



Tolerância de cultivares de soja à toxicidade do alumínio em fase inicial

Tolerance of soybean cultivars to aluminium toxicity at the initial phase

Rogério do Carmo Cabral¹, Alan Mario Zuffo², Simone Cândido Ensinas³,
Kátia Cristina da Silva¹, Fábio Steiner⁴

RESUMO: Os genótipos de soja possuem níveis distintos de tolerância aos efeitos fitotóxicos do alumínio (Al^{3+}) e a exploração dessa característica pode ser uma importante estratégia para potencializar o uso de solos ácidos. Esta pesquisa foi realizada para investigar os efeitos do alumínio na germinação e no crescimento inicial de 25 cultivares de soja, e identificar os cultivares mais tolerantes e suscetíveis à toxicidade por Al^{3+} . O ensaio foi realizado no laboratório de sementes da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Unidade Universitária de Cassilândia. A toxicidade de Al^{3+} foi imposta pela exposição das sementes a uma solução diluída contendo $15 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al^{3+} , combinada com $1250 \mu\text{mol L}^{-1}$ de cálcio. O pH da solução contendo Al^{3+} foi ajustado para 4,3 com HCl $0,5 \text{ mol L}^{-1}$. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado com quatro repetições de 50 sementes. Os fatores foram constituídos pelas 25 cultivares de soja e pelas duas condições de crescimento das plântulas (controle ou estresse por Al^{3+}), totalizando 50 tratamentos. Os tratamentos foram avaliados com base nos índices de tolerância ao estresse (ITE) para a germinação das sementes, comprimento e matéria seca das plântulas. A toxicidade por Al^{3+} reduziu a taxa de germinação e o crescimento inicial de todas as 25 cultivares de soja. As cultivares TMG 7061 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7067, HO Paranaíba IPRO e NS 7505 IPRO foram consideradas como as mais indicadas para serem cultivadas em solos ácidos por apresentarem maior tolerância à toxicidade de alumínio, e as cultivares RK 815 IPRO, RK 8317 IPRO e ST 777 IPRO foram classificadas como suscetíveis à toxicidade do alumínio, e não devem ser recomendadas para o cultivo em solos ácidos.

Palavras-chave: Acidez do solo. Acidez trocável. Estresse abiótico. *Glycine max* L. Índices de tolerância.

ABSTRACT: Soybean genotypes have different levels of tolerance to the phytotoxic effects of aluminum (Al^{3+}) and analysis of this characteristic may potentialize the use of acid soils. Current research investigated the effects of aluminum in the germination and initial growth of 25 soybean cultivars and the identification of more tolerant cultivars susceptible to toxicity by Al^{3+} . Assay was conducted at the seed laboratory of the Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul in Cassilândia, Brazil. Toxicity by Al^{3+} was imposed by exposition of seeds to a diluted solution with $15 \mu\text{mol L}^{-1}$ of Al^{3+} , plus $1250 \mu\text{mol L}^{-1}$ calcium. The pH of solution with Al^{3+} was adjusted to 4.3 by HCl 0.5 mol L^{-1} . Randomized experimental design comprised four replications with 50 seeds from 25 soybean cultivars and two growth conditions of seedlings (control or stress by Al^{3+}), with a total of 50 treatments. Treatments were evaluated by tolerance indexes to stress (ITE) for seed germination, length and dry matter of seedlings. Toxicity by Al^{3+} reduced germination and initial growth rate in all the 25 soybean cultivars. Cultivars TMG 7061 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7067, HO Paranaíba IPRO and NS 7505 IPRO were indicated since they were bred in acid soils and had the greater tolerance to aluminum toxicity. Cultivars RK 815 IPRO, RK 8317 IPRO and ST 777 IPRO were classified as susceptible to aluminum toxicity and should not be recommended for breeding in acid soils.

Keywords: Soil acidity. Exchangeable acidity. Abiotic stress. *Glycine max* L. Tolerance indexes.

Autor correspondente:

Alan Mario Zuffo: alan_zuffo@hotmail.com

Recebido em: 20/03/2020

Aceito em: 04/08/2020

¹ Discentes de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Sustentabilidade na Agricultura, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Cassilândia (MS), Brasil.

² Professor do Curso de Agronomia da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), Balsas (MA), Brasil.

³ Professora Adjunta IV e coordenadora do curso de Tecnologia em Produção Sucoalcooleira da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Unidade Universitária de Glória de Dourados (MS), Brasil.

⁴ Professor, Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Sustentabilidade na Agricultura, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Cassilândia (MS), Brasil.

INTRODUÇÃO

A toxicidade por alumínio (Al), comum em solos ácidos, é considerada um dos principais fatores que limitam o crescimento das plantas e a produção agrícola, especialmente nas regiões tropicais e subtropicais. Os solos ácidos representam cerca de 30% da área total do planeta e 50% das áreas agrícolas do mundo, prejudicando a expansão do cultivo de plantas destinadas à produção de alimentos, fibras e combustíveis (SADE *et al.*, 2016).

A acidificação do solo pode ocorrer devido a processos naturais e ou antropogênicos (BOJÓRQUEZ-QUINTAL *et al.*, 2017). A maioria dos solos ácidos ocorrem nas regiões tropicais e subtropicais, onde a acidificação é um processo natural. Esse processo de acidificação natural ocorre devido à dissociação parcial do gás carbônico do ar na água da chuva, a remoção e lixiviação de cátions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) e de ânions cloreto, nitrato e sulfato do solo, fixação biológica de nitrogênio e devido à mineralização de compostos orgânicos no solo. No entanto, a acidificação do solo pode ser agravada pela reação de alguns fertilizantes minerais no solo que liberam H^+ , especialmente os fertilizante nitrogenados.

O Al na forma trocável e, portanto, em equilíbrio com o Al^{3+} na solução do solo é o maior problema para a produtividade de culturas em solos ácidos. A presença de Al trocável no solo, comum nos solos do Cerrado, é resultado de processos de intemperismo que atuam sobre os minerais de rochas, produzindo Al^{3+} e ácido salicíco. Este último é removido do meio por percolação, ao passo que o Al^{3+} permanece ligado às superfícies das partículas carregadas negativamente. O Al^{3+} na solução do solo torna-se disponível para as plantas e, então, resulta em efeitos fitotóxicos nas plantas (KOPITTKKE *et al.*, 2015). A compreensão e a identificação de espécies e, ou genótipos menos suscetíveis aos efeitos deletérios do Al^{3+} , são alternativas para potencializar a produção agrícola das culturas cultivadas em condições de solos ácidos.

O principal efeito da toxicidade do Al nas plantas é a inibição do crescimento das raízes, como resultado da alteração de diferentes mecanismos e estruturas celulares. Existem diferentes graus de tolerância à toxicidade do Al entre as espécies e genótipos de plantas, que em muitas espécies vegetais são devidos ao controle genético (MENOSSO *et al.*, 2000; SANTOS *et al.*, 2018; BARBOSA *et al.*, 2018). O Al afeta a síntese de DNA e a regulação de proteínas que controlam o ciclo celular (MOHAN *et al.*, 2013). Portanto, a toxicidade do Al manifesta-se, inicialmente, pela drástica redução da taxa de alongação das raízes (KOPITTKKE *et al.*, 2015) e, posteriormente, induz a redução no crescimento da parte aérea devido à inibição da absorção de água e nutrientes, especialmente fósforo (P), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) (STEINER *et al.*, 2012). Os efeitos fitotóxicos do Al nas raízes incluem a redução no número e no comprimento de raízes laterais, redução na matéria seca e menor área de exploração das raízes, e frequentemente estão associados ao aumento no diâmetro médio das raízes (espessamento) e no volume radicular (KOPITTKKE *et al.*, 2015; SADE *et al.*, 2016).

Os mecanismos envolvidos na tolerância diferencial entre as espécies e genótipos de plantas estão associados aos mecanismos de exclusão ou amenização da absorção de Al^{3+} pelas raízes por meio da alteração do pH da rizosfera, excreção de moléculas quelantes, secreção de mucilagem, alívio da toxicidade de Al com auxina, malato, dentre outros elementos, e também pela presença de estruturas de cobertura no ápice da raiz e por mecanismos de tolerância interna ao estresse por Al promovida pela quelatização de Al no citoplasma e modificação do metabolismo das plantas (TAHARA *et al.*, 2014; BOJÓRQUEZ-QUINTAL *et al.*, 2017).

A germinação das sementes e o estabelecimento das plantas são potencialmente os estádios mais críticos do ciclo de vida das plantas, e a toxicidade do Al pode limitar o estabelecimento das plantas no campo e, conseqüentemente, a produtividade das culturas. Portanto, a identificação de genótipos de soja com maior tolerância à toxicidade do Al é importante para o estabelecimento das lavouras de soja nos solos ácidos do Cerrado. Esta pesquisa foi realizada para avaliar a tolerância de 25 cultivares comerciais de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.] à toxicidade de Al durante as fases de germinação e crescimento inicial das plantas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio foi realizado no laboratório de sementes da Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul (UEMS), Unidade Universitária de Cassilândia (UUC). Sementes de um total de 25 cultivares comerciais de soja para a região Centro-Oeste do Brasil foram adquiridas diretamente das empresas detentoras do seu registro no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). Antes do início do estudo, foram determinados o teor de água, a massa de mil sementes e a taxa de germinação das sementes, como descrito nas Regras para Análise de Sementes - RAS (BRASIL, 2009). As principais características agronômicas e intrínsecas das sementes de soja são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Características agronômicas, teor de água, massa de mil sementes e germinação das 25 cultivares de soja utilizadas no estudo

Cultivar	Características Agronômicas			Teor de água (%)	Massa de 1000 sementes (g)	Germinação (%)
	Ciclo ¹	GMRT	Tipo de crescimento			
TMG 2383 IPRO	120	8,3	Semideterminado	9,51	175	87
TMG 2381 IPRO	120	8,1	Indeterminado	9,77	160	100
TMG 2378 IPRO	125	7,8	Semideterminado	8,96	165	96
TMG 7067 IPRO	112	7,2	Semideterminado	9,87	170	100
TMG 7063 IPRO	110	7,0	Indeterminado	9,75	175	86
TMG 2165 IPRO	112	6,5	Indeterminado	9,14	180	98
TMG 7061 IPRO	110	6,1	Indeterminado	10,17	185	98
97R50 IPRO	115	7,5	Indeterminado	8,15	190	100
98R31 IPRO	130	8,3	Indeterminado	9,89	175	97
98R35 IPRO	130	8,3	Indeterminado	9,57	180	98
HO Cristalino IPRO	125	8,3	Indeterminado	8,93	160	100
HO Maracaí IPRO	120	7,7	Indeterminado	9,60	170	87
HO Paranaíba IPRO	115	7,4	Indeterminado	9,75	210	93
BMX Foco IPRO	110	7,2	Indeterminado	9,11	175	83
BMX Bônus IPRO	120	7,9	Indeterminado	9,42	185	100
ST 777 IPRO	108	7,7	Indeterminado	9,41	155	100
ST 797 IPRO	110	7,9	Indeterminado	9,45	150	100
RK 8115 IPRO	120	8,1	Indeterminado	9,02	200	96
RK 6719 IPRO	105	6,7	Indeterminado	9,57	190	100
RK 7518 IPRO	112	7,5	Indeterminado	10,08	180	100
RK 8317 IPRO	125	8,3	Indeterminado	10,46	185	88
M 5917 IPRO	95	5,9	Indeterminado	9,42	170	93
NS 8399 IPRO	120	8,3	Indeterminado	9,02	185	89
NS 7007 IPRO	98	7,1	Indeterminado	9,77	210	99
NS 7505 IPRO	118	7,5	Indeterminado	8,97	200	84

¹ Ciclo médio, em dias, da emergência ao ponto de colheita. GMR: Grupo de maturidade relativa.

As sementes foram previamente desinfetadas pela imersão durante período de 10 minutos, em solução de hipoclorito de sódio 1% (v/v), sendo então lavadas em água corrente e, em seguida, colocadas para germinar em papel-toalha (Germitest[®]) umedecido com solução diluída contendo 1250 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de cálcio (controle) e combinada com 15 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al^{3+} (estresse por alumínio). As soluções foram preparadas a partir das diluições de AlCl_3 e CaCl_2 em água destilada. O pH da solução contendo Al^{3+} foi inicialmente ajustado para 4,3 com HCl 0,5 mol L^{-1} , e não foi mais ajustado até o final do ensaio. A utilização de solução diluída contendo entre 7,5 e 20 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Al^{3+} , combinada com 1250 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de Ca^{2+} , foi eficiente na definição das diferenças de tolerância entre os genótipos de soja (MENOSSO *et al.*, 2000).

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado com quatro repetições de 50 sementes. Os fatores foram constituídos pelas 25 cultivares de soja e pelas duas condições de crescimento das plântulas (controle ou estresse por Al^{3+}), totalizando 50 tratamentos.

Quatro subamostras de 50 sementes foram colocadas para germinar sobre três folhas de papel-toalha Germitest[®], previamente umedecidas com as diferentes soluções, em quantidade equivalente a 2,5 vezes a massa seca do papel. Em seguida, foram confeccionados rolos, os quais foram mantidos em câmara de germinação sob temperatura constante de 25 °C e fotoperíodo de 12 horas, durante 14 dias.

Foram consideradas sementes germinadas quando estas apresentaram protrusão da radícula, com no mínimo 10 mm de comprimento. Após a determinação da taxa de germinação, 10 plântulas foram escolhidas aleatoriamente para a mensuração do comprimento e da matéria seca da parte aérea e das raízes. O comprimento da parte aérea (CPA) e das raízes (CR) foi mensurado com auxílio de uma régua graduada em milímetros. A matéria seca da parte aérea (MSPA) e das raízes (MSR) foi determinada em balança analítica após secagem do material vegetal em estufa a 85 °C, por 48h.

Os índices de tolerância ao estresse (ITE) das cultivares de soja foram calculados a partir dos dados de germinação, comprimento e matéria seca de plântulas em condições controle, ou expostas à toxicidade de Al³⁺, utilizando-se as seguintes equações propostas por Partheeban *et al.* (2017): $ITE-G = [(Germinação\ de\ sementes\ sob\ estresse / Germinação\ de\ sementes\ do\ controle) \times 100]$. $ITE-CPA = [(Comprimento\ da\ parte\ aérea\ das\ plantas\ sob\ estresse / Comprimento\ da\ parte\ aérea\ das\ plantas\ do\ controle) \times 100]$. $ITE-CR = [(Comprimento\ das\ raízes\ sob\ estresse / Comprimento\ das\ raízes\ das\ plantas\ do\ controle) \times 100]$. $ITE-CT = [(Comprimento\ total\ das\ plantas\ sob\ estresse / Comprimento\ total\ das\ plantas\ do\ controle) \times 100]$. $ITE-MSPA = [(Matéria\ seca\ da\ parte\ aérea\ das\ plantas\ sob\ estresse / Matéria\ seca\ da\ parte\ aérea\ das\ plantas\ do\ controle) \times 100]$. $ITE-MSR = [(Matéria\ seca\ das\ raízes\ das\ plantas\ sob\ estresse / Matéria\ seca\ das\ raízes\ das\ plantas\ do\ controle) \times 100]$. $ITE-MST = [(Matéria\ seca\ total\ das\ plantas\ sob\ estresse / Matéria\ seca\ total\ das\ plantas\ do\ controle) \times 100]$.

Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias das cultivares de soja foram agrupadas pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. As análises foram realizadas utilizando-se o *software* Sisvar versão 5.6 para *Windows*.

A identificação das cultivares tolerantes e ou suscetíveis à toxicidade por Al³⁺ foi realizada com base em todos os índices de tolerância de estresse (ITE), por meio do método do ranqueamento conforme apresentado por Farshadfar *et al.* (2012). Uma cultivar com o maior valor para cada um dos ITE recebeu uma pontuação de classificação igual a 1, ao passo que a cultivar com o menor valor para cada um dos ITE recebeu uma pontuação de classificação igual a 25. Foram calculados a pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) e o desvio padrão dos ranqueamentos (DP_R) para todos os índices de tolerância de estresse das 25 cultivares de soja em condições de estresse por Al³⁺.

A discriminação das cultivares de soja quanto a tolerância à toxicidade por Al³⁺, com base apenas no valor médio do ranqueamento e no valor do desvio padrão do ranqueamento, não tem se mostrado eficaz para classificar as cultivares em distintos níveis de tolerância aos

estresses abióticos. Portanto, neste estudo foi proposto um aprimoramento do método do ranqueamento, inicialmente utilizado por Farshadfar *et al.* (2012). A classificação e separação das cultivares de soja em níveis de tolerância foi realizada com base na pontuação média do ranqueamento de cada cultivar, considerando-se o valor do quartil que divide as 25 posições possíveis de ranqueamento em quatro partes iguais, como mostrado na Figura 1.

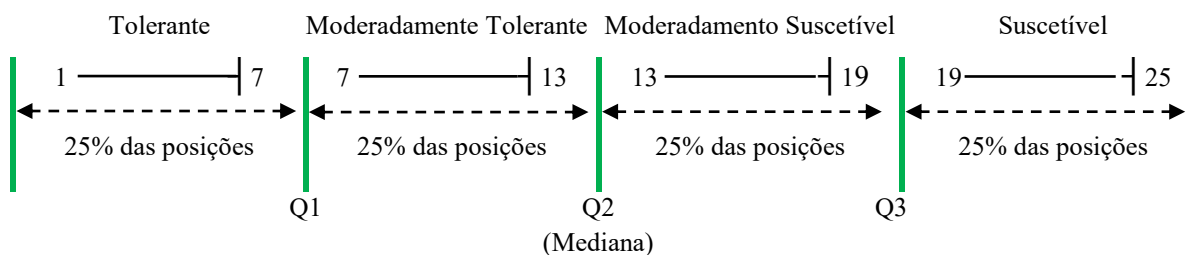


Figura 1. Ilustração da distribuição da pontuação média das cultivares em quatro partes iguais para a classificação das cultivares de soja quanto a tolerância à toxicidade por Al^{3+} , com base no valor médio do ranqueamento de todos os índices de tolerância ao estresse. Q1, Q2 e Q3 representam o primeiro, segundo e terceiro quartil, respectivamente.

O método proposto preconiza que uma cultivar enquadrada com pontuação média no ranqueamento abaixo do valor do primeiro quartil (Q1) seja classificada como tolerante; uma cultivar com pontuação média entre o valor do primeiro (Q1) e segundo quartil (Q2) seja classificada como moderadamente tolerante; uma cultivar com pontuação média do ranqueamento entre o valor do segundo (Q2) e terceiro quartil (Q3) seja classificada como moderadamente suscetível ao estresse abiótico, por sua vez, o grupo de cultivares suscetíveis aos estresses abióticos é enquadrado com pontuação média do ranqueamento acima do valor do terceiro quartil (Q3) (Figura 1).

As análises multivariadas pelo método de agrupamentos hierárquicos foram realizadas com base na distância Euclidiana e no método de variância mínima de Ward, para classificar as 25 cultivares de soja em diferentes níveis de tolerância à toxicidade de Al^{3+} (cultivares tolerantes, moderadamente tolerantes, moderadamente suscetíveis e cultivares suscetíveis). A análise dos componentes principais (ACP) com base na matriz de covariância dos índices de tolerância de estresse e análise *biplot* foram realizadas utilizando-se o *software* estatístico Action Stat Pro[®] versão 3.6 para *Windows*.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O índice de tolerância de estresse para a germinação das sementes (ITE-G) permitiu separar as cultivares de soja em quatro grupos, em que as cultivares TMG 2381 IPRO, TMG 7061 IPRO, HO Maracaí IPRO e RK 6719 IPRO representaram o grupo com maior índice de tolerância à toxicidade por Al^{3+} , e as cultivares RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO representaram o grupo com menor índice de tolerância ao estresse por Al^{3+} (Tabela 2).

O índice de tolerância de estresse para o comprimento da parte aérea (ITE-CPA) das plantas permitiu separar as cultivares de soja em quatro grupos. As cultivares TMG 7063 IPRO, TMG 7061 IPRO, HO Paranaíba IPRO, ST 797 IPRO, RK 7518 IPRO e NS 7505 IPRO representaram o grupo com maior índice de tolerância à toxicidade por Al^{3+} , ao passo que as cultivares ST 777 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO representaram o grupo com menor índice de tolerância (Tabela 2). O índice de tolerância ao estresse para o comprimento das raízes (ITE-CR) das plantas permitiu classificar as cultivares de soja em oito grupos distintos, em que o grupo com maior índice de tolerância ao Al^{3+} foi representado pela cultivar TMG 7061 IPRO, e as cultivares ST 777 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO foram classificadas no grupo com menor índice de tolerância à toxicidade por Al^{3+} (Tabela 2).

O comprimento da parte aérea das plantas de soja expostas ao estresse por Al^{3+} representou, em média, 70% do comprimento da parte aérea das plantas do tratamento controle, ao passo que o comprimento das raízes sob condições de estresse por Al^{3+} representou, em média, 49% do comprimento das raízes do tratamento controle (Tabela 2). Esses resultados indicam que o crescimento das raízes das plantas de soja foi mais afetado pela toxicidade por Al^{3+} quando comparado ao crescimento da parte aérea das plantas.

A presença de Al^{3+} no meio de crescimento, além de ter efeito fitotóxico na maioria das plantas, por inibir o crescimento das raízes das plantas, bloqueando os mecanismos de aquisição e transporte de água e nutrientes essenciais, pode causar severas alterações citológicas (KOPITKE *et al.*, 2015; SADE *et al.*, 2016; BOJÓRQUEZ-QUINTAL *et al.*, 2017). Essas anomalias no metabolismo da planta acarretam menor crescimento das raízes, o que é explicado por problemas de alongamento e divisão celular (MOHAN *et al.*, 2013). A tolerância das espécies e genótipos de plantas ao Al^{3+} tem sido atribuída à capacidade das plantas manterem em suas raízes ou na parte aérea níveis adequados de nutrientes (BOJÓRQUEZ-QUINTAL *et al.*, 2017).

Em geral, os efeitos deletérios decorrentes da presença de Al^{3+} na solução do solo tem sido mais evidente nas raízes, o que pode ser atribuído à baixa mobilidade deste elemento na planta, conforme reportado por Giaveno *et al.* (2001). Fatores nutricionais frequentemente modificam o crescimento e a morfologia de órgãos particulares das plantas, de maneira específica e, como as raízes são os órgãos em contato direto com a solução do solo, estas são, especialmente, mais propensas a serem afetadas por alterações neste ambiente.

O índice de tolerância de estresse para o comprimento total (ITE-CT) das plantas permitiu classificar as cultivares de soja em sete grupos, sendo que a cultivar TMG 7061 IPRO foi classificada no grupo com maior índice de tolerância ao Al^{3+} , ao passo que o grupo com menor índice de tolerância ao estresse por Al^{3+} foi representado pelas cultivares ST 777 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO (Tabela 2).

Tabela 2. Índices de tolerância de estresse para a germinação e o crescimento inicial das plântulas das 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.] expostas à toxicidade por alumínio

Cultivar	ITE-G	ITE-CPA	ITE-CR	ITE-CT	ITE-MSPA	ITE-MSR	ITE-MST
	----- (%) -----						
TMG 2383 IPRO	74 c	76 b	49 e	64 d	61 b	59 b	61 c
TMG 2381 IPRO	97 a	71 c	63 c	66 d	58 c	53 b	57 d
TMG 2378 IPRO	91 b	69 c	41 f	56 e	56 c	46 c	53 e
TMG 7067 IPRO	88 b	78 b	66 c	72 c	65 b	54 b	62 c
TMG 7063 IPRO	86 b	82 a	74 b	78 b	78 a	58 b	71 a
TMG 2165 IPRO	86 b	79 b	51 e	65 d	63 b	47 c	58 d
TMG 7061 IPRO	94 a	88 a	87 a	88 a	66 b	69 a	67 b
97R50 IPRO	89 b	64 c	47 e	56 e	62 b	47 c	58 d
98R31 IPRO	89 b	63 c	57 d	60 e	60 c	50 b	57 d
98R35 IPRO	80 c	68 c	48 e	58 e	58 c	66 a	60 c
HO Cristalino IPRO	80 c	75 b	38 f	57 e	61 b	37 d	53 e
HO Maracá IPRO	94 a	64 c	55 d	59 e	56 c	66 a	59 d
HO Paranaíba IPRO	88 b	85 a	78 b	82 b	63 b	59 b	62 c
BMX Foco IPRO	88 b	65 c	45 e	55 e	49 d	45 c	47 f
BMX Bônus IPRO	91 b	68 c	58 d	63 d	54 c	54 b	54 e
ST 777 IPRO	79 c	47 d	22 h	34 g	53 c	56 b	54 e
ST 797 IPRO	89 b	86 a	37 f	60 e	55 c	66 a	58 d
RK 8115 IPRO	60 d	49 d	27 h	37 g	47 d	38 d	44 g
RK 6719 IPRO	96 a	67 c	44 e	55 e	57 c	41 c	52 e
RK 7518 IPRO	91 b	81 a	42 f	63 d	67 b	42 c	60 c
RK 8317 IPRO	64 d	49 d	24 h	39 g	48 d	26 e	43 g
M 5917 IPRO	87 b	61 c	34 g	49 f	62 b	42 c	57 d
NS 8399 IPRO	82 c	67 c	41 f	51 f	55 c	34 d	48 f
NS 7007 IPRO	77 c	63 c	34 g	49 f	76 a	37 d	65 b
NS 7505 IPRO	85 b	85 a	57 d	74 c	72 a	54 b	67 b
Média	85	70	49	60	60	50	67
CV (%)	5,60	7,31	11,25	6,47	6,59	9,35	4,87

Média seguida por letras distintas, na coluna, mostra diferença significativa pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. CV: coeficiente de variação. ITE-G: Índice de tolerância de estresse para germinação. ITE-CPA: Índice de tolerância de estresse para comprimento da parte aérea. ITE-CR = Índice de tolerância de estresse para comprimento da raiz. ITE-CT: Índice de tolerância de estresse para comprimento total das plantas. ITE-MSPA: Índice de tolerância de estresse para matéria seca da parte aérea. ITE-MSR: Índice de tolerância de estresse para matéria seca das raízes. ITE-MST: Índice de tolerância de estresse para matéria seca total das plantas.

O índice de tolerância de estresse para a matéria seca da parte aérea (ITE-MSPA) das plantas permitiu separar as cultivares de soja em quatro grupos, sendo que o grupo com maior índice de tolerância ao Al^{3+} foi representado pelas cultivares 7063 IPRO, NS 7007 IPRO e NS 7505 IPRO, ao passo que o grupo com menor índice de tolerância ao estresse por Al^{3+} foi representado pelas cultivares BMX Foco IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO (Tabela 2).

O índice de tolerância de estresse para a matéria seca das raízes (ITE-MSR) das plantas permitiu classificar as cultivares de soja em cinco grupos, sendo que o grupo com maior índice de tolerância ao estresse por Al^{3+} foi representado pelas cultivares TMG 7061 IPRO, 98R35

IPRO, HO Maracaí IPRO e ST 797 IPRO, e a cultivar NS 8317 IPRO foi enquadrada no grupo com menor índice de tolerância ao Al^{3+} (Tabela 2). Índice de tolerância ao estresse para a matéria seca total (ITE-MST) permitiu classificar as cultivares de soja em sete grupos, sendo que a cultivar TMG 7063 IPRO representou o grupo com maior índice de tolerância ao estresse por Al^{3+} , ao passo que o grupo com menor índice de tolerância ao Al^{3+} foi representado pelas cultivares RK 8115 IPRO e NS 8317 IPRO (Tabela 2).

A identificação de cultivares de soja tolerantes ou suscetíveis à toxicidade de Al^{3+} , com base em apenas um único critério ou índice de tolerância ao estresse, pode ser contraditória (Tabela 2). Por exemplo, de acordo com o ITE-CPA e ITE-MSPA, as cultivares de soja TMG 7063 IPRO e NS 7505 IPRO foram consideradas tolerantes ao Al^{3+} , porém pelo ITE-CR e ITE-MSR a cultivar TMG 7061 IPRO foi considerada como tolerante à presença de Al^{3+} . Portanto, a diferenciação e a separação dos cultivares em diferentes níveis de tolerância ao Al^{3+} deve ser realizada levando-se em consideração todos os índices de tolerância de estresse, como reportado por Naghavi *et al.* (2013).

Considerando todos os índices de tolerância de estresse por Al^{3+} , as cultivares de soja TMG 7067 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7061 IPRO, HO Paranaíba IPRO e NS 7505 IPRO tiveram a melhor classificação média pelo método do ranqueamento e, portanto, essas cultivares foram classificadas como tolerantes à toxicidade por Al^{3+} . As cultivares ST 777 IPRO, RK 8115 IPRO, RK 8317 IPRO e NS 8399 IPRO receberam as maiores pontuações no método do ranqueamento e, então, foram classificadas como suscetíveis ao estresse por Al^{3+} (Tabela 3).

A análise multivariada de agrupamento hierárquico das 25 cultivares, com base em todos os índices de tolerância ao estresse por Al^{3+} , classificou as cultivares de soja em quatro grupos com 5, 3, 8 e 9 cultivares (Figura 2). O primeiro grupo foi representado pelas cultivares com os maiores índices de tolerância de estresse e, portanto, foi considerado o grupo mais tolerante à toxicidade de Al^{3+} . O segundo grupo representou as cultivares com os menores índices de tolerância de estresse e, então, foram as cultivares mais suscetíveis aos efeitos negativos do Al^{3+} (grupo suscetível). Por sua vez, o terceiro e o quarto grupo representaram as cultivares com os valores intermediários dos índices de tolerância de estresse e, portanto, as cultivares pertencentes a este grupo foram classificadas como moderadamente suscetíveis e tolerantes ao estresse por Al^{3+} , respectivamente.

Tabela 3. Ranqueamento, pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) e desvio padrão do ranqueamento (DP_R) para os índices de tolerância à toxicidade por alumínio das 25 cultivares de soja [*Glycine max* (L.) Merrill.]

Cultivar	Índice de Tolerância de Estresse (ITE)							\bar{R}	DP_R	Nível de Tolerância [†]
	G	CPA	CR	CT	MSPA	MSR	MST			
TMG 2383 IPRO	23	9	11	8	11	6	7	10,7	3,7	MT
TMG 2381 IPRO	1	11	5	6	14	12	14	9,0	4,3	MT
TMG 2378 IPRO	7	12	17	17	18	16	19	15,1	3,2	MS
TMG 7067 IPRO	11	8	4	5	6	9	5	6,9	2,1	T
TMG 7063 IPRO	15	5	3	3	1	7	1	5,0	3,4	T
TMG 2165 IPRO	16	7	10	7	7	15	11	10,4	3,1	MT
TMG 7061 IPRO	3	1	1	1	5	1	3	2,1	1,3	T
97R50 IPRO	9	17	13	16	9	14	13	13,0	2,3	MT
98R31 IPRO	10	20	8	11	13	13	16	13,0	2,9	MT
98R35 IPRO	20	13	12	14	15	3	8	12,1	3,8	MT
HO Cristalino IPRO	19	10	19	15	12	22	18	16,4	3,5	MS
HO Maracaí IPRO	4	19	9	13	17	4	10	10,9	4,7	MT
HO Paranaíba IPRO	11	4	2	2	8	5	6	5,4	2,5	T
BMX Foco IPRO	13	18	14	18	23	17	23	18,0	2,9	MS
BMX Bônus IPRO	6	14	6	9	21	10	17	11,9	4,7	MT
ST 777 IPRO	21	24	25	25	22	8	20	20,7	3,8	S
ST 797 IPRO	8	2	20	12	20	2	12	10,9	5,9	MT
RK 8115 IPRO	25	23	23	24	25	21	24	23,6	1,1	S
RK 6719 IPRO	2	16	15	19	16	19	21	15,4	4,0	MS
RK 7518 IPRO	5	6	16	10	4	20	9	10,0	4,6	MT
RK 8317 IPRO	24	24	24	23	24	25	25	24,1	0,5	S
M 5917 IPRO	14	22	22	22	10	18	15	17,6	3,9	MS
NS 8399 IPRO	18	15	18	20	19	24	22	19,4	2,2	S
NS 7007 IPRO	22	21	21	21	2	23	4	16,3	7,6	MS
NS 7505 IPRO	17	3	7	4	3	11	2	6,7	4,2	T

[†] T = refere-se a uma cultivar de soja tolerante à toxicidade de Al^{3+} , recebendo pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 1 a 7,0; MT = cultivar moderadamente tolerante com pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 7,1 a 13,0; MS = cultivar moderadamente suscetível com pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 13,1 a 19,0; S = cultivar de soja suscetível à toxicidade de Al^{3+} com a pontuação média do ranqueamento (\bar{R}) de 19,1 a 25.

Diante do exposto, as cultivares de soja TMG 7061 IPRO, HO Paranaíba IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7067 IPRO e NS 7505 IPRO foram identificadas como as mais tolerantes ao estresse por Al^{3+} , ao passo que as cultivares ST 777 IPRO, RK 8115 IPRO e RK 8317 IPRO foram classificadas como as mais suscetíveis à toxicidade por Al^{3+} (Figura 2).

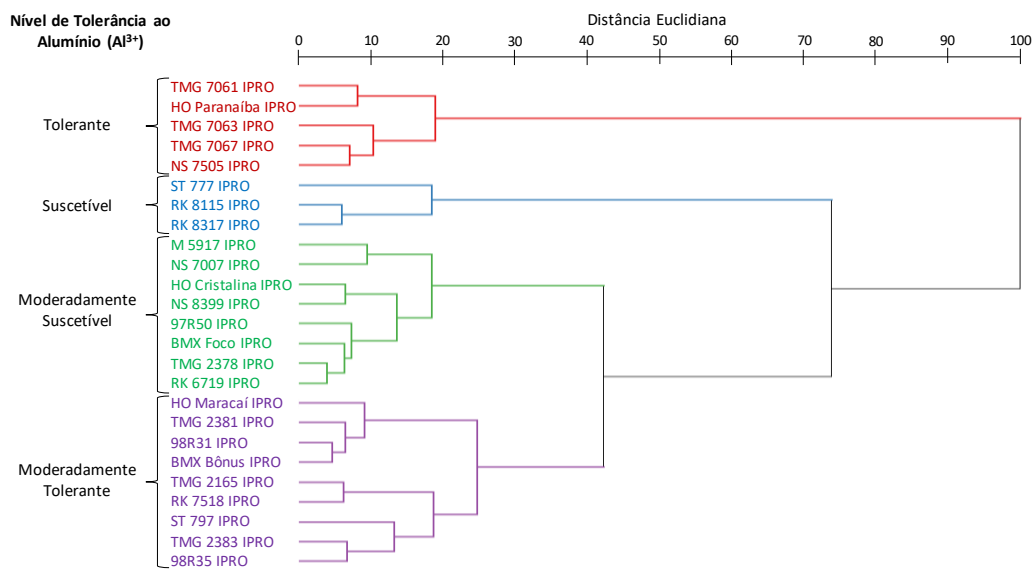


Figura 2. Dendrograma da análise de agrupamento hierárquico das 25 cultivares de soja com base na distância Euclidiana e no método de variância mínima de Ward, utilizando os índices de tolerância à toxicidade por Al^{3+} (ITE-G, ITE-CPA, ITE-CR, ITE-CT, ITE-MSPA, ITE-MSR e ITE-MST).

O primeiro componente principal explica 73,36% da variação total (Figura 3). De acordo com o valor dos autovetores, os pesos das variáveis ITE-CR (-0,611), ITE-CT (-0,498), ITE-CPA (-0,391), ITE-MSR (-0,309), ITE-G (-0,224), ITE-MST (-0,216) e ITE-MSPA (-0,184) são negativamente altos para esse componente principal. Isso indica que quanto maior o valor desses índices de tolerância, menor é o escore do primeiro componente principal. Portanto, quanto maior a nota desses índices de tolerância de estresse, menor é o escore do primeiro componente principal, e, então, a cultivar pode ser considerada como tolerante ao estresse por Al^{3+} .

O primeiro componente principal pode ser interpretado como um índice de desempenho global da tolerância das cultivares de soja à toxicidade por Al^{3+} . Como os pesos são negativos, quanto maior for os índices de tolerância ao estresse, menor é o valor desse componente e melhor é o índice global de tolerância da cultivar de soja. Portanto, escore mais baixo no primeiro componente principal indica que o índice de tolerância da cultivar é melhor. Para as cultivares de soja TMG 7061 IPRO, HO Paranaíba IPRO, TMG 7063 IPRO e NS 7505 IPRO se registraram os melhores índices de desempenho global e, portanto, essas cultivares foram classificadas como tolerantes ao estresse por Al^{3+} . Por sua vez, os piores índices de desempenho global foram registrados para as cultivares de soja RK 8317 IPRO, RK 8115 IPRO, ST 777 IPRO e NS 7007 IPRO, e essas cultivares foram classificadas como suscetíveis ao Al^{3+} .

O menor escore do primeiro componente principal obtido para o ITE-CR indica que os índices de tolerância ao estresse por Al^{3+} , baseado no comprimento das raízes, são mais sensíveis e adequados para identificar e separar os cultivares de soja quanto à tolerância ao Al^{3+} .

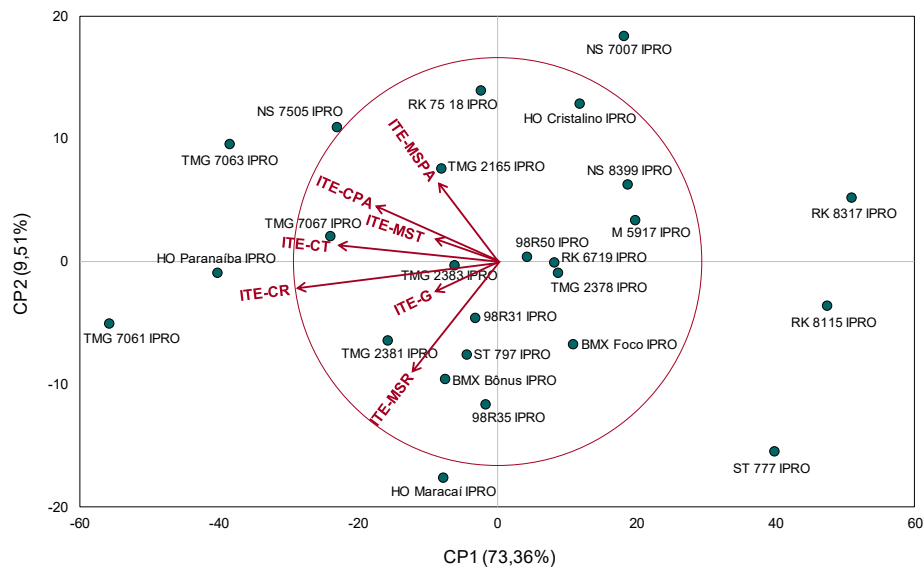


Figura 3. Diagrama *biplot* com base nos primeiro e segundo componentes principais dos índices de tolerância da toxicidade por alumínio (ITE-G, ITE-CPA, ITE-CR, ITE-CT, ITE-MSPA, ITE-MSR e ITE-MST).

Em síntese, os três métodos de agrupamento utilizados (método do ranqueamento, análise de agrupamento hierárquico e análise de componente principal) agruparam as cultivares de soja TMG 7061 IPRO, TMG 7063 IPRO, HO Paranaíba IPRO e NS 7505 IPRO como tolerantes ao Al^{3+} (Tabela 2, Figuras 2 e 3), ao passo que a cultivar TMG 7067 IPRO foi classificada como tolerante ao estresse por Al^{3+} pelos métodos do ranqueamento e análise de agrupamento hierárquico (Tabela 2 e Figura 2). Portanto, são as cultivares mais indicadas para serem recomendadas para o cultivo em solos ácidos.

Os métodos do ranqueamento, análise de agrupamento hierárquico e análise dos componentes principais agruparam, respectivamente, 4, 3 e 3 cultivares de soja como suscetíveis ao estresse por Al^{3+} (Tabela 2, Figuras 2 e 3). As cultivares de soja RK 8115 IPRO, RK 8317 IPRO e ST 777 foram classificadas como suscetíveis ao estresse por Al^{3+} pelos três métodos utilizados. Por sua vez, o método do ranqueamento também classificou a cultivar NS 8399 IPRO como suscetível ao estresse por Al^{3+} (Tabela 2). Portanto, quando a semeadura da soja for realizada em solos ácidos com alta concentração de Al^{3+} na solução do solo essas cultivares de não devem ser recomendadas para a semeadura.

4 CONCLUSÃO

As cultivares de soja TMG 7061 IPRO, TMG 7063 IPRO, TMG 7067, HO Paranaíba IPRO e NS 7505 IPRO são as cultivares mais indicadas para serem cultivadas em solos ácidos por terem maior tolerância à toxicidade por alumínio, e as cultivares RK 815 IPRO, RK 8317 IPRO e ST 777 IPRO são classificadas como suscetíveis à toxicidade do alumínio, e não devem ser recomendadas para o cultivo em solos ácidos.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA DE FREITAS, L.; MAXIMINO FERNANDES, D.; MENDONÇA MAIA, S. C.; GUSTAVO PIVETTA, L.; DUTRA ZANOTTO, M. Tolerância de linhagens de mamona a alumínio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, n. 3, p. 299-305, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632018v4852425>. Acesso em: 25 jan. 2020.
- BOJÓRQUEZ-QUINTAL, E.; ESCALANTE-MAGAÑA, C.; ECHEVARRÍA-MACHADO, I.; MARTÍNEZ-ESTÉVEZ, M. Aluminum, a friend or foe of higher plants in acid soils. **Frontiers in Plant Science**, 8, e1767, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01767>. Acesso em: 25 jan. 2020.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília: Mapa/ACS, 2009. 399p.
- FARSHADFAR, E.; POURSIABIDI, M. M.; ABOOGHADAREH, A. R. P. Repeatability of drought tolerance indices in bread wheat genotypes. **International Journal of Agriculture and Crop Sciences**, v. 4, n. 13, p. 891-903, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/257208488_Repeatability_of_drought_tolerance_indices_in_bread_wheat_genotypes. Acesso em: 22 jan. 2020.
- GIAVENO, G. D.; MIRANDA-FILHO, J. B.; FURLANI, P. R. Inheritance of aluminum tolerance in maize (*Zea mays* L.). **Journal of Genetics & Breeding**, v. 55, n. 1, p. 51-55, 2001. Disponível em: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=IT2002062631>. Acesso em: 21 jan. 2020.
- KOPITTKE, P. M.; MOORE, K. L.; LOMBI, E.; GIANONCELLI, A.; FERGUSON, B. J.; BLAMEY, F. P. C.; MENZIES, N. W.; NICHOLSON, T. M.; MCKENNA, B. A.; WANG, P.; GRESSHOFF, P. M.; KOUROUSIAS, G.; WEBB, R. I.; GREEN, K.; TOLLENAERE, A. Identification of the primary lesion of toxic aluminum in plant roots. **Plant Physiology**, v. 167, n. 4, p. 1402-1411, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.114.253229>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- MENOSSO, O. G.; COSTA, J. A.; ANGHINONI, I.; BOHNEN, H. Tolerância de genótipos de soja ao alumínio em solução. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 11, p. 2157-2166, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2000001100006>. Acesso em: 25 jan. 2020.
- MOHAN, V. M.; ACHARY, V.; PARINANDI, N.; PANDA, B. Calcium channel blockers protect against aluminium-induced DNA damage and block adaptive response to genotoxic stress in plant cells. **Mutation Research**, v. 751, n. 2, p. 130-138, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2012.12.008>. Acesso em: 21 jan. 2020.
- NAGHAVI, M. R.; POUR-ABOUGHADAREH, A.; KHALILI, M. Evaluation of drought tolerance indices for screening some of corn (*Zea mays* L.) cultivars under environmental conditions. **Notulae Scientia Biologicae**, v. 5, n. 3, p. 388-393, 2013. DOI: <https://doi.org/10.15835/nsb539049>. Acesso em: 20 jan. 2020.
- PARTHEEBAN, C.; CHANDRASEKHAR, C. N.; JEYAKUMAR, P.; RAVIKESAVAN, R.; GNANAM, R. Effect of PEG induced drought stress on seed germination and seedling

characters of maize (*Zea mays* L.) genotypes. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 6, n. 5, p. 1095-1104, 2017. DOI:

<https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.605.119>. Acesso em: 20 jan. 2020.

SADE, H.; MERIGA, B.; SURAPU, V.; GADI, J.; SUNITA, M. S. L.; SURAVAJHALA, P.; KAVI-KISHOR, P. B. Toxicity and tolerance of aluminium in plants: tailoring plants to suit to acid soils. **Biometals**, v. 29, p. 187-210, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10534-016-9910-z>. Acesso em: 23 jan. 2020.

SANTOS, C. V.; SILVA, N. S.; MAGALHÃES, J. V.; SCHAFFERT, R. E.; MENEZES, C. M. Desempenho de híbridos de sorgo granífero em solos com baixa e alta saturação por alumínio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 48, n. 1, p. 12-18, 2018. DOI:

<https://doi.org/10.1590/1983-40632018v4848851>. Acesso em: 22 jan. 2020.

STEINER, F.; ZOZ, T.; PINTO-JÚNIOR, A. S.; CASTAGNARA, D. D.; DRANSKI, J. A. L. Effects of aluminum on plant growth and nutrient uptake in young physic nut plants. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 5, p. 1779-1788, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2012v33n5p1779>. Acesso em: 23 jan. 2020.

TAHARA, K.; HASHIDA, K.; OTSUKA, Y.; OHARA, S.; KOJIMA, K.; SHINOHARA, K. Identification of a Hydrolyzable Tannin, Oenothien B, as an aluminum-detoxifying ligand in a highly aluminum-resistant tree, *Eucalyptus camaldulensis*. **Plant Physiology**, v. 164, n. 2, p. 683-693, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1104/pp.113.222885>. Acesso em: 22 jan. 2020.