

Tolerância de genótipos de cereais de inverno ao alumínio em cultivo hidropônico e em campo

Roberto Portaluppi⁽¹⁾, Sandra Patussi Brammer⁽²⁾, Jurandir Vieira de Magalhães⁽³⁾, Cibele Tesser da Costa⁽²⁾, Eduardo Caierão⁽²⁾, Alfredo do Nascimento Junior⁽²⁾ e José Pereira da Silva Junior⁽²⁾

⁽¹⁾Universidade de Passo Fundo, Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Rodovia BR 285, Km 291, CEP 99001-970 Passo Fundo, RS. E-mail: roberto.luppi@bol.com.br ⁽²⁾Embrapa Trigo, Rodovia BR 285, Km 294, CEP 99001-970 Passo Fundo, RS. E-mail: sandra@cnpt.embrapa.br, cibeletc@yahoo.com.br, caierao@cnpt.embrapa.br, alfredo@cnpt.embrapa.br, jpereira@cnpt.embrapa.br ⁽³⁾Embrapa Milho e Sorgo, Rodovia MG 424, Km 45, CEP 35701-970 Sete Lagoas, MG. E-mail: jurandir@cnpm.embrapa.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi determinar a capacidade de crescimento radicular de 75 genótipos de cereais de inverno em cultivo hidropônico, em diferentes concentrações de alumínio, avaliar a relação entre o grau de tolerância/sensibilidade, em solução hidropônica, e a resistência/suscetibilidade ao crestamento em campo. Os cereais cevada, triticale, centeio, trigo e *Aegilops tauschii* foram avaliados em hidroponia, com concentrações de Al^{3+} que variaram entre 0,5 (cevada), 2 e 6 (triticale), 6 e 10 (centeio) e 2 mg L⁻¹ (trigo e *Ae. tauschii*). Os delineamentos experimentais foram inteiramente casualizados. Em campo, foram avaliados os mesmos genótipos, exceto *Ae. tauschii*, em solo com pH 4,4 e 4,85, corrigido a 1/2 e 1/4 do índice SMP. Utilizou-se uma escala de notas com variação de escores de 0,5 (altamente resistente) a 5 (altamente suscetível). Foi observada elevada relação entre a tolerância ao alumínio em hidroponia e a resistência ao crestamento em campo. A seleção de cereais em meio hidropônico pode ser considerada eficiente como ferramenta de apoio aos programas de melhoramento genético para essa característica.

Termos para indexação: *Hordeum vulgare*, *Secale cereale*, *Triticum aestivum*, crestamento, resistência, suscetibilidade, toxicidade.

Tolerance of small grain cereal genotypes to aluminum on hydroponic and field cultivation

Abstract – The objective of this work was to determine the root growth capacity of 75 genotypes of small grain cereals in hydroponic culture under different aluminum concentrations, and to assess the relationship between the level of tolerance/sensitivity in hydroponic solution and the resistance/susceptibility index in the field. Barley, triticale, rye, wheat and *Aegilops tauschii* were evaluated in hydroponics, with Al^{3+} concentrations that varied between 0.5 (barley), 2 and 6 (triticale), 6 and 10 (rye) and 2 mg L⁻¹ (wheat and *Ae. tauschii*). The experiments' designs were completely randomized. In the field trial, the same genotypes were assessed, except for *Ae. tauschii*, in soil with pH 4.4 and 4.85 adjusted to 1/2 and 1/4 of the SMP index. A score scale ranging from 0.5 (highly resistant) to 5 (highly susceptible) was used. A strong relationship between aluminum tolerance in hydroponics and resistance to blight in the field was observed. Cereals selection in hydroponic medium can be considered an efficient tool to support breeding programs for this characteristic.

Index terms: *Hordeum vulgare*, *Secale cereale*, *Triticum aestivum*, blight, resistance, sensitivity, toxicity.

Introdução

A toxicidade do alumínio, nos solos ácidos, é um dos fatores que mais limitam a produção agropecuária. No Brasil, 68% dos solos têm elevada acidez, toxicidade de alumínio e baixa disponibilidade de fósforo (Guimarães, 2005). Cultivares de cereais de inverno suscetíveis ao Al^{3+} apresentam, como sintomas, raízes atrofiadas, folhas amareladas, formação de espigas rudimentares, com poucas ou até mesmo sem espiguetas, o que é conhecido como crestamento.

A combinação de métodos de análise como o cultivo hidropônico e o cultivo em campo pode ser essencial para identificar genótipos que têm múltiplos mecanismos de tolerância a essa característica, e permite avaliar a redução do crescimento radicular dos cereais de inverno, provocada pelo alumínio tóxico na forma do cátion Al^{3+} (Narasimhamoorthy et al., 2007). O cultivo hidropônico permite a medição das raízes de modo mais preciso que o cultivo em solo, pois as estruturas sofrem menos danos físicos ao

serem retiradas da solução nutritiva. A hidroponia é um método de caracterização específica da toxicidade do alumínio, enquanto o solo apresenta outros fatores potenciais ligados à toxicidade, como os teores elevados de ferro e manganês e a deficiência de fósforo e de molibdênio. Em experimentos em campo, o pH e os teores dos elementos químicos do solo variam constantemente conforme as variações climáticas, e a toxicidade ao alumínio não é o único fator limitante. Além disso, as raízes, que são a parte mais afetada pelo alumínio, não são facilmente observadas. Nos métodos hidropônicos, essas variáveis e também os estudos genéticos e a caracterização de germoplasma específico para a tolerância ao alumínio são passíveis de serem controladas (Camargo et al., 2006; Voss et al., 2006).

O objetivo deste trabalho foi determinar a capacidade de crescimento radicular de genótipos de cevada, triticale, centeio, trigo e *Aegilops tauschii* cultivados em hidroponia, em diferentes concentrações de alumínio, e avaliar a relação entre a tolerância/sensibilidade dos genótipos em solução hidropônica com a resistência/suscetibilidade ao crescimento em campo.

Material e Métodos

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Biotecnologia e no campo experimental da Embrapa Trigo, localizado em Passo Fundo, RS, a 28°15'S, 52°24'W e a 687 m de altitude. O solo do local do experimento de campo é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico segundo Streck (2002). Foram avaliados 75 genótipos, tendo sido 14 de cevada (*Hordeum vulgare* L.); 15 de triticale (*X Triticosecale* Wittmack); 15 de centeio (*Secale cereale* L.); 16 de trigo (*Triticum aestivum* L.) e 15 de *Aegilops tauschii* (= *Triticum tauschii*), mantidos pelo Banco Ativo de Germoplasma (BAG) da Embrapa Trigo (Tabela 1). Em todos os experimentos foram usadas as cultivares de trigo Anahuac 75 (sensível ao alumínio) e IAC 5-Maringá (tolerante ao alumínio), como controles para o caráter tolerante e sensível ao íon Al^{3+} . Para o triticale, utilizaram-se as cultivares IAPAR 23-Arapoti (tolerante) e PFT 209 (sensível) como testemunhas, além dos controles de trigo. Quanto ao centeio, os genótipos BRS Serrano e 698210, reconhecidos como tolerante e moderadamente sensível, respectivamente, foram utilizados como testemunhas. Para o trigo, foram

Tabela 1. Genótipos de cevada, triticale, centeio e trigo do Banco Ativo de Germoplasma da Embrapa Trigo e seus respectivos cruzamentos utilizados para a realização dos experimentos.

Genótipo	Cruzamento
Cevada	
Antártica 04	Seleção de W-6601
PFC 7802	Binder*2/Opal//Balder/Kenia/3/Alpha
Cevada BR 1	Binder/Opal//Balder/Kenia
Harrington	Klages//Gazelle/Betzes
IPFC 20011	Seleção de Scarlet
Alpha	Manchuria/Champion of Vermont
BRS 224	Embrapa 43/PFC 9114
FM 404	Seleção de Alpha
Antártica 01	Seleção de Volla
Antártica 05	Origem desconhecida
MN 698	MN 599/MN 635
Cevada BR 1	Binder/Opal//Balder/Kenia
Cevada BR 2	FM 424/Norbert
BRS Marciana	PFC 9240/PFC 9211
FM 519	Km1/Union//Volla/3/Km2/Volla//Wisa/4/Alpha
Triticale	
Triticale BR1	M2A/CML
Embrapa 53	LT1117.62/Civet/Tatu
PFT 112	PFT 512/Guará
IPR 111	Anoas 5/Stier 13
BRS 148	Yogui/Tatu
BRS Ulisses	Erizo/Nimir
BRS 203	LT-1/Rhino
BRS Netuno	Pollmer//2*Erizo/Bull-1
PFT 209	PFT215*2/TCA 3050-89
IAPAR 23-Arapoti	CIN/CNO//BGL/3/Merino
PFT 0407	ERIZ011*2/Milman*2/Picus
PFT 0609	Embrapa 53//PFT 116/HOH-87.102-6-1
PFT 307	PFT 312/PFT 511
BRS Minotauro	Octo 92-3(PF9358/CBR1TriticaleBR4
PFT 0417	Presto//2*Tesmo-1 Mus 603/4/Ardi-1/...
Centeio	
PFS 0604	Pop. Cent. 981
PFS 0603	Pop. Cent. Desc.
PFS 0501	Pop. 8011
Centeio BR 1	Seleção de pop. coloniais brasileiras
IPR 89	Seleção de pop. Australianas
BRS Serrano	Centeio Garcia/Centeio Bagé
698210	Pl. Rfco. no AI+03 (Cd)
PFS 0504	Pop. Estefano Schneider
698206	Pl. Rfco. no AI+03 (Cd)
698207	Pl. Rfco. no AI+03 (Cd)
PFS 0607	Sel. Pl. Bx. Color escura
PFS 0606	Sel. Pl. Bx. Color clara
PFS 0605	Sel. Pl. Sel Al^{3+} + Rfco
PFS 0502	Pop. Andreas Kreuzcha
PFS 0601	Sel. 3pl.
Trigo	
BRS Guamirim	Embrapa 27/Buck Nandu//PF 93159
BRS 194	(2000) CEP14/BR23//CEP17
Jesuíta	Polyssu/ Alfredo Chaves 3-21
CD 104	PFAU SIB/ Iapar 17
IPR 85	Iapar 30/BR 18
PF 844005	<i>T. durum</i> Hércules, NE 22912/ <i>Ae. squarrosa</i> , NE 20211 –C
Anahuac 75	II 12300//Lerma Rojo64/8156/3/Norteno 67
IAC 5-Maringá	Frontana/ Kenya 54//PG1
BRS Buriti	Embrapa 27/Klein Orion
IPR 87	IOC 878/ Iapar 17
BRS Angico	PF 87107/2*IAC 13
BRS 229	Embrapa 27*3//BR35/Buck Poncho
BRS Guabiju	PF 86743/BR 23
BRS 209	Iupateco 73/Embrapa 16
BRS Tarumã	Century/BR 35

utilizadas as cultivares IAC 5-Maringá (tolerante) e Anahuac 75 (sensível), como controles e testemunhas do experimento. Além dos testes com os genótipos de trigo, para identificar novas fontes de tolerância, o mesmo estudo foi feito com a espécie *Ae. tauschii* e, do mesmo modo que o trigo, foram utilizadas as cultivares de trigo IAC 5-Maringá (tolerante) e Anahuac 75 (sensível) como controle e como testemunha.

As sementes foram previamente desinfestadas com hipoclorito de sódio a 2%, por 4 min, seguida de seis enxágues com água destilada e deionizada. Após, foram semeadas em papel germitest e mantidas em câmara de crescimento com temperatura de 4°C, por 24 horas, seguido por um período de 36 a 40 horas, com temperatura de 19–21°C. Para os genótipos de *Ae. tauschii*, as sementes foram mantidas, primeiramente, em temperatura de 2°C, por 26 dias, a fim de promover a quebra de dormência. De 15 a 30 sementes germinadas, foram selecionadas oito de cada genótipo, com tamanho similar e com raízes de 0,5 cm de comprimento, que foram transferidas para uma tela de plástico com dois milímetros de malha, onde foram mantidas em flutuação, dentro de bandejas de plástico. As raízes foram inseridas nos orifícios da tela, acrescentando-se 2.000 mL de solução nutritiva.

Inicialmente foram preparadas soluções estoque individualizadas com os reagentes químicos P.A.: $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 58,80 g L⁻¹; KNO_3 , 65,70 g L⁻¹; $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 50,80 g L⁻¹; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 1,30 g L⁻¹; NH_4NO_3 , 3,20 g L⁻¹. A solução nutritiva foi preparada com a concentração e composição de 400 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de CaCl_2 ; 650 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de KNO_3 ; 250 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de MgCl_2 ; 10 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; 40 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de NH_4NO_3 (pH 4,0). Foi usado 1 mL da solução estoque de cada sal por litro de água destilada e deionizada. O pH foi corrigido para 4, com o uso de HCl. A solução estoque de alumínio foi preparada dissolvendo-se 0,894 g de AlCl_3 com água destilada, com concentração final de 1 mg mL⁻¹ de Al.

O método para a avaliação de tolerância ao alumínio em hidroponia, em todos os cereais de inverno, foi baseado em Voss et al. (2006), com adaptações. As concentrações (mg L⁻¹ de Al^{3+}) de alumínio solúvel foram alteradas conforme a espécie: cevada, 0,5; triticale, 2 e 6; centeio, 6 e 10; trigo e *Ae. tauschii*, 2. Em todos os testes foi utilizada uma câmara de crescimento com controle de temperatura (22–24°C) e de luz (24 horas). As soluções nas bandejas foram

aeradas por meio de duas cânulas de vidro, instaladas em suas laterais e conectadas a um compressor de ar. Em uma das bandejas, foi adicionado alumínio, enquanto a outra permaneceu apenas com a solução nutritiva, que serviu como grupo controle. As soluções estoques de alumínio, específicas para cada espécie, foram substituídas em 24, 48 e 72 horas. Após 96 horas de crescimento, foram medidos os comprimentos da raiz principal e da raiz secundária maior, com paquímetro digital, modelo 727, (Starret, Ohio, USA). A medida do comprimento das duas raízes maiores é considerada a mais apropriada avaliação para estudos genéticos e moleculares e fornecem uma boa separação dos genótipos tolerantes e sensíveis ao alumínio (Wang et al., 2006).

Os experimentos foram instalados em delineamento inteiramente casualizado, em que cada planta foi considerada uma repetição. Foi utilizado o Procedimento GLM do SAS (SAS Institute, 2004). Para a análise estatística, considerou-se a média da medida das raízes de cada planta. A interpretação de tolerância seguiu o método de Voss et al. (2006). Inicialmente, as plantas foram retiradas do freezer e suas raízes foram mergulhadas em água, à temperatura ambiente, a fim de promover o descongelamento. Considerou-se sensível o material semelhante à testemunha sensível; e tolerante, o material semelhante à testemunha tolerante para cada espécie. Os genótipos com crescimento radicular intermediário foram considerados moderadamente sensíveis, quando apresentavam índices numéricos de 26 a 50% maiores do que a média da testemunha sensível e moderadamente tolerante quando seus índices estavam entre 51 e 75% do valor obtido pela testemunha tolerante.

A fim de comparar a eficiência do método hidropônico aos resultados verificados nos ensaios em campo, os mesmos genótipos foram semeados no campo experimental da Embrapa Trigo. Os genótipos foram testados em área de solo caracterizado como Latossolo Vermelho distrófico típico, textura argilosa (Streck, 2002), concentrações de pH 4,4 e 4,85, disponíveis na mesma área experimental e que fazem parte de uma área conduzida para esse tipo de avaliação, que foi corrigida, respectivamente, a ½ e ¼ do índice SMP. A cultivar suscetível ao crestamento, trigo Anahuac 75, serviu como controle dos experimentos.

A semeadura dos genótipos de cevada, de triticale, de centeio e de trigo foi feita em agosto de 2007, com 60

sementes por metro linear, as quais foram previamente multiplicadas em 2006. As parcelas foram constituídas por cinco linhas de 1 m de comprimento com 20 cm de espaçamento entre as linhas, sem repetições. Para a espécie *Ae. tauschii* não foi feito cultivo e análise em campo, uma vez que essa espécie não apresenta tipo agrônomico adequado para plantio. As doenças das plantas nas parcelas foram controladas pela aplicação dos fungicidas Piraclostrobina + Epoxiconazole, na dosagem de 1.333 ± 50 g i.a. ha⁻¹, nos estádios de afilhamento e espigamento. O controle de plantas daninhas foi feito por meio de capina manual.

A avaliação do experimento no campo foi realizada em novembro de 2007, durante o ciclo vegetativo e seguiu o método de Sousa (1998), que classifica os genótipos com escala de notas de 0 a 5 em relação a tolerância/sensibilidade ao alumínio, em que: altamente resistente (0,50–0,80); resistente (0,81–1,50); moderadamente resistente (1,51–2,50), moderadamente suscetível (2,51–3,50); suscetível (3,51–4,50) e altamente suscetível (4,51–5,0). O critério dos escores utilizado foi: 0,5, altamente resistente; 1, resistente, plantas normais e vigorosas com perfilho abundante; 2, moderadamente resistente, plantas normais, levemente menos vigorosas e com menos perfilhos do que o grupo anterior; 3, moderadamente suscetíveis, desenvolvimento das plantas intermediário; 4, suscetíveis, plantas deficientes, sem perfilho; e 5, altamente suscetíveis, plantas mortas ou com desenvolvimento muito deficiente.

A análise de variância para genótipo e concentração de Alumínio foram efetuadas pelo procedimento GLM do

Tabela 2. Classificação quanto à tolerância e à sensibilidade de genótipos de cevada ao Al³⁺, definida pelo comprimento da raiz de plantas em cultivo hidropônico em solução de Al³⁺, que tiveram como controle as cultivares de trigo Anahuac 75 (sensível) e IAC 5-Maringá (tolerante).

Genótipo	Comprimento (mm)		Classificação ⁽¹⁾
	0 ⁽²⁾	0,5 ⁽²⁾	
Antártica 04	31,21	19,71	MT
PFC 7802	29,86	26,93	T
Cevada BR 1	38,64	25,40	MT
Harrington	31,89	16,00	MS
Anahuac 75	32,31	14,36	S
IAC 5-Maringá	53,43	62,71	T
IPFC 20011	32,07	20,64	MT
Alpha	22,34	11,71	MS
BRS 224	26,10	15,85	MT
FM 404	21,21	16,33	MT
Antártica 01	23,39	27,53	T

⁽¹⁾T, tolerante; S, sensível; MT, moderadamente tolerante; MS, moderadamente sensível. ⁽²⁾Concentração de Al³⁺ em mg L⁻¹.

FAS (SAS Institute 2004) e as diferenças determinadas pelo teste de Fukey a 5% de probabilidade.

Resultados e Discussão

Dos 14 genótipos de cevada testados, as cultivares PFC 7802 e Antártica 01 foram incluídas no grupo dos genótipos tolerantes ao alumínio trocável (Tabela 2). As cultivares Harrington e Alpha foram incluídas no grupo dos moderadamente sensíveis. Os genótipos MN 698, Cevada BR2, BRS Marciana, FM 519 e Antártica 05 apresentaram baixo índice de germinação, o que inviabilizou a sua avaliação. As cultivares Harrington e Alpha não diferiram ($p = 0,05$) da cultivar de trigo Anahuac 75 sensível ao alumínio, e 69,5% da variação observada foi explicada com o modelo ajustado. Esses resultados podem ser explicados em razão de que a cevada é considerada o cereal mais sensível à toxicidade do alumínio. Sua tolerância ao alumínio é controlada por um loco simples, de um gene localizado no cromossomo 4H, e sua base genética para a tolerância é muito pequena (Wang et al., 2006).

Quanto ao triticales, no grupo dos tolerantes, situaram-se as cultivares IAPAR 23-Arapoti, Embrapa 53, PFT 112, IPR 111, BRS 148, BRS Ulisses, PFT 0407, PFT 0609

Tabela 3. Classificação quanto à tolerância e à sensibilidade de genótipos de triticales ao Al³⁺, definida pelo comprimento da raiz de plantas em cultivo hidropônico em solução de Al³⁺, que tiveram como controle as cultivares de trigo Anahuac 75 (sensível) e IAC 5-Maringá (tolerante), e como testemunhas as cultivares de triticales PFT 209 (sensível) e IAPAR 23-Arapoti (tolerante).

Genótipo	Comprimento (mm)		Classificação ⁽¹⁾
	0 ⁽²⁾	6 ⁽²⁾	
Triticales BR1	32,02	12,67	S
Embrapa 53	32,98	22,49	T
PFT 112	36,41	21,48	T
IPR 111	35,42	23,55	T
BRS 148	32,06	23,29	T
BRS Ulisses	42,88	27,85	T
IAC 5-Maringá	67,21	26,50	T
Anahuac 75	52,23	9,14	S
BRS 203	31,15	14,39	MT
BRS Netuno	35,88	16,27	MT
PFT 209	39,47	13,94	S
IAPAR 23-Arapoti	33,89	23,04	T
PFT 0407	39,20	21,26	T
PFT 0609	34,84	19,04	T
PFT 307	39,02	17,75	MT
BRS Minotauro	32,99	24,33	T

⁽¹⁾T, tolerante; S, sensível; MT, moderadamente tolerante. ⁽²⁾Concentração de Al³⁺ em mg L⁻¹.

e BRS Minotauro, e no dos sensíveis, PFT 209 e Triticale BR1 (Tabela 3). A linhagem PFT 0417 apresentou baixo índice de germinação, o que impossibilitou a sua avaliação. Os genótipos tolerantes e moderadamente tolerantes não diferiram ($p = 0,05$) do IAPAR 23-Arapoti. Com o modelo estatístico ajustado, 79,5% da variação observada foi explicada.

O triticale é um híbrido de trigo e centeio, o qual apresenta diferentes níveis de tolerância ao Al^{3+} . Essa tolerância, advinda principalmente do parental centeio, é muito importante para os programas de melhoramento dessa cultura (Aniol & Gustafson, 1984). Provavelmente, seja esta a explicação dos resultados obtidos nesta avaliação.

Os genótipos de centeio PFS 0501, IPR 89, PFS 0502, PFS 0504, PFS 0605, PFS 0606, PFS 0607, 698206 e 698207 foram incluídos no grupo dos tolerantes e o PFS 0604, moderadamente sensível (Tabela 4). Para essa espécie, 88,9% da variação observada foi explicada com o modelo ajustado.

Em estudo comparativo realizado entre sete populações de centeio, cultivadas há vários séculos por agricultores do norte de Portugal e 11 cultivares

Tabela 4. Classificação quanto à tolerância e à sensibilidade de genótipos de centeio ao Al^{3+} , definida pelo comprimento da raiz de plantas em cultivo hidropônico em solução de Al^{3+} , que tiveram como controle as cultivares de trigo Anahuac 75 (sensível) e IAC 5-Maringá (tolerante) e, como testemunhas, as cultivares de centeio BRS Serrano (tolerante) e 698210 (sensível).

Genótipo	Comprimento (mm)		Classificação ⁽¹⁾
	0 ⁽²⁾	10 ⁽²⁾	
PFS 0604	59,99	15,63	MS
PFS 0603	64,96	23,53	MT
PFS 0501	63,24	29,40	T
Centeio BR 1	68,81	26,33	MT
IPR 89	76,36	34,42	T
Anahuac 75	34,12	4,96	S
IAC 5-Maringá	64,74	16,89	T
BRS Serrano	61,75	30,79	T
698210	49,06	12,57	MS
PFS 0504	76,36	29,80	T
698206	29,80	22,48	T
698207	61,03	23,63	T
PFS 0607	52,29	23,72	T
PFS 0606	56,51	22,87	T
PFS 0605	66,35	26,28	T
PFS 0502	70,92	33,40	T
PFS 0601	72,39	20,98	MT

⁽¹⁾T, tolerante; S, sensível; MT, moderadamente tolerante; MS, moderadamente sensível. ⁽²⁾Concentração de Al^{3+} em $mg L^{-1}$.

de centeio do norte da Europa, Pinto-Carnide & Guedes-Pinto (2000) verificaram que a tolerância ao alumínio nos dois grupos foi muito distinta. As populações de centeio português, com grande variabilidade genética, revelaram ser mais tolerantes que as demais cultivares europeias, em concentrações de 30 e 40 $mg L^{-1}$ de Al^{3+} . Além disso, essa diferença é explicada pelo fato de ter havido um processo evolutivo de adaptação dessas populações às condições locais de acidez do solo, comuns em Portugal (Pinto-Carnide & Guedes-Pinto, 2000).

No presente trabalho, não foi constatado nenhum genótipo sensível à concentração de 10 $mg L^{-1}$ de Al^{3+} , o que corrobora os dados obtidos no trabalho anteriormente citado. Assim sendo, o germoplasma do centeio apresenta excelente potencial de genes para introgressão no trigo ou inclusão no triticale, para se obter tolerância ao alumínio (Pinto-Carnide & Guedes-Pinto, 2000).

Quanto ao trigo, os genótipos PF 964004 e Toropi apresentaram baixo índice de germinação das sementes, o que inviabilizou a realização da avaliação. No grupo dos tolerantes, foram incluídos os genótipos IPR 85, BRS 194, BRS Angico, BRS Buriti, BRS Guabiju e BRS Guamirim (Tabela 5). O genótipo BRS 209 foi classificado como moderadamente sensível e o CD 104, como sensível, e não diferiram ($p = 0,05$) do IAC

Tabela 5. Classificação quanto à tolerância e à sensibilidade de genótipos de trigo ao Al^{3+} , definida pelo comprimento da raiz de plantas em cultivo hidropônico em solução de Al^{3+} , que tiveram como controle e testemunha as cultivares de trigo Anahuac 75 (sensível) e IAC 5-Maringá (tolerante).

Genótipo	Comprimento (mm)		Classificação ⁽¹⁾
	0 ⁽²⁾	2 ⁽²⁾	
BRS Guamirim	71,41	47,25	T
BRS 194	47,24	31,05	T
Jesuíta	43,83	22,83	MT
CD 104	56,11	11,46	S
IPR 85	57,11	39,05	T
PF 844005	31,24	12,64	MT
Anahuac 75	61,89	13,86	S
IAC 5 Maringá	55,25	38,85	T
BRS Buriti	53,97	31,35	T
IPR 87	48,93	20,30	MT
BRS Angico	60,83	32,48	T
BRS 229	51,55	26,14	MT
BRS Guabiju	49,43	34,88	T
BRS 209	45,81	13,09	MS

⁽¹⁾T, tolerante; S, sensível; MT, moderadamente tolerante; MS, moderadamente sensível. ⁽²⁾Concentração de Al^{3+} em $mg L^{-1}$.

5-Maringá. Neste caso, 86,7% da variação observada foi explicada com o modelo ajustado.

Bertan et al. (2006) verificaram, por meio da técnica de hidroponia, diferenças entre 23 genótipos de trigo e variabilidade genética para a tolerância ao alumínio. Isso possibilitou aos autores a identificação dos melhores genótipos para cruzamentos e a obtenção de progênes superiores para tolerância ao alumínio em programas de melhoramento, critério esse empregado por diversos melhoristas (Berzonsky & Kimber, 1986; Camargo et al., 1998, 2006).

Os genótipos de *Ae. tauschii* NE 20206-C e NE 20202-A foram incluídos no grupo dos tolerantes e os genótipos NE 20215-Y, RL 5776 e RL 5795 foram incluídos no grupo dos moderadamente sensíveis e os demais genótipos incluídos no grupo do moderadamente tolerantes (Tabela 6). Nessas análises, 81,6% da variação observada foi explicada com o modelo ajustado.

Para esta espécie, pouquíssimos estudos são relatados. Destaca-se apenas o de Berzonsky & Kimber (1986), que testaram concentrações de 12 mg L⁻¹ de alumínio em 83 acessos de *Ae. tauschii*, verificaram que nenhum dos acessos foi tolerante à toxicidade provocada pelo

Tabela 6. Classificação quanto à tolerância e à sensibilidade de acessos de *Aegilops tauschii* ao Al³⁺, definida pelo comprimento da raiz de plantas em cultivo hidropônico em solução de Al³⁺, que tiveram como controle as cultivares de trigo Anahuac 75 (sensível) e IAC 5-Maringá (tolerante).

Genótipo	Comprimento (mm)		Classificação ⁽¹⁾
	0 ⁽²⁾	2 ⁽²⁾	
NE 20238-X	19,69	10,36	MT
NE 20215-Y	24,52	8,59	MS
RL 5786	22,47	9,15	MT
NE 20234-T	27,11	9,68	MT
NE 20064-A	21,92	8,04	MT
NE 20195-C	23,74	10,29	MT
NE 20206-C	22,95	14,14	T
Anahuac 75	44,05	7,12	S
IAC 5-Maringá	55,25	38,85	T
NE 2029-B	24,19	11,16	MT
NE 201196-B	30,42	12,25	MT
NE 201165-Y	18,35	7,44	MT
RL 5776	25,63	8,77	MS
NE 20207-Y	25,94	10,06	MT
NE 20202-A	16,22	9,65	T
NE 20223-A	28,98	13,93	MT
RL 5795	27,31	8,90	MS

⁽¹⁾T, tolerante; S, sensível; MT, moderadamente tolerante; MS, moderadamente sensível. ⁽²⁾Concentração de Al³⁺ em mg L⁻¹.

Tabela 7. Classificação quanto à resistência e à sensibilidade dos genótipos de cevada, de triticale, de centeio e de trigo, em condições de campo, em solo sem correção e solo corrigido em ¼ do índice SMP.

Genótipo	Sem correção	Corrigido em ¼	Classificação ⁽¹⁾
Cevada			
Antártica 04	4,0	4,0	S
MN 698	4,0	3,5	MS
IPFC 20011	4,5	3,5	MS
Cevada BR 2	3,5	3,0	MS
BRS Marciana	4,5	2,5	MR
Alpha	4,0	3,5	MS
BRS 224	3,0	2,0	MR
FM 404	4,0	2,5	MR
Antártica 01	4,0	3,0	MS
FM 519	4,0	4,0	S
PFC 7802	4,0	4,0	S
Antártica 05	4,5	4,0	S
Cevada BR 1	4,0	3,0	MS
Harrington	4,0	3,5	MS
Triticale			
PFT 209	4,0	3,0	MS
BRS 203	4,0	3,5	MS
BRS Netuno	4,0	3,5	MS
IAPAR 23-Arapoti	3,0	0,5	AR
PFT 0407	4,0	2,5	MR
PFT 0609	3,0	2,0	MR
PFT 307	4,0	2,0	MR
BRS Minotauro	3,0	2,5	MR
PFT 0417	5,0	3,0	MS
Triticale BR 1	3,0	4,0	S
Embrapa 53	3,0	1,5	R
PFT 112	4,0	1,0	R
IPR 111	4,0	1,0	R
BRS 148	3,0	3,0	MS
BRS Ulisses	3,0	3,0	MS
Centeio			
698210	4,0	2,0	MR
PFS 0504	1,0	1,0	R
698206	5,0	2,0	MR
698207	4,0	2,0	MR
PFS 0607	3,0	1,0	R
PFS 0606	2,0	0,5	AR
PFS 0605	2,0	1,0	R
PFS 0502	2,0	0,5	AR
PFS 0601	0,5	0,5	AR
PFS 0604	1,0	1,0	R
PFS 0603	2,0	1,0	R
PF 0501	2,0	1,0	R
Centeio BR 1	2,0	0,5	AR
BRS Serrano	2,0	0,5	AR
IPR 89	3,0	3,0	MS
Trigo			
Anahuac 75	5,0	4,0	S
BRS Buriti	4,0	3,0	MS
IPR 87	4,5	4,0	S
BRS Angico	4,0	3,0	MS
BRS 229	4,0	2,0	MR
BRS Guabiju	5,0	3,0	MS
BRS 209	4,5	3,0	MS
Toropi	4,0	1,0	R
BRS Guamirim	5,0	2,0	MR
BRS 194	4,5	1,0	R
Jesuíta	4,5	2,0	MR
CD 104	5,0	4,0	S
IAC 5-Maringá	3,0	2,0	MR
IPR 85	4,5	3,0	MS
PF 844005	5,0	5,0	S
BRS Tarumã	4,5	3,0	MS

⁽¹⁾AR, altamente resistente (0,50–0,80); R, resistente (0,81–1,50); MR, moderadamente resistente (1,51–2,50); MS, moderadamente suscetível (2,51–3,50); S, suscetível (3,51–4,50); AS, altamente suscetível (4,51–5,0).

alumínio, o que provavelmente tenha ocorrido em razão da elevada concentração testada. *Ae. tauschii* é o doador do genoma “D” de *T. aestivum* e essa última espécie já apresenta sintomas de sensibilidade a 2 mg L⁻¹; concentrações acima desse valor certamente acarretaria maior sensibilidade por parte dos acessos.

Nos experimentos realizados em condições de campo com a cevada, nenhum dos genótipos mostrou-se resistente (Tabela 7). Quatro cultivares (44,4%) apresentaram resultados semelhantes em campo e em hidroponia: Alpha, BRS 224, FM 404 e Harrington. As outras cinco (55,6%) apresentaram resultados contraditórios: em cultivo hidropônico, mostraram ser tolerantes ou moderadamente tolerantes; e, em campo, suscetíveis ou moderadamente suscetíveis. Como no experimento em campo, os genótipos ficam sujeitos a muitas outras variáveis – e não somente à concentração de alumínio – que podem ter influenciado o comportamento desses genótipos, embora essa espécie seja descrita como altamente suscetível ao alumínio (Aniol & Gustafson, 1984).

Quanto à resposta dos genótipos de triticale nos dois experimentos, oito cultivares (57,1%) obtiveram avaliações idênticas em cultivo hidropônico e ensaio a campo: BRS 203, BRS Netuno, IAPAR 23-Arapoti, PFT 307, Triticale BR 1, Embrapa 53, PFT 112 e IPR 111. Outras (28,6%) apresentaram padrões semelhantes entre os índices de resistência/tolerância e suscetibilidade/sensibilidade: PFT 209, PFT 0407, PFT 0609 e BRS Minotauro. Somente duas cultivares (14,3%) apresentaram avaliações diferentes: BRS Ulisses e BRS 148.

No caso do centeio, tanto no ensaio em campo quanto no cultivo hidropônico, nenhum genótipo mostrou-se suscetível ou sensível ao Al³⁺. Quatro linhagens (26,7%) obtiveram avaliações idênticas: 698206, 698207, PFS 0601 e PFS 0604. Uma cultivar (6,6%), IPR 89, apresentou resultado diferente. Dez genótipos (66,7%) apresentaram padrão semelhante de resistência/tolerância em ambos os experimentos: 698210, PFS 0504, PFS 0607, PFS 0606, PFS 0605, PFS 0502, PFS 0603, PF 0501, Centeio BR 1 e IPR 89.

Quanto aos genótipos de trigo, comparando-se os ensaios em campo e em hidroponia, seis cultivares (42,9%) apresentaram reações idênticas: Anahuac 75, BRS Buriti, BRS Angico, BRS 229, BRS 194 e CD 104. Cinco (35,7%) apresentaram reação semelhante de resistência/tolerância em ambos os experimentos:

IPR 87, BRS 209, BRS Guamirim, IAC 5-Maringá e PF 844005; e três cultivares (21,4%) apresentaram resultados diferentes: BRS Guabiju, Jesuíta e IPR 85.

Resultados obtidos por Baier et al. (1995) em trigo apresentaram alto coeficiente de correlação entre as avaliações em cultivo hidropônico e em campo ($r = 0,71-0,85$; $p < 0,001$). Os autores concluíram que a análise hidropônica identifica níveis de tolerância ao alumínio em inúmeros genótipos, o que permite o uso deste método em programas de melhoramento para o desenvolvimento de cultivares tolerantes ao Al³⁺.

Ressalta-se ainda que as comparações foram feitas tendo-se relacionado os resultados de comprimento da raiz dos cultivos hidropônicos com as avaliações visuais fenotípicas dos ensaios em campo. Os resultados deste trabalho corroboram os obtidos por Voss et al. (2006), em que o cultivo hidropônico possibilita a realização de estudos genéticos e de caracterização de germoplasma específico para a tolerância ao alumínio.

Conclusão

1. Os genótipos de triticale, centeio e trigo apresentam elevada similaridade quanto à tolerância ao alumínio em cultivo hidropônico e ensaio em campo.
2. Há relação direta entre a tolerância/sensibilidade e resistência/suscetibilidade ao alumínio dos genótipos de trigo, cevada, triticale e centeio, em cultivo hidropônico e em campo.
3. A seleção inicial de cereais de inverno em cultivo hidropônico é uma ferramenta de apoio eficiente aos programas de melhoramento genético para tolerância ao alumínio.

Agradecimentos

Aos pesquisadores da Embrapa Trigo, Márcio Voss, pela colaboração, Euclides Minella, pela escolha dos genótipos de cevada, Márcio Nicolau, pelas análises estatísticas e ao Generation Challenge Programme (CGIAR), pelo auxílio financeiro.

Referências

- ANIOL, A.; GUSTAFSON, J.P. Chromosome location of genes-controlling aluminum tolerance in wheat, rye, and triticale. **Canadian Journal of Genetics and Cytology**, v.26, p.701-705, 1984.
- BAIER, A.C.; SOMERS, D.J.; GUSTAFSON, J.P. Aluminum tolerance in wheat: correlating hydroponic evaluations with field and soil performances. **Plant Breeding**, v.114, p.291-296, 1995.

- BERTAN, I.; CARVALHO, F.I.F. de; OLIVEIRA, A.C. de; SILVA, J.A.G. da; BENIN, G.; VIEIRA, E.A.; SILVA, G.O. da; HARTWIG, I.; VALÉRIO, I.P.; FINATTO, T. Dissimilaridade genética entre genótipos de trigo avaliados em cultivo hidropônico sob estresse por alumínio. **Bragantia**, v.65, p.55-63, 2006.
- BERZONSKY, W.A.; KIMBER, G. Tolerance of *Triticum* species to aluminum. **Plant Breeding**, v.97, p.275-278, 1986.
- CAMARGO, C.E. de O.; FELICIO, J.C.; FERREIRA FILHO, A.W.P.; LOBATO, M.T.V. Tolerância de genótipos de trigo comum, trigo duro e triticale à toxicidade de alumínio em soluções nutritivas. **Bragantia**, v.65, p.43-53, 2006.
- CAMARGO, C.E. de O.; FERREIRA FILHO, A.W.P.; FREITAS, J.G. de. Avaliação de genótipos de centeio, triticale, trigo comum e trigo duro quanto à tolerância ao alumínio em solução nutritiva. **Scientia Agricola**, v.55, p.227-232, 1998.
- GUIMARÃES, C.T. **Caracterização da variabilidade genética e alélica da tolerância ao alumínio em gramíneas para sua utilização em programas de melhoramento**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2005. 41p.
- NARASIMHAMOORTHY, B.; BLANCAFLOR, E.B.; BOUTON, J.H.; PAYTON, M.E.; SLEDGE, M.K. A comparison of hydroponics, soil, and root staining methods for evaluation of aluminum tolerance in *Medicago truncatula* (barrel Medic) germoplasm. **Crop Science**, v.47, p.321-328, 2007.
- PINTO-CARNIDE, O.; GUEDES-PINTO, H. Differential aluminum tolerance of Portuguese rye populations and North European rye cultivars. **Agronomie**, v.20, p.93-99, 2000.
- SAS INSTITUTE. **SAS user's guide**. Version 9.1. Cary: SAS Institute, 2004.
- SOUSA, C.N.A. de. Classification of Brazilian wheat cultivars for aluminum toxicity in acid soils. **Plant Breeding**, v.117, p.217-221, 1998.
- STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C. do; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Emater/RS, 2002. 126p.
- VOSS, M.; SOUSA, C.N.A. de; BAIER, A.C.; NASCIMENTO JÚNIOR, A.; BOFF, T. **Método de avaliação de tolerância à toxidez de alumínio em trigo, em condições de hidroponia, na Embrapa Trigo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006. 16p. (Embrapa Trigo. Documentos online, 67).
- WANG, J.-P.; RAMAN, H.; ZHANG, G.-P.; MENDHAM, N.; ZHOU, M.-X. Aluminium tolerance in barley (*Hordeum vulgare* L.): physiological mechanisms, genetics and screening methods. **Journal of Zhejiang University SCIENCE B**, v.7, p.769-787, 2006.

Recebido em 17 de outubro de 2009 e aprovado em 29 de janeiro de 2009