

Sete Lagoas, MG  
Dezembro, 2016

### Autores

**Jurandir Vieira Magalhães**

Eng.-Agrôn., PhD, Pesquisador em Genética Molecular e Genômica de Plantas, Embrapa Milho e Sorgo, Rod. MG 424 km 45, 35701-970 Sete Lagoas, MG, jurandir.magalhaes@embrapa.br

**Geraldo Afonso de Carvalho Júnior**

Ph.D student in Plant Breeding at Texas A&M University -TAMU/College Station, TX, gacjunior@tamu.edu

**Robert Eugene Schaffert**

Eng.-Agrôn., PhD, Genética e Melhoramento de Plantas, Embrapa Milho e Sorgo, Rod. MG 424 km 45, 35701-970 Sete Lagoas, MG, robert.schaffert@embrapa.br

**Elena Charlotte Landau**

Bióloga, D.Sc. em Zoneamento Ecológico-Econômico, Agroclimatologia e Geoprocessamento, Pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Rod. MG 424 km 45, CP:151, CEP: 35701-970 Sete Lagoas, MG, charlotte.landau@embrapa.br

**Rubens Augusto de Miranda**

Economista, D.Sc. Embrapa Milho e Sorgo, Rodovia MG 424 km 45, C. Postal 151, CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG, rubens.miranda@embrapa.br

**João Herbert Moreira Viana**

Eng.-Agrôn., Doutor em Solos e Nutrição de Plantas, Pesquisador Embrapa Milho e Sorgo, Rod. MG 424 km 45, CP:151, CEP: 35701-970 Sete Lagoas, G, jherbert@cnpms.embrapa.br

**Cícero Beserra de Menezes**

Eng.-Agrôn., D.Sc. Genética e Melhoramento de Plantas, Pesquisador Embrapa Milho e Sorgo, Rod. MG 424 km 45, CP:151, CEP: 35701-970, Sete Lagoas, MG, cicero.menezes@embrapa.br

**Lidiane Assis Silva**

D.S. Bolsista Embrapa Milho e Sorgo, Rod. MG 424 km 45, CP:151, CEP: 35701-970, Sete Lagoas- MG

**Claudia Teixeira Guimarães**

Eng.-Agrôn., D.Sc. em Melhoramento Genético Vegetal, Pesquisadora da Embrapa Milho e Sorgo, Rod. MG 424 km 45, CP:151, CEP: 35701-970 Sete Lagoas- MG, claudia.guimaraes@embrapa.br

**Antônio Marcos Coelho**

Eng.-Agrôn., Ph.D em Solos & Agricultura de Precisão, Pesquisador da Embrapa Milho e Sorgo, Rod. MG 424 km 45, CP:151, CEP: 35701-970 Sete Lagoas, MG, antoniomarcos.coelho@embrapa.br

# O Gene de Tolerância ao Alumínio, *SbMATE*, Aumenta a Produção de Grãos de Sorgo Cultivado em Solos Ácidos

## A Tolerância ao Al em Sorgo

Solos ácidos com valores de pH menores do que 5,0 ocupam mais de 50% das áreas potencialmente cultiváveis no mundo (VON UEXKÜLL; MUTERT, 1995). Em condições de pH baixo, o alumínio (Al), um constituinte natural da fração argila do solo, assume formas iônicas que são altamente fitotóxicas, danificando o sistema radicular e restringindo o desenvolvimento da planta. Assim, a toxidez de Al limita a capacidade das culturas de absorver água e nutrientes minerais, tornando-as mais susceptíveis ao estresse hídrico (KOCHIAN et al., 2015). Culturas sensíveis ao Al tóxico sofrem reduções acentuadas na produção de grãos e de biomassa em solos ácidos, comprometendo a eficiência dos sistemas agrícolas estabelecidos sob pH baixo. A calagem é uma prática comum para elevar o pH do solo. Porém, essa prática, além de representar um custo adicional significativo para a agricultura familiar, não é efetiva na situação mais comum em que o Al tóxico encontra-se em camadas mais profundas do solo, onde é necessário o adequado desenvolvimento do sistema radicular para manutenção da produção vegetal. Raízes intoxicadas por Al são incapazes de absorver eficientemente a água presente no subsolo, potencializando os efeitos do estresse de seca na redução da produção das culturas em solos ácidos.

Regiões extensas sob solos ácidos são encontradas em áreas tropicais e subtropicais como na América do Sul, África e Ásia (Figura 1), nas quais estão localizados países em desenvolvimento, onde a produção de alimentos é ainda um grande desafio para a segurança alimentar. Por exemplo, a atividade agrícola na África Subsaariana, uma das regiões mais pobres do planeta, é bastante limitada pela toxidez de Al (DOUMBIA et al., 1993, 1998). Dado o enorme potencial para melhoria do bem-estar humano via desenvolvimento de práticas agrícolas mais eficientes, a busca de cultivares mais tolerantes ao Al torna-se vital para a segurança alimentar mundial.

No Brasil, grande parte da produção agrícola está concentrada no bioma Cerrado, onde dezenas de milhões de hectares são utilizados de forma intensiva para produção agrícola, tanto na estação chuvosa quanto na segunda safra, em que estresses abióticos, como o estresse de seca, são comuns. Portanto, o desenvolvimento de práticas de manejo da fertilidade do solo e de mecanização agrícola e a exploração da variabilidade genética para a tolerância ao Al foram vitais para a grande relevância atual do setor agrícola brasileiro no cenário mundial da produção de alimentos.

Em sorgo, a tolerância ao Al é controlada pelo loco *Alt<sub>SB</sub>*, que foi mapeado no cromossomo 3 por Magalhães et al. (2004). Posteriormente, o gene *SbMATE*, que pertence à família de transportadores *Multidrug and Toxic Compound Extrusion*, foi clonado (MAGALHÃES et al., 2007). Esse estudo mostrou que a tolerância ao Al conferida pelo loco *Alt<sub>SB</sub>* ocorre mediante a atividade da proteína SbMATE na exsudação de citrato ativada por Al nos ápices radiculares. Na rizosfera, o citrato forma um complexo estável com os íons Al<sup>3+</sup>, reduzindo ou eliminando os efeitos fitotóxicos do metal.

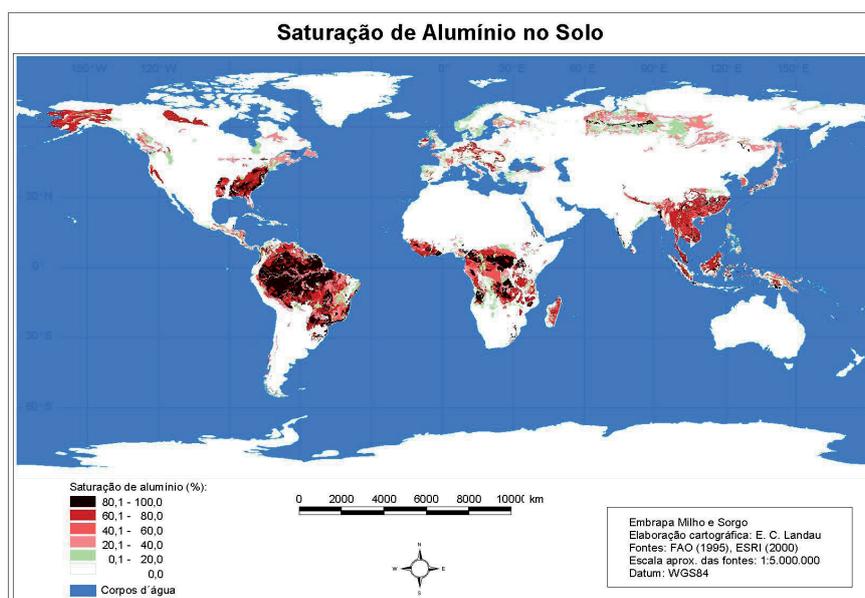
Os programas de melhoramento genético vegetal, ao longo de várias décadas, foram bem-sucedidos na identificação de fontes de tolerância ao Al nas culturas-chave para o agronegócio nacional. Entretanto, a base genética, fisiológica e molecular da tolerância ao Al em plantas permaneceu desconhecida por várias décadas. Com a clonagem do gene *SbMATE*, esses mecanismos foram elucidados no caso da tolerância ao Al em sorgo e contribuíram para o avanço na área da tolerância ao Al em outras espécies vegetais. O gene *SbMATE* foi isolado com base na inibição do crescimento radicular causada

pelo Al em solução nutritiva, que é a maneira tradicional de avaliação da tolerância ao Al em plantas. Plantas que mantêm o crescimento radicular na presença do Al são tolerantes ao metal. Esses estudos fisiológicos foram conduzidos em plantas cultivadas em solução nutritiva, em câmara de crescimento, com condições ambientais controladas. Assim sendo, tornou-se necessário validar o efeito do gene *SbMATE* na produção de grãos de sorgo em solos sob toxidez de Al, o que constitui o objetivo deste trabalho.

## Metodologia

### Desenvolvimento de Sítios de Fenotipagem para a Tolerância ao Alumínio

Dois sítios de fenotipagem para a tolerância ao Al foram utilizados para validação do gene *SbMATE* em condições de campo. Esses sítios localizam-se na estação experimental da Embrapa Milho e Sorgo em Sete Lagoas (MG): 19°27'57" de latitude sul e 44°14'49" de longitude oeste e 766.73 m de altitude. O solo dos sítios, um latossolo vermelho distrófico típico (PANOSO et al., 2002), foi caracterizado quanto à saturação de Al nas camadas



**Figura 1.** Distribuição global da saturação de alumínio no solo. Os dados foram gentilmente cedidos pelo Dr. Glenn Hyman (CIAT - Colômbia)

superficial (0-20 cm) e subsuperficial (20-40 cm), e calcário dolomítico contendo 33% de CaO e 10% de MgO foi aplicado na camada superficial para reduzir a saturação de Al no sítio controle. Dois meses após a calagem a área foi dividida em grids de 10 x 10 m e 5 x 5 m nos sítios controle e de Al, respectivamente, coletando-se então amostras compostas de solo para análise química. Os detalhes sobre a construção dos sítios de fenotipagem estão descritos em Carvalho Jr. et al. (2016).

### População de Linhagens Recombinantes e Híbridos Isogênicos

Uma população de linhagens recombinantes (*recombinant inbred lines*, RILs) com 90 F<sub>7:8</sub> RILs derivadas do cruzamento entre BR007 (sensível ao Al) e SC283 (tolerante ao Al, pertencente à raça guinea (MAGALHÃES et al., 2004), foi utilizada para validação do gene *SbMATE* em condições de campo. Somente tipos 3-anão foram utilizados para evitar efeitos de confundimento de fenologia na produção de grãos.

O efeito do gene *SbMATE* na produção de grãos foi avaliado em híbridos isogênicos homocigotos sensíveis (tt), heterocigotos ou homocigotos tolerantes (TT) para o loco *Alt<sub>SB</sub>*, onde reside o gene *SbMATE*. Esses estoques permitem a comparação do efeito do gene *SbMATE* em um contexto isogênico para o resto do genoma, evitando efeitos de confundimento. Para confecção dos híbridos isogênicos, as linhagens isogênicas sensível e tolerante à toxidez de Al sob o controle do loco *Alt<sub>SB</sub>* foram cruzadas com a linhagem sensível ao Al, BR012, ou com BR012 contendo introgressão de diferentes alelos de tolerância do loco *Alt<sub>SB</sub>* das fontes SC566 (BR012(SC566)), SC549 (BR012(SC549)) e CMSXS225 (BR012(CMS225)), como descrito na Tabela 1.

**Tabela 1.** Constituição genética dos híbridos isogênicos, H1 a H8, juntamente aos respectivos parentais. O genótipo do loco *Alt<sub>SB</sub>*, homocigoto tolerante (TT), heterocigoto (Tt) ou homocigoto sensível (tt) está mostrado entre parênteses.

		Linhagens macho (R)			
		BR012 (tt)	BR012(566) (TT)	BR012(SC549) (TT)	BR012(CMS225) (TT)
Linhagens fêmeas (A)	ATF13A(tt)	H1(tt)	H3(Tt)	H5(Tt)	H7(Tt)
	ATF14A(TT)	H2(Tt)	H4(TT)	H6(TT)	H8(TT)

### Construção do Mapa Genético

O mapa genético desenvolvido e descrito por Sabadin et al. (2012) foi utilizado neste estudo. Um total de 344 marcadores incluindo 255 marcadores DArT (Diversity Arrays Technology) foi utilizado para a construção do mapa genético. O mapa contém ainda marcadores ligados ao loco *Alt<sub>SB</sub>*. Dentre esses, o marcador ISU52 foi genotipado como descrito em Magalhães et al. (2004), e os marcadores STS, CTG29 e M181 estão descritos em Caniato et al. (2007). Os STS fluorescentes DG1, EM1, M1672 e M9612 foram descritos em Sabadin et al. (2012).

### Avaliação da Tolerância ao Al em Solução Nutritiva

A tolerância ao Al foi avaliada em solução nutritiva seguindo-se os procedimentos descritos em Caniato et al. (2007, 2011), utilizando-se 27 µM Al<sup>3+</sup> de atividade livre de Al em solução nutritiva com pH 4,0. O Crescimento Líquido Relativo (CLR) foi calculado pela razão entre o crescimento radicular líquido obtido em solução nutritiva sob estresse de Al e o crescimento líquido na ausência de Al, considerando-se um período de 5 dias. Os valores foram expressos como porcentagem, considerando-se o crescimento radicular do tratamento controle.

## Produção de Grãos em Condições Controle e sob Toxidez de Al

O experimento de campo foi conduzido de abril a setembro de 2007 para a população de RILs no sítio controle (2% de saturação de Al) e Al (com 56% de saturação de Al). Para a população de RILs, cada parcela consistiu de duas linhas de 5 m com 0,45 m entre linhas e oito plantas por metro. Para os híbridos isogênicos, cada parcela consistiu de quatro linhas de 5 m com 0,45 m entre linhas, sendo que somente as duas linhas centrais foram colhidas. A fertilização da área foi feita pela aplicação de 300 Kg/ha de 8-28-16 (NPK) no plantio e 160 Kg/ha de ureia após 30 dias. O desenho experimental foi o de blocos incompletos com três repetições. O desenho experimental para os híbridos foi o de parcelas subdivididas com o tratamento de Al (controle e Al) nas parcelas e os híbridos alocados nas subparcelas, com 4 repetições. A colheita foi feita manualmente e a produção de grãos por hectare foi estimada.

### Análises Estatísticas

As análises estatísticas foram feitas utilizando o software GenStat 17 (VSN International 2015). Os experimentos em hidroponia foram analisados como blocos ao acaso e os valores percentuais de crescimento

radicular relativo foram transformados para  $\log_{10}$ . O experimento de campo foi analisado segundo o delineamento de blocos incompletos em um contexto de múltiplos ambientes (considerando ambiente como o tratamento de Al): variável resposta = tratamento + repetição dentro de tratamento + bloco incompleto dentro de repetições + genótipo + erro. Detalhes do modelo utilizado e das análises estatísticas estão descritos em Carvalho Jr. et al. (2016).

### Análises de QTL

As análises de QTL foram feitas em um contexto de múltiplas características como descrito em Boer et al. (2007), Malosetti et al. (2008, 2013) e Alimi et al. (2013).

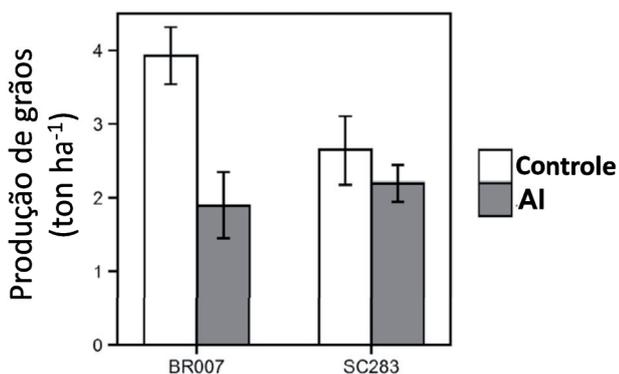
## Resultados

A Tabela 2 mostra a saturação de Al nos sítios controle e com alta saturação de Al. A saturação de Al foi baixa, em torno de 2% na camada superficial (0-20 cm) no sítio controle e alta no sítio Al, atingindo 56% em média. O mesmo contraste foi observado no subsolo, com saturação de Al de aproximadamente 15% e 65% nos sítios controle e Al, respectivamente.

**Tabela 2.** Estatísticas descritivas para a saturação de Al (%) na camada superficial (0-20 cm) e subsuperficial (20-40 cm) nos sítios controle e Al. Fonte: Carvalho Jr. et al. (2016).

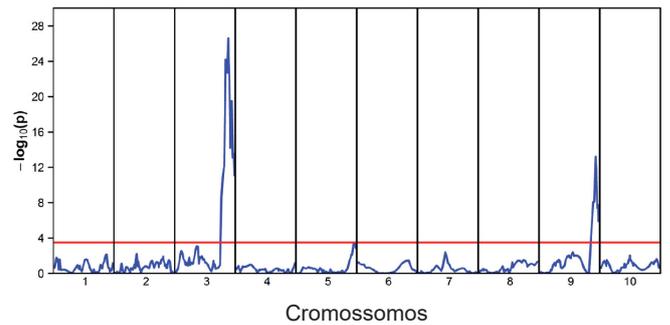
Saturação de Al (%)	Profundidade (cm)	Controle	Al
Média	0 - 20	2.1	55.9
	20 - 40	15.2	64.6
Mediana	0 - 20	0.4	60.3
	20 - 40	9.4	67.2
Desvio padrão	0 - 20	5.0	18.4
	20 - 40	15.8	16.1

A produção de grãos do parental sensível ao Al, BR007, foi de 3,9 ton./ha, revelando um potencial produtivo muito superior ao do parental tolerante, SC283 (Figura 2). Entretanto, a redução na produção de grãos causada pela toxidez de Al em BR007 foi de aproximadamente 50%, enquanto que o parental SC283 foi capaz de manter a produção de grãos em condições de estresse. Esses resultados indicam que 56% de saturação de Al, que está bem acima do nível crítico a partir do qual o Al reduz a produção de grãos de sorgo (20%, GOURLEY, 1987), inibe dramaticamente o potencial produtivo de linhagens elite sensíveis ao Al, como é o caso da linhagem BR007.



**Figura 2.** Médias de produção de grãos (ton. ha<sup>-1</sup>) em condições controle (2% de saturação de Al) e sob estresse de Al (56% de saturação de Al) no solo para as linhagens parentais BR007 (sensível ao Al) e SC283 (tolerante ao Al). A diferença mínima significativa (DMS) = 0,59 (alfa=0.05). As barras representam o erro padrão da média. Fonte: Carvalho Jr. et al. (2016).

A análise de QTL considerando tolerância ao Al avaliada em solução nutritiva e no campo revelou dois QTLs, um no cromossomo 3 e outro no cromossomo 9, cada um afetando ambas as características (Figura 3).



**Figura 3.** Perfil gráfico dos QTLs detectados pela análise de múltiplas características para crescimento líquido relativo (CLR) após 5 dias em solução nutritiva pH 4,0 com 27  $\mu\text{M}$   $\text{Al}^{3+}$  e produção de grãos em solo com 56% de saturação de Al. A probabilidade de associação foi obtida pela estatística de Wald e foi expressa como  $-\log_{10}(p)$ . A linha vermelha indica o limiar de significância obtido com a correção para múltiplos testes de Li e Ji (2005), com  $\alpha = 0.05$ . Fonte: Carvalho Jr. et al. (2016).

O QTL no cromossomo 3 foi detectado na posição 184,2 cM e está fortemente ligado aos marcadores STS, CTG29 e M181 na posição 180 cM (Figura 4). Esse QTL associado com tolerância ao Al em solução hidropônica, denominado *CLR3*, explicou metade da variância genética para CLR, sendo o alelo associado com um efeito positivo no fenótipo doado pelo parental tolerante, SC283 (Tabela 3).

**Tabela 3.** Estimativa dos efeitos de QTL com análise simultânea de múltiplas características para crescimento líquido relativo (CLR) e produção de grãos (ton. ha<sup>-1</sup>). Os QTLs foram codificados como QTLs de produção de grãos (*Pg*) ou crescimento líquido relativo (*CLR*), seguindo-se o cromossomo onde estão localizados. O erro padrão da média (EPM), a porcentagem da variância genética (%VG) explicada por cada QTL e a variância total explicada estão mostrados. O alelo positivo é o que está associado com um aumento na expressão fenotípica. Sítio controle (2% de saturação de Al), sítio Al (55% de saturação de Al). Fonte: Carvalho Jr. et al. (2016).

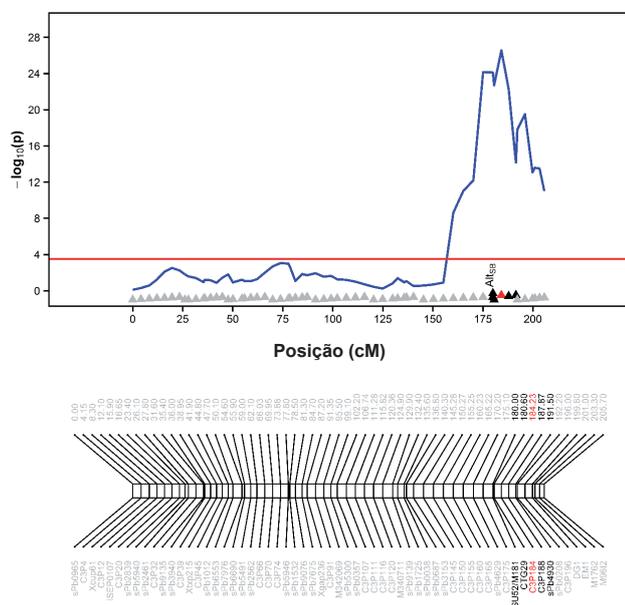
QTL	Posição do QTL (cM)	Marcadores mais próximos	Efeitos	Alelo positivo	VG (%)	EPM
Hidroponia						
<i>CLR3</i>	184.2	ctg29 – sPb4930	0.71	SC283	50.1	(0.08)
<i>CLR9</i>	214.0	sPb1826 sPb4087	– 0.34	SC283	11.3	(0.07)
<b>Total</b>					<b>61.4</b>	
Campo						
<i>Pg3</i>	184.2	ctg29 – sPb4930	0.19	SC283	3.5	(0.09)
Controle	<i>Pg9</i>	214.0	sPb1826 sPb4087	– 0.66	BR007	44.0 (0.09)
<b>Total</b>					<b>47.5</b>	
<i>Pg3</i>	184.2	ctg29 – sPb4930	0.61	SC283	37.7	(0.10)
Al	<i>Pg9</i>	214.0	sPb1826 sPb4087	– 0.36	BR007	12.7 (0.09)
<b>Total</b>					<b>50.4</b>	

Com base na sua posição, o QTL pleiotrópico *CLR3/Pg3* está colocalizado com o gene *SbMATE* no loco *Alt<sub>SB</sub>* (Figura 4). Como observado para *CLR3*, o alelo positivo (que aumenta a expressão fenotípica) para produção de grãos no loco *Pg3* também é doado pelo parental tolerante ao Al, SC283. Isso indica uma ação pleiotrópica do gene *SbMATE* na manutenção da elongação radicular em solução nutritiva com 27 µM Al<sup>3+</sup> e na produção de grãos em um solo com 56% de saturação de Al. *Pg3* tem expressão fenotípica tanto em condições controle quanto sob estresse de Al, mas o seu efeito sob toxidez de Al é de 0,6 ton./ha, mais de três vezes maior do que aquele estimado em condições controle (Tabela 3). Além disso, a fração da variação fenotípica explicada por *Pg3* no sítio controle é de somente 3,5%

contrastando com quase 40% na presença de toxidez de Al. O leve efeito do gene *SbMATE* no sítio controle deve-se, provavelmente, à presença de Al no subsolo.

A análise de QTL no contexto de múltiplas características revelou um segundo QTL tanto para tolerância ao Al (*CLR9*) quanto para produção de grãos (*Pg9*) na posição 214 cM no cromossomo 9 (Figura 3), sendo que *CLR9* explicou uma menor proporção da variância fenotípica em solução nutritiva em comparação a *CLR3* (Tabela 3). Como foi o caso para *CLR3*, o alelo positivo no QTL *CLR9* foi doado pelo parental tolerante ao Al, SC283. Entretanto, para produção de grãos, *Pg9* explicou uma proporção muito maior da variância genética em condições controle em comparação ao tratamento com toxidez de Al,

sendo que o alelo que aumentou produção de grãos foi doado pelo parental sensível ao Al, BR007, tanto com alta quanto com baixa saturação de Al no solo.



**Figura 4.** Detalhe gráfico do QTL detectado pela análise simultânea de múltiplas características para crescimento líquido relativo (CLR) e produção de grãos (ton. ha<sup>-1</sup>), como descrito na Figura 3. Carvalho Jr. et al. (2016).

A análise de variância para produção de grãos nos estoques híbridos revelou um efeito significativo de ambiente (i.e. controle e Al) com alta saturação de Al causando uma redução de 23% na produção de grãos (Tabela 4). Essa análise revelou também um efeito médio significativo para o fator fêmea entre ATF13A(tt) e ATF14A(TT), que atingiu 0,5 ton./ha. Esse efeito resulta da adição de uma cópia do alelo de tolerância do loco *Alt*<sub>SB</sub> T, quando testado entre as quatro linhagens macho que foram cruzadas com as linhagens fêmeas (Tabela 1). Considerando que esse efeito médio inclui comparações entre 0 (tt), 1 (Tt) e duas cópias do alelo de tolerância (TT), conclui-se que há também vantagem em se introgridir o alelo de tolerância do loco *Alt*<sub>SB</sub> em ambos os parentais por causa do seu

modo de ação gênica aditiva na tolerância ao Al avaliado no campo.

**Tabela 4.** Média e diferenças mínimas significativas (alfa=0.05) para os fatores ambiente e fêmeas. Carvalho Jr. et al. (2016).

	Efeito Médio	Produção de grãos (ton. ha <sup>-1</sup> )
Fêmea	ATF13A	3.46
	ATF14A	3.96
	DMS (0.05)	0.45
Ambiente	Control	4.18
	Al	3.24
	DMS (0.05)	0.90

### Importância dos Resultados para o Melhoramento de Sorgo para Solos Ácidos

Os principais resultados desse estudo, que foram publicados em Carvalho Jr. et al. (2016) na revista G3 - Genes, Genomes, Genetics, estão listados a seguir:

O gene *SbMATE* aumenta a produção de grãos de sorgo em solos ácidos com toxidez de Al.

Um alelo do gene *SbMATE* aumenta a produção de grãos em 0,6 ton./ha, resultando em 26% de aumento com relação à média populacional. Dado o seu modo de ação, dois alelos do gene *SbMATE* aumentam a produção de grãos de sorgo em mais de 1,0 ton./ha (mais de 50% de aumento).

O gene *SbMATE* também aumenta a produção de grãos em estoques híbridos, com 0,5 ton./ha de aumento advindo de um único alelo de tolerância. Há vantagem em se introduzir o gene *SbMATE* em ambos os parentais de um dado híbrido, considerando o seu modo de ação aditivo.

Não há efeito negativo do gene *SbMATE* na produção de grãos na ausência de toxidez de Al uma vez que o alelo advindo do parental tolerante não reduziu a produção de grãos nessas condições.

Um QTL para tolerância ao Al foi detectado no cromossomo 9. Entretanto, a posição desse QTL coincide com um QTL de florescimento/ altura de plantas previamente detectado por Sabadin et al. (2012).

Esses resultados indicam que o gene *SbMATE* é fundamental para a sustentabilidade dos sistemas de produção de grãos de sorgo cultivado em solos ácidos com toxidez de Al. Na ausência de tolerância ao Al, o potencial produtivo das linhagens é obscurecido pela toxidez de Al. Esse potencial produtivo é concretizado mediante a atividade do gene *SbMATE*. A Embrapa Milho e Sorgo produziu marcadores moleculares que servem tanto para a seleção assistida com base no gene *SbMATE* quanto para a caracterização de germoplasma de sorgo para presença de alelos funcionais do gene *SbMATE* (CANIATO et al., 2014)

A correção dos solos ácidos foi um passo importante na conquista do Cerrado brasileiro. Há apenas algumas décadas, poucos acreditavam que esses solos algum dia seriam produtivos. Entretanto, após derramar quantidades incomensuráveis de calcário no solo para reduzir os níveis de acidez ao longo dos últimos 30 anos, ainda há muito a ser feito. Segundo dados da Associação Brasileira dos Produtores de Calcário Agrícola (ABRACAL), foram consumidos no Brasil, em 2014, mais de 35 milhões de toneladas de calcário agrícola. A preços de mercado, tal montante de calcário constitui um valor de 4 bilhões de reais. Além disso, estudos mostram que a aplicação está abaixo do ideal, que seria algo perto de 90 milhões de toneladas.

Os potenciais impactos da utilização ampla do gene *SbMATE* podem ser antevistos sob outros aspectos, além da simples soma de calcário consumido no Brasil. Nesse sentido, analisando especificamente a cultura do sorgo, a pesquisa indica que a tecnologia possibilita o incremento de produtividade de até 0,6 toneladas (um alelo de tolerância) ou 1,2 toneladas (dois alelos de tolerância) por hectare em solos com alta saturação de Al. Considerando-se somente a utilização de um alelo de tolerância, no que se refere à safra brasileira de sorgo de 2013/14, a produção poderia aumentar em até 441 mil toneladas, representando um incremento de renda para os produtores de 111 milhões de reais. Pensando adiante, o gene *SbMATE* aplicado a culturas mais abrangentes, como a do milho, pode gerar resultados consideravelmente melhores.

## Referências

- ALIMI, N. A.; BINK, M. C.; DIELEMAN, J. A.; MAGAN, J. J.; WUBS, A. M.; PALLOIX, A.; EEUWIJK, F. A. van. Multi-trait and multi-environment QTL analyses of yield and a set of physiological traits in pepper. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 126, p. 2597-2625, 2013.
- BOER, M. P.; WRIGHT, D.; FENG, L.; PODLICH, D. W.; LUO, L.; COOPER, M.; VAN EEUWIJK, F. A. A mixed-model quantitative trait loci (QTL) analysis for multiple-environment trial data using environmental covariables for QTL-by-environment with an example in maize. **Genetics**, Maryland, v. 177, p. 1801-1813, 2007.
- CANIATO, F. F.; HAMBLIN, M. T.; GUIMARÃES, C. T.; ZHANG, Z.; SCHAFFERT, R. E.; KOCHIAN, L. V.; MAGALHÃES, J. V. Association mapping provides insights into the origin and the fine structure of the sorghum aluminum tolerance locus, *Alt<sub>SB</sub>*. **Plos One**, San Francisco, v. 9, p. e87438, 2014.

CANIATO, F. F.; GUIMARÃES, C. T.; HAMBLIN, M.; BILLOT, C.; RAMI, J.-F.; HUFNAGEL, B.; KOCHIAN, L. V.; LIU, J.; GARCIA, A. A. F.; HASH, C. T.; RAMU, P.; MITCHELL, S.; KRESIVICH, S.; OLIVEIRA, A. C. de; AVELLAR, G. de; BORÉM, A.; GLASZMANN, J.-C.; SCHAFFERT, R. E.; MAGALHÃES, J. V. The relationship between population structure and aluminum tolerance in cultivated sorghum. **Plos One**, San Francisco, v. 6, n. 6, p. 1-14, 2011.

CANIATO, F. F.; GUIMARÃES, C. T.; SCHAFFERT, R. E.; ALVES, V. M. C.; KOCHIAN, L. V.; BOREM, A.; KLEIN, P. E.; MAGALHÃES, J. V. Genetic diversity for aluminum tolerance in sorghum. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 114, n. 5, p. 836-876, 2007.

CARVALHO JR., G.; SCHAFFERT, R. E.; MALOSETTI, M.; VIANA, J. H. M.; MENEZES, C. B.; SILVA, L. A.; GUIMARAES, C. T.; COELHO, A. M.; KOCHIAN, L. V.; EEUWIJK, F. A. van; MAGALHAES, J. V. Back to acid soil fields: the citrate transporter *SbMATE* is a major asset for sustainable grain yield for sorghum cultivated on acid soils. **G3 Genes, Genomes, Genetics**, Bethesda, v. 6, p. 475-484, 2015.

DOUMBIA, M. D.; HOSSNER, L. R.; ONKEN, A. B. Variable sorghum growth in acid soils of subhumid West Africa. **Arid Soil Research and Rehabilitation**, v. 7, p. 335-346, 1993.

DOUMBIA, M. D.; HOSSNER, L. R.; ONKEN, A. B. Sorghum growth in acid soils of West Africa: variations in soil chemical properties. **Arid Soil Research and Rehabilitation**, v. 12, p. 179-190, 1998.

GOURLEY, L. M. Finding and utilizing exotic Al-tolerant sorghum germplasm. In: WORKSHOP ON EVALUATING SORGHUM FOR TOLERANCE TO AL-TOXIC TROPICAL SOILS IN LATIN AMERICA, 1984, Cali. **Sorghum for acid soils: proceedings**. Cali: CIAT, 1987. p. 293-309.

KOCHIAN, L. V.; PIÑEROS, M. A.; LIU, J.; MAGALHÃES, J. V. Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 66, p. 571-598, 2015.

LI, J.; JI, L. Adjusting multiple testing in multilocus analyses using the eigenvalues of a correlation matrix. **Heredity**, London, v. 95, p. 221-277, 2005.

MAGALHÃES, J. V. de; LIU, J.; GUIMARÃES, C. T.; LANA, U. G. de P.; ALVES, V. M. C.; WANG, Y.-H.; SCHAFFERT, R. E.; HOEKENGA, O. A.; PINEROS, M. A.; SHAFF, 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**, New York, v. 39, n. 9, p. 1156-1161, 2007.

MAGALHÃES, J. V.; GARVIN, D. F.; WANG, Y. H.; 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, n. 4, p. 1905-1914, 2004.

MALOSETTI, M.; RIBAUT, J. M.; VAN EEUWIJK, F. A. The statistical analysis of multi-environment data: modeling genotype-by-environment interaction and its genetic basis. **Frontiers in Physiology**, v. 4, p. 44, 2013.

MALOSETTI, M.; RIBAUT, J. M.; VARGAS, M.; CROSSA, J.; VAN EEUWIJK, F. A. A multi-trait multi-environment QTL mixed model with an application to drought and nitrogen stress trials in maize (*Zea mays* L.). **Euphytica**, Wageningen, v. 161, p. 241-257, 2008.

PANOSO, L. A.; RAMOS, D. P.; BRANDÃO, M. **Solos do campo experimental da Embrapa Milho e Sorgo: suas características e classificação no novo sistema brasileiro.**

Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. (Embrapa Solos. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 5).

SABADIN, P. K.; MALOSETTI, M.; BOER, M. P.; TARDIN, F. D.; SANTOS, F. G.; GUIMARÃES, C. T.; GOMIDE, R. L.; ANDRADE, C. L. T.; ALBUQUERQUE, P. E. P.; CANIATO, F. F.; MOLLINARI, M.; MARGARIDO, G. R. A.; OLIVEIRA, B. F.; SCHAFFERT, R. E.; GARCIA, A. A. F.; EEUWIJK, F. A. van; MAGALHÃES, J. V. Studying the genetic basis of drought tolerance in sorghum by managed stress trials and adjustments for phenological and plant height differences. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v. 124, p. 1389-1402, 2012.

VON UEXKÜLL, H. R.; MUTERT, E. Global extent, development and economic impact of acid soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 171, p. 1-15, 1995.

### Circular Técnica, 218

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:  
**Embrapa Milho e Sorgo**  
**Endereço:** Rod. MG 424 km 45 Caixa Postal 151  
CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG  
**Fone:** (31) 3027 1100  
**Fax:** (31) 3027 1188  
[www.embrapa.br/fale-conosco](http://www.embrapa.br/fale-conosco)  
**1ª edição**  
**Versão Eletrônica (2016)**

MINISTÉRIO DA  
AGRICULTURA, PECUÁRIA  
E ABASTECIMENTO



### Comitê de publicações

**Presidente:** Presidente: Sidney Netto Parentoni.  
**Secretário-Executivo:** *Elena Charlotte Landau.*  
**Membros:** *Antonio Claudio da Silva Barros, Cynthia Maria Borges Damasceno, Maria Lúcia Ferreira Simeone, Monica Matoso Campanha, Roberto dos Santos Trindade e Rosângela Lacerda de Castro.*

### Expediente

**Revisão de texto:** *Antonio Claudio da Silva Barros.*  
**Normalização bibliográfica:** *Rosângela Lacerda de Castro.*  
**Tratamento das ilustrações:** *Tânia Mara A. Barbosa.*  
**Editoração eletrônica:** *Tânia Mara A. Barbosa.*