de Al. Segundo Kochian (1995), a toxicidade do Al causa restrição no crescimento radicular das plantas, inibindo o crescimento delas plantas, além de afetar a absorção de outros nutrientes.

Para as duas safras, as linhagens susceptíveis obtiveram valores médios semelhantes, ou seja, obtiveram porte similar, nos três níveis de Al avaliados. A produção média de linhagens tolerantes e susceptíveis ao Al nos níveis 0%, 20% e 40% de saturação de Al, nas safras de 2007 e 2008, está apresentada na Tabela 9.

**TABELA 9.** Valores máximos, mínimos e médios de produtividade ( $t\ ha^{-1}$ ) de linhagens tolerantes e susceptíveis ao Al nos níveis de saturação de alumínio 0%, 20% e 40% nas safras de 2007 e 2008, obtidos no sítio de fenotipagem para tolerância ao Al da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Produtividade $t\ ha^{-1}$												
Linhagens	1º ano safra 2007						2º ano safra 2008					
	Tolerantes			Susceptíveis			Tolerantes			Susceptíveis		
Níveis (%)	0	20	40	0	20	40	0	20	40	0	20	40
<b>Máximo</b>	6,2	6,7	4,0	5,4	6,5	3,1	4,0	3,2	3,5	4,0	3,7	3,8
<b>Mínimo</b>	0,8	1,7	1,0	1,3	1,1	0,9	0,4	0,5	0,5	0,5	0,3	0,4
<b>Médio</b>	3,2	4,0	2,7	2,9	3,7	1,8	2,2	2,1	1,9	2,0	2,0	1,8

No nível 0% de saturação de Al, as linhagens tolerantes, ou seja, que possuem o gene *Alt<sub>SB</sub>*, obtiveram uma produção média de  $3,2\ t\ ha^{-1}$ , na safra de 2007, com oscilações entre 6,2 e  $0,8\ t\ ha^{-1}$ . Já para a safra de 2008, a produtividade foi de  $2,2\ t\ ha^{-1}$ , no nível 0% com valores entre 4,0 e  $0,4\ t\ ha^{-1}$ . A diferença de produtividade entre as linhagens tolerantes, no nível 0% de saturação de Al, é comum, pois, como as mesmas foram obtidas do cruzamento de BR007B (susceptível) x SC283 (tolerante), linhagens contrastantes para a tolerância ao Al. Sugere-se que elas tenham variabilidade no nível 0% de saturação de Al, que tenham valores de produtividade diferentes, devido às diferenças no crescimento do sistema radicular das plantas. Isso porque BR007B tem crescimento de raiz muito mais rápido em relação a SC283, que cresce mais lentamente.

No nível 20% de saturação de Al, os valores médios foram  $4,0\ t\ ha^{-1}$  para 2007 e  $2,1\ t\ ha^{-1}$  para 2008. Esses valores foram similares aos obtidos no nível 0% de saturação de Al. O que pode estar relacionado à presença do gene *Alt<sub>SB</sub>* nas linhagens tolerantes e fazendo com que não ocorresse quedas bruscas na produtividade, mesmo com a presença de Al tóxico no solo cultivado. Quando se compara este nível 20% com 0% de saturação de Al, na safra de 2007, pode-

se observar que a média de produtividade do nível 20% é maior do que a média de 0% de saturação de Al. Isto parece ter sido causado por um estresse hídrico ocorrido em uma fase de crescimento vegetativo inicial, devido ao atraso do plantio, no nível 0% de saturação de alumínio.

O valor de produtividade média de linhagens tolerantes ao Al no nível 40% foi 2,7 t ha<sup>-1</sup> com valores oscilando entre 1,0 e 4,0 t ha<sup>-1</sup>, na safra de 2007 e um valor médio de 1,9 t ha<sup>-1</sup>, na safra de 2008, com oscilações de 0,5 a 3,5 t ha<sup>-1</sup>.

Comparando-se a produtividade de linhagens tolerantes com susceptíveis, é possível observar que, em todos os níveis de saturação de Al, as linhagens tolerantes obtiveram valores médios de produtividade superiores às linhagens susceptíveis; para os níveis 0% e 20%, a vantagem foi de 300 kg ha<sup>-1</sup>, na safra de 2007. Já para a safra de 2008, a vantagem foi, apenas, de 200 kg ha<sup>-1</sup>, no nível 0% de Al, e 100 kg ha<sup>-1</sup>, nos níveis 20% e 40% de saturação de Al. Vale ressaltar que, em 2008, o volume de chuva foi muito maior nos meses de março e abril, acima do normal e fugindo das condições climáticas que ocorrem no período de safreinha.

A maior diferença de produtividade entre linhagens tolerantes e susceptíveis foi no nível 40% de saturação de Al, na safra 2007 em que as linhagens tolerantes produziram 900 kg ha<sup>-1</sup> a mais em relação às susceptíveis. Estes resultados podem confirmar o vantajoso efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>* na produtividade de sorgo.

Na Tabela 10 são apresentadas as estimativas de alguns parâmetros genéticos importantes na inferência sobre possíveis estratégias de seleção.



**TABELA 10.** Estimativas de variância fenotípica ( $\hat{\sigma}_f^2$ ), componente quadrático genotípico ( $\hat{\sigma}_g^2$ ), variância ambiental ( $\hat{\sigma}_e^2$ ), coeficiente de determinação genotípico ( $H^2$ ), coeficiente de variação genético ( $CV_g$ ) e índice de variação ( $I_v$ ) das características avaliadas florescimento, altura e produtividade, obtidas nas safras 2007 e 2008, no sítio de fenotipagem da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

	Safr 2007			Safr 2008		
	Florescimento	Altura	Produtividade	Florescimento	Altura	Produtividade
$\hat{\sigma}_f^2$	17,61	284,67	0,75	4,08	267,32	0,50
$\hat{\sigma}_g^2$	16,97	258,65	0,67	3,73	255,93	0,47
$\hat{\sigma}_e^2$	5,788	234,20	0,73	3,21	102,51	0,27
$H^2$ *	96,34	90,85	89,22	91,26	95,73	93,88
$CV_g$ *	5,64	11,88	26,18	2,98	12,75	34,66
$I_v$	1,71	1,05	0,95	1,07	1,58	1,30

\*Dados obtidos em porcentagem.

Observa-se que o componente quadrático genotípico ( $\hat{\sigma}_g^2$ ) superou a variância ambiental ( $\hat{\sigma}_e^2$ ), demonstrando, assim, ser o principal componente da variância fenotípica ( $\hat{\sigma}_f^2$ ), para todas as características avaliadas com exceção da característica produtividade na safra 2007, onde a variância ambiental ( $\hat{\sigma}_e^2$ ) foi superior a componente quadrático genotípico ( $\hat{\sigma}_g^2$ ). Ainda para tais características, os valores de  $H^2$  foram superiores a 89% e os índices de variações superiores à unidade, com exceção de produtividade na safra 2007, indicando a possibilidade de ganhos genéticos utilizando-se métodos simples de seleção.

Correlações entre caracteres são de grande importância nos trabalhos de melhoramento, principalmente se a seleção em um deles apresenta dificuldades, em razão da baixa herdabilidade, e, ou, tenha problemas de medição e identificação (Cruz & Regazzi, 2004). As correlações entre as características mensuradas no experimento realizado em solução nutritiva (dados apresentados no capítulo 2) e aquelas mensuradas no experimento de campo (discutidas no presente capítulo) são apresentadas na Tabela 11.

**TABELA 11.** Estimativas do coeficiente de correlação fenotípica ( $r_f$ ) entre níveis de saturação de Al (%), crescimento líquido de raiz (CLR) 5 dias com e sem Al, crescimento relativo raiz seminal (CRRS), e crescimento relativo raiz seminal (CRRS) relativo a zero e produtividade nos níveis de saturação de Al 0%, 20% e 40% nas safras 2007 e 2008, obtidas na câmara de crescimento e no sítio de fenotipagem para tolerância ao Al da Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Níveis de Saturação de Al (%)	Produtividade t ha <sup>-1</sup>					
	Safr 2007			Safr 2008		
	0	20	40	0	20	40
CLR 5 Dias sem Al	0,366**	0,308**	0,093 <sup>NS</sup>	0,06 <sup>NS</sup>	0,079 <sup>NS</sup>	-0,031 <sup>NS</sup>
CRRS	0,396**	0,345**	0,149 <sup>NS</sup>	0,035 <sup>NS</sup>	0,074 <sup>NS</sup>	-0,091 <sup>NS</sup>
CLR 5 Dias com Al	-0,155 <sup>NS</sup>	-0,032 <sup>NS</sup>	0,440**	-0,685 <sup>NS</sup>	-0,054 <sup>NS</sup>	0,118 <sup>NS</sup>
CRRS	-0,228*	-0,081 <sup>NS</sup>	0,390**	-0,048 <sup>NS</sup>	-0,044 <sup>NS</sup>	0,106 <sup>NS</sup>
CRRS Relativo à Zero	-0,403**	-0,259*	0,172 <sup>NS</sup>	0,073 <sup>NS</sup>	-0,092 <sup>NS</sup>	0,101 <sup>NS</sup>

\*\* ,\*: Significativo a 1% e 5% de probabilidade, pelo teste t.

No ano 2008 pode-se observar que não houve a ocorrência de nenhuma correlação significativa entre as características avaliadas. Isso pode ter ocorrido devido a um maior volume de chuva, nos meses de março e abril fugindo das condições climáticas que ocorrem na safrinha. Porém, na safra 2007, foi obtida correlação significativa para algumas características. A discrepância dos resultados pode ter ocorrido devido a problemas experimentais em 2008, quando ocorreram sintomas em todas as parcelas de deficiência de nitrogênio e as chuvas ocorreram com maior intensidade, comparado ao ano 2007, não estabelecendo, assim, condições climáticas de safrinha como o ano 2007 estabeleceu.

Um resultado que consta da Tabela 11 e que chama a atenção é a correlação significativa entre as características crescimento líquido de raiz (CLR) 5 dias com Al no nível 27 $\mu$ M e produtividade de grãos no nível 40% de saturação de Al na safra 2007, cuja magnitude foi de 0,44. Isso demonstra que plântulas com maiores crescimentos líquidos (CLR) 5 dias no nível 27 $\mu$ M de Al tendem a ser mais produtivas. Ainda sugere-se a realização de novos

experimentos, no intuito de tentar validar a utilização da característica crescimento líquido de raiz (CLR) 5 dias com Al no nível  $27\mu\text{M}$  para ser utilizada em seleção indireta, visando aumento de produtividade, pois tal característica demonstrou elevado valor de  $H^2$ . A seleção indireta deve ser realizada apenas quando o número de materiais a serem avaliados no campo for muito grande, não havendo área adequada disponível e ainda uma desuniformidade de materiais etc.

Ainda na Tabela 11, foram obtidas correlações significativas entre crescimento líquido de raiz (CLR) 5 dias em solução nutritiva completa, ou seja, sem o estresse de Al e crescimento relativo de raiz seminal (CRRS) com produtividade de grãos nos níveis 0% e 20% saturação de Al avaliados em campo. Isso mostra forte indicação que essas características podem ser utilizadas em programas de melhoramento, explicando 10% a 15% de produtividade de grãos sem estresse de Al.

## 4 CONCLUSÃO

A validação no efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>* foi obtida no ano 2007, pois, de acordo com as médias de produtividade de linhagens tolerantes apresentadas, as mesmas foram superiores às linhagens susceptíveis. Ainda, foram obtidas correlações significativas entre linhagens cultivadas no campo em três níveis de saturação de Al e linhagens cultivadas em solução nutritiva com e sem estresse de Al, confirmando, assim, o efeito do gene *Alt<sub>SB</sub>*.

O ano 2008 foi um ano atípico, não representando as condições usuais de safrinha.

De acordo com os resultados apresentados, sugere-se que sejam realizados, posteriormente, novos experimentos, para que a validação possa ser realizada com sucesso.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALIGAR, V. C.; ANGHINONI, I.; PITTA, G. V. E.; SANTOS, H. L.; CUNHA FILHO, E.; SCHAFFERT, R. E. Efeito de diferentes níveis de alumínio na solução nutritiva sobre a composição da fração nitrogenada em sorgo. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 2, n. 2, p. 47-52, 1990.
- CAMBRAIA, J.; SILVA, M. A. da; CANO, M. A. O.; SANT'ANNA, R. Método simples para avaliação de cultivares de sorgo quanto a tolerância a alumínio. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 3, n. 2, p. 87-95, 1991.
- CANIATO, F. F.; GUIMARÃES, C. T.; SCHAFFERT, R. E.; ALVES, V. M. C.; KOCHIAN, L. V.; BORÉM, A.; KLEIN, P. E.; MAGALHÃES, J. V. Genetic diversity for aluminum tolerance in sorghum. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 114, p. 863-876, 2007.
- COELHO, A. M.; WAQUIL, J. M.; KARAM, D.; CASELA, C. R.; RIBAS, P. M. Seja o doutor do seu sorgo. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 100, p. 1-4, dez. 2002. (Arquivo do agrônomo, 14).
- CRUZ, C. D. **Programa Genes**: versão Windows. Viçosa, MG: UFV, 2001. 642 p.
- CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J.; CARNEIRO, P. C. S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2004. 480 p.
- JONES, D. L.; KOCHIAN, L. V. Aluminum inhibition of the inositol 1,4,5-triphosphate signal transduction pathway in wheat roots: a role of aluminum toxicity. **Plant Cell**, Rockville, v. 7, n. 11, p. 1913-1922, 1995.
- KOCHIAN, L. V. Cellular mechanisms of aluminium toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 46, p. 237-260, 1995.
- MAGALHÃES, J. V.; LIU, J.; GUIMARÃES, C. T.; LANA, U. G. P.; ALVES, V. M. C.; WANG, Y.; SCHAFFERT, R. E.; HOEKENGA, O. A.; PIÑEROS, M. A.; SCHAFF, J. E.; KLEIN, P. E.; CARNEIRO, N. P.; COELHO, C. M.;

TRICK, H. N.; KOCHIAN, L. V. A gene in the multidrug and toxic compound extrusion (MATE) family confers aluminum tolerance in sorghum. **Nature Genetics**, London, v. 39, p. 1156-1161, 2007.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MURTY, B. R.; ARUNACHALEN, V.; SAXENA, R. L. Classification and catalogue of a word collection of sorghum. **Indian Journal Genetics Plant Breeding**, New Delhi, v. 27, p. 1-74, 1967.

PAES, L. W.; TARDIN, F. D.; SILVA, L. A.; MAGALHÃES, J. V.; SCHAFFERT, R. E. Desenvolvimento radicular de plântulas de sorgo avaliadas em diferentes níveis de Alumínio. In: CONGRESSO NACIONAL DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 2007, São Lourenço, MG. **Resumos expandidos...** Lavras: SBMP/UFLA, 2007. 1 CD-ROM.

SILVA, L. A.; MAGALHÃES, J. V.; TARDIN, F. D.; SCHAFFERT, R. E. Avaliação de linhagens e híbridos de sorgo quanto a tolerância ao alumínio. In: CONGRESSO NACIONAL DE MELHORAMENTO DE PLANTAS, 2007, São Lourenço, MG. **Resumos expandidos...** Lavras: SBMP/UFLA, 2007.1 CD-ROM.

SNEDERCOR, G. W.; COCHRAN, W. **Statistical methods**. 6. ed. Ames: The Iowa State Colege, 1978. 485 p.

ZEIGLER, R. S.; PANDEY, S.; MILES, J.; GOURLEY, L. M.; SARKARUNG, S.; DATE, R. A.; GRUNDON, N. J.; RAYMENT, G. E.; PROBERT, M. E. Advances in the selection and breeding of acid-tolerant plants: rice, maize, sorghum and tropical forages. **Development in Plant and Soil Sciences**, v. 64, p. 391-406, 1995.