

Toxicidade do alumínio e efeito do ácido giberélico em linhas quase isogênicas de trigo com o caráter permanência verde e maturação sincronizada

Aluminum toxicity and effect of giberellic acid on stay-green and synchronized maturation wheat near-isogenic lines

Simone Alves Silva¹ Fernando Irajá Félix de Carvalho^{2*} José Antônio Gonzalez da Silva³
Antônio Costa de Oliveira² Pedro Jacinto Cruz¹ Vanderlei da Rosa Caetano⁴
Maria Selma Alves Silva Diamantino¹ Adriana Rodrigues Passos¹
Eduardo Alano Vieira⁵ Daniel Simioni⁶

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar linhas quase isogênicas de trigo com o caráter permanência verde e de maturação sincronizada quanto à tolerância ao alumínio e à sensibilidade ao ácido giberélico (AG₃). O experimento foi conduzido no Laboratório de Duplo-haplóides e Hidroponia da FAEM/UFPe, em delineamento de blocos ao acaso, com parcelas subdivididas com três repetições, através do teste simultâneo utilizando solução nutritiva com concentrações de 10mg L⁻¹ de Al³⁺ e 100mg L⁻¹ de AG₃. Foram determinados: a inserção da 1ª folha, o comprimento da 1ª folha, a inserção da 2ª folha, comprimento da 2ª folha, diferença da inserção entre a 1ª e 2ª folha, estatura de plântula, estatura de planta, área foliar, área radicular e o crescimento de raiz. Os caracteres estatura da plântula, inserção da 1ª folha e comprimento da 2ª folha foram os mais expressivos para a seleção de indivíduos com estatura reduzida através da reação do AG₃. O grupo do caráter permanência verde apresentou maior insensibilidade à ação do AG₃, enquanto o grupo de plantas sincronizadas proporcionou maior tolerância ao Al³⁺. Contudo, existe possibilidade de selecionar linhas quase isogênicas dentro do grupo permanência verde com tolerância ao Al³⁺ e insensibilidade ao AG₃ através da técnica de cultivo hidropônico com solução nutritiva em ambiente controlado.

Palavras-chave: *Triticum aestivum* L., estatura de planta, crescimento de raiz.

ABSTRACT

The objective was to evaluate wheat near-isogenic lines differing from the trait stay-green and synchronized

maturation regarding their aluminum tolerance and sensibility to the giberellic acid (GA₃). The experiment was conducted in the Double-haploids and Hydroponics Laboratory of FAEM/UFPe, in random block with split plot design with three replications, using the simultaneous test in nutrient solutions with 10mg L⁻¹ of Al³⁺ and 100mg L⁻¹ of GA₃. The following characters were evaluated: insertion of the 1st leaf, length of the 1st leaf, insertion of the 2nd leaf, length of the 2nd leaf, difference between the 1st and 2nd leaf insertion, seedling stature, plant stature, leaf area, root area and root growth. The characters seedling stature, insertion of the 1st leaf and length of the 2nd leaf were the most expressive for the selection of individuals with reduced stature caused by the GA₃. The group stay-green presented higher insensibility to GA compared to the group of synchronized plants showed larger tolerance to Al³⁺. However, it is possible to select near-isogenic lines within the stay-green group with Al³⁺ tolerance using hydroponic culture under controlled environmental conditions.

Key words: *Triticum aestivum* L., plant stature, root growth.

INTRODUÇÃO

Um fator importante para aumentar a área cultivada com trigo é o ajustamento da arquitetura da planta aos ambientes de áreas consideradas periféricas através do desenvolvimento de cultivares de porte baixo com menor incidência de acamamento e com elevada tolerância ao alumínio, principalmente em solos que apresentam níveis tóxicos do elemento. Isto

¹Departamento de Fitotecnia, Escola de Agronomia da Universidade Federal da Bahia (AGR-UFBA), Cruz das Almas, BA, Brasil.

²Departamento de Fitotecnia, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM), Universidade Federal de Pelotas (UFPe), Caixa Postal 354, Campus Universitário, 96010-900, Pelotas, RS, Brasil. E-mail: carvalho@ufpel.tche.br. Autor para correspondência.

³Departamento de Fitotecnia, FAEM/UFPe, Pelotas, RS, Brasil.

⁴EMBRAPA-Centro de Pesquisa Agropecuária de Clima Temperado, Pelotas, RS, Brasil.

⁵EMBRAPA-Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, Planaltina, DF, Brasil.

⁶Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial da FAEM/UFPe, Pelotas, RS, Brasil.

possibilita uma melhor utilização de técnicas agrícolas e, conseqüentemente, um aumento do patamar de potencial genético de rendimentos de grãos. Além disso, a obtenção de constituições genéticas providas do caráter permanência verde poderá auxiliar o melhorista de trigo na obtenção de plantas mais produtivas, mais estáveis e com maior adaptabilidade. Desta forma, selecionar genótipos providos do caráter permanência verde que apresentem maior tolerância à toxicidade ao alumínio, evitando o crestamento, e identificar plantas insensíveis ao ácido giberélico portadoras dos genes de nanismo poderá proporcionar efetivos avanços na agregação de valores para a cultura do trigo brasileiro.

O caráter permanência verde possui a propriedade de manter o colmo e as folhas verdes até o término do enchimento da semente, permitindo maior resistência ao acamamento e maior tolerância ao estresse hídrico. Além disso, este caráter tem sido relatado como sendo de alta herdabilidade, controlado por um a dois genes independentes, com ação predominante da variância de aditividade, portanto, de fácil seleção (SILVA et al., 2000).

A tolerância ao Al^{3+} em trigo depende, além das concentrações de alumínio na solução e da concentração dos sais, também do pH, da temperatura, do tempo de duração do ensaio e das variedades utilizadas (MOORE et al., 1976; FOY et al., 1978). A dose de 10mg L^{-1} na solução nutritiva tem sido o ponto determinante para alcançar níveis tóxicos do alumínio à planta (CAMARGO & OLIVEIRA, 1981; FEDERIZZI et al., 1988; DORNELLES et al., 1997). Solos com pH suficientemente baixo, geralmente abaixo de 5,0, provocam decomposição nas estruturas minerais da argila, migrando o alumínio para a fração trocável ou para a solução do solo. Entretanto, o alumínio, nas camadas superficiais dos solos ácidos, pode ser precipitado pela prática de calagem; porém, no subsolo, pode permanecer solúvel e tóxico às plantas, restringindo o crescimento das raízes dos genótipos de trigo sensíveis (FOY et al., 1978; CAMARGO & OLIVEIRA, 1981). O efeito primário da toxicidade do alumínio em trigo é a paralisação do crescimento da raiz devido a uma inibição da elongação das células (KERRIDGE et al. 1971). Além disso, raízes danificadas pelo acúmulo de Al^{3+} tóxico apresentam a região meristemática engrossada e de coloração mais escura, sendo ineficientes na absorção de nutrientes e água (FOY et al., 1978).

A resposta diferenciada do ácido giberélico em genótipos de trigo foi primeiramente descrita por ALLAN et al. (1959), quando compararam genótipos de estatura reduzida e estes foram insensíveis ao ácido

giberélico. Sendo assim, a identificação de genótipos portadores dos genes que exibem estatura reduzida pode ser efetuada por meio da avaliação da insensibilidade ao AG_3 . A estatura é considerada um caráter controlado por genes de grande efeito, simbolizados por *Rht* (*Reduction Height*), denominados genes de nanismo, que foram identificados inicialmente na variedade japonesa "Norin 10" (GALE et al., 1981). A identificação de genótipos portadores destes genes pode ser efetuada através da avaliação da insensibilidade ao ácido giberélico. Os genes que controlam essa insensibilidade têm sido simbolizados por *Gai 1* e *Gai 2*, sendo a associação entre o caráter insensibilidade ao ácido giberélico e o caráter estatura de planta observados por ALLAN et al. (1959), GALE & GREGORY (1977), FEDERIZZI et al. (1988), CANCI et al. (1997) e DORNELLES et al. (1997).

Os caracteres estatura de planta, inserção de primeira e segunda folha, diferença entre a inserção da primeira e segunda folha, comprimento da segunda folha, aspecto clorótico visual da plântula e comprimento do coleóptilo têm sido empregados como critérios de avaliação da sensibilidade ao ácido giberélico por vários pesquisadores (GALE & GREGORY, 1977; FEDERIZZI et al., 1988; CANCI et al., 1997). Além disso, doses de 100mg L^{-1} têm sido reportadas como as de melhor resultado em trabalhos feitos com trigo, com a aplicação exógena de ácido giberélico (ALLAN et al., 1959; FEDERIZZI et al., 1988; DORNELLES et al., 1995).

A separação das classes de trigos tolerantes ao alumínio e insensíveis ao ácido giberélico tem sido possível por meio do emprego de solução nutritiva, permitindo imediata observação dos efeitos de danos de alumínio pela inibição do crescimento da raiz e pela ação do ácido giberélico no crescimento da parte aérea, evitando os inconvenientes do uso de solo onde a intensidade de seleção não pode ser quantitativamente controlada. Além disso, DORNELLES et al. (1997), utilizando a técnica de cultivo hidropônico, avaliou simultaneamente genótipos de trigo para tolerância ao alumínio e a sensibilidade ao ácido giberélico, demonstrando que um único experimento representa estratégia viável na seleção de plantas de diferentes estaturas e tolerantes ao alumínio tóxico. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo avaliar linhas quase isogênicas de trigo diferenciadas quanto à presença e ausência do caráter permanência verde, simultaneamente para o caráter tolerância ao Al^{3+} e sensibilidade ao AG_3 , na seleção de plantas de trigo tolerantes ao crestamento e de reduzida estatura.

MATERIAL E MÉTODOS

Nos anos de 1999 a 2001, utilizando duas épocas de semeadura por ano, verão e inverno, sob condições de campo e telado, foram feitos os avanços de gerações do cruzamento entre a linhagem de trigo TB 188 (maturação sincronizada) com TB 438 (permanência verde). Por meio de autofecundação até a geração F_6 , foram obtidas linhagens quase isogênicas para o caráter permanência verde (F_6 -SG: linha quase isogênica permanência verde) e sincronizado (F_6 -SZ: linha quase isogênica sincronizada). Além disso, foram obtidos retrocruzamentos um e dois, respectivamente $RC_1 (P_1 \times F_1)$ e $RC_2 (P_2 \times F_1)$, autofecundados até a geração F_6 , onde foram selecionadas plantas RC_1F_6 e RC_2F_6 para a presença e ausência do caráter permanência verde.

Para a condução deste experimento, foi utilizada a técnica descrita por CAMARGO & OLIVEIRA (1981) para avaliação da tolerância ao Al^{3+} adaptada por DORNELLES et al. (1997), que inclui a avaliação simultânea para estatura de planta com o uso do ácido giberélico (AG_3). Dez sementes de cada planta, variando em torno de 35 plantas para cada linha quase isogênica avaliada, dentro do grupo permanência verde e de maturação sincronizada, foram desinfestadas em solução de hipoclorito de sódio a 20% por 20 minutos e lavadas com água destilada para retirar o excesso do produto desinfestante. Em seguida, foram semeadas em gerbox, sobre papel filtro umedecido, e levadas para germinar em câmara BOD, à temperatura de 20 °C com iluminação permanente, onde permaneceram por três dias até o início da germinação visível.

As sementes pré-germinadas, com 2mm de raiz, foram transferidas para uma tela de plástico adaptada à tampa de um recipiente com capacidade de 5,5L, contendo solução nutritiva completa, de modo a permanecerem em contato com a solução. Esses recipientes contendo a solução foram colocados em tanque banho-maria em água, à temperatura de 25 ± 1 °C, com iluminação permanente, com o auxílio de resistências adaptadas ao tanque, e ligados a um sistema de aeração para dotação de oxigênio necessário ao desenvolvimento do sistema radicular, por um período de 48 horas. Depois de concluído esse período, as telas com as plântulas foram transferidas para recipientes com solução tratamento contendo $10mg L^{-1}$ de Al^{3+} , onde permaneceram por mais 48 horas. Posteriormente, as telas retornaram à solução nutritiva completa por 72 horas. Após este período, as telas com as plântulas foram transferidas para novos recipientes com solução nutritiva mais $100mg L^{-1}$ de AG_3 , com pH 7, por 168 horas. Depois de completado esse processo,

foram aferidos os caracteres indicativos de tolerância ao alumínio e insensibilidade ao ácido giberélico.

Para aferição dos caracteres medidos em laboratório, foi instalado em condições de hidroponia um experimento em delineamento de blocos ao acaso com parcelas subdivididas, sendo a parcela constituída pelo grupo (permanência verde = SG ou sincronizado = SZ) e, na sub-parcela, as linhagens com o caráter permanência verde (linha quase isogênica permanência verde: F_6 -SG, RC_1F_6 -SG e RC_2F_6 -SG) e do tipo de maturação sincronizada (linha quase isogênica sincronizada: F_6 -SZ, RC_1F_6 -SZ e RC_2F_6 -SZ). Além disso, foram adicionados no experimento os genitores que deram origem às linhagens estudadas.

A avaliação dos caracteres para tolerância ao alumínio tóxico foi feita pela medição do crescimento da raiz (REC) com o auxílio de uma régua graduada, a partir do ponto de dano causado pela toxicidade do Al^{3+} , na raiz principal. Para a medição da área radicular (AR), as raízes foram cortadas na base e inseridas no equipamento de medida de área foliar, sendo o resultado obtido em cm^2 (ROSSIELO et al., 1995). Os caracteres indicativos de sensibilidade ao ácido giberélico foram aferidos com o auxílio de régua milimetrada e os resultados expressos em cm, a saber: inserção da 1ª folha (IPF), tomada da base do colmo até a altura do encontro de emergência da 1ª folha; inserção da 2ª folha (ISF), da base da 1ª folha até o encontro da 2ª folha; comprimento da 1ª folha (CPF) e 2ª folha (CSF); diferença da inserção da 1ª e 2ª folha (DIF); estatura de plântula (EPL), medindo da base ao ápice da plântula, e área foliar (AF) incluída toda a parte aérea e determinada com medidor de área foliar.

Paralelamente ao experimento conduzido em condições de laboratório, foi mensurado em campo experimental o caráter estatura de planta (EST), utilizando os mesmos genótipos que foram avaliados em hidroponia. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com parcelas subdivididas, utilizando mesma estrutura de parcela e sub-parcela como indicado no experimento de laboratório. As medições foram realizadas após 21 dias da antese, medindo cada planta individualmente da base do colmo até o ápice da espiga, excluindo as aristas. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (teste de F), as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e estimadas as correlações fenotípicas de Pearson (STEEL & TORRIE, 1980).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resumos das análises de variância do experimento de laboratório estão incluídos na tabela 1.

Para a maioria dos caracteres, ocorreram efeitos significativos nas linhas quase isogênicas (L), exceto para os caracteres comprimento da 2ª folha (CSF) e para a diferença entre a inserção da 1ª e 2ª folha (DIF). Os grupos do tipo de maturação permanência verde e sincronizada não diferiram significativamente, somente para o caráter DIF sendo que os demais caracteres evidenciaram comportamentos distintos pelo teste F. Isso indica que para as linhas quase isogênicas existe presença de variabilidade, apresentando diferentes níveis de tolerância ao alumínio tóxico (Al^{3+}) e resposta diferenciada quanto à sensibilidade ao ácido giberélico (AG_3). Dessa forma, é possível afirmar que as concentrações avaliadas foram adequadas para separar genótipos tolerantes e sensíveis ao Al^{3+} e AG_3 , confirmando os resultados obtidos com metodologia similar por CAMARGO & OLIVEIRA (1981) e adaptado por DORNELLES et al. (1997). Os coeficientes de variação para todos os caracteres avaliados foram considerados adequados para as condições experimentais, variando de 6,61 a 28,32%.

A interação grupo vs. linha (GxL) esteve presente na maioria dos caracteres, o que indica dependência entre grupos e linhas quase isogênicas, ou seja, a classificação das linhas quase isogênicas quanto aos caracteres avaliados seria diferente dependendo do grupo de plantas do tipo permanência

verde e sincronizadas. Portanto, foi importante avaliar o comportamento de cada isolinha através da comparação de suas médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade e verificar, entre os grupos a que pertencia, qual a isolinha que melhor agrega altos níveis de tolerância ao Al^{3+} e menor sensibilidade ao AG_3 .

As médias dos dez caracteres avaliados estão inseridas na tabela 2. Para o caráter área radicular (AR), as linhas quase isogênicas RC_2F_6 -SG e RC_2F_6 -SZ demonstraram melhor desempenho. Contudo, o crescimento de raiz (REC) foi mais expressivo no genótipo padrão para estatura mais elevada (TB188). A isolinha obtida do retrocruzamento RC_2F_6 -SZ demonstrou o segundo maior crescimento de raiz, diferindo das demais linhas quase isogênicas. Para os caracteres indicativos de sensibilidade ao AG_3 , a linhagem TB438 indicou ser adequada como padrão, evidenciando uma estatura mais reduzida (EST) quando avaliada em condições de campo, coincidindo com valores menores para todos os caracteres indicativos de sensibilidade ao ácido giberélico, obtidos em laboratório (Tabela 2). Para o caráter área foliar (AF), as duas linhas quase isogênicas do grupo permanência verde (F_6 -SG e RC_1F_6 -SG) revelaram menor sensibilidade ao ácido giberélico.

Considerando a inserção da 1ª folha (IPF), foi possível verificar que as linhas quase isogênicas

Tabela 1 - Resumo das análises de variância para os caracteres estatura de planta (EST), área radicular (AR), crescimento de raiz (REC), área foliar (AF), inserção da 1ª folha (IPF), comprimento da 1ª folha (CPF), inserção da 2ª folha (ISF), comprimento da 2ª folha (CSF), diferença da inserção da 1ª e 2ª folha (DIF) e estatura de plântula (EPL). FAEM/UFPeL, 2004.

Fontes de Variação	G.L	Valores de quadrado médio									
		EST Cm	AR cm ²	REC mm	AF cm ²	IPF cm	CPF cm	ISF cm	CSF cm	DIF cm	EPL cm
Bloco	2	28,6	0,08	0,33	1,08	0,12	1,40	0,06	6,23	0,27	15,43
Grupos (G)	1	3232,8*	0,11*	3,71*	26,56*	4,02*	25,8*	0,08	226,2*	1,86	516,2*
Resíduo (a)	19	26,1	0,01	0,52	0,89	0,35	1,24	0,03	10,50	0,58	22,14
Linhas (L)	3	586,1*	0,14*	7,66*	4,01*	3,34*	14,3*	0,55*	9,29	0,42	90,94
Interação (GxL)	3	3510,8*	0,06*	1,92	3,43*	2,89*	5,24*	0,05	90,86*	4,38*	155,9*
Resíduo (b)	114	27,9	0,01	0,90	0,68	0,18	0,73	0,04	4,73	0,33	10,69
CV Resíduo (a)	%	6,61	10,37	28,32	18,58	16,33	11,50	19,09	20,88	24,49	16,01
CV Resíduo (b)	%	6,84	12,69	37,13	16,24	11,78	8,85	21,60	14,01	18,58	11,13
Média		77,16	0,76	6,98	5,08	3,65	9,68	0,98	15,51	3,13	29,38

*significativo a 5% de probabilidade pelo teste de F.

Tabela 2 - Médias dos caracteres avaliados em laboratório: área radicular (AR), crescimento de raiz (REC), área foliar (AF), inserção da 1ª folha (IPF), comprimento da 1ª folha (CPF), inserção da 2ª folha (ISF), comprimento da 2ª folha (CSF), diferença da inserção da 1ª e 2ª folha (DIF), estatura de plântula (EPL); e em campo experimental: estatura de planta (EST) para as linhas quase isogênicas permanência verde (F₆-SG, RC₁F₆-SG, RC₂F₆-SG), sincronizadas (F₆-SZ, RC₁F₆-SZ, RC₂F₆-SZ) e média dos grupos, incluindo as linhagens TB438 e TB188. FAEM/UFPEL, 2004.

Genótipos	AR	REC	AF	IPF	CPF	ISF	CSF	DIF	EPL	EST
	cm ²	mm	cm ²	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
TB438 (P)	0,60 c	6,79 e	3,87 d	2,75 c	8,33 c	0,32 e	16,0 b	3,13 c	22,8 d	62,1 h
F ₆ -SG	0,77 ab	5,56 f	5,04 c	3,74 ab	9,75 b	0,52 cd	17,69 ab	3,34 bc	29,1 bc	75,7 e
RC ₁ F ₆ -SG	0,74 b	7,96 d	4,77 c	3,52 b	9,80 b	0,46 d	17,59 ab	3,27 bc	28,5 c	66,6 g
RC ₂ F ₆ -SG	0,83 a	9,73 c	5,28 ac	3,92 a	9,77 b	0,60 b	17,14 ab	3,32 bc	30,7 ab	86,4 b
TB188 (P)	0,77 ab	13,56 a	5,51 ab	3,83 ab	9,54 b	0,19 e	18,1 a	3,64 a	31,6 a	94,8 a
F ₆ -SZ	0,77 ab	4,46 h	5,35 ab	3,96 a	11,1 a	0,43 c	16,16 b	3,52 ab	31,7 a	82,1 c
RC ₁ F ₆ -SZ	0,79 ab	5,05 g	5,19 ac	3,45 b	9,96 b	0,69 a	18,79 a	3,20 bc	30,3 ac	76,8 d
RC ₂ F ₆ -SZ	0,81 a	10,54 b	5,68 a	3,96 a	9,60 b	0,71 a	17,66 ab	3,19 c	29,9 ac	72,1 f
GRUPOS	AR	REC	AF	IPF	CPF	ISF	CSF	DIF	EPL	EST
“SG”	0,74 b	7,51 b	4,74 b	3,48 b	9,41 b	0,48 a	17,10 b	3,27 a	27,77 b	72,76 b
SZ	0,78 a	8,40 a	5,43 a	3,80 a	10,05 a	0,50 a	17,67 a	3,39 a	30,87 a	81,45 a

* médias seguidas da mesma letra em coluna, não diferem pelo teste de Tukey em 5% de probabilidade. SG= permanência verde e SZ= sincronizado.

RC₁F₆-SG e RC₁F₆-SZ apresentaram comportamento similar, o mais próximo da linhagem padrão com 2,75cm da IPF. Tanto a média do caráter CSF quanto do DIF não diferiram pelo teste de Tukey (P<0,05), o que confere a ausência de significância no resumo das análises de variância apresentado na tabela 1.

Na comparação das médias entre os dois grupos avaliados, os resultados evidenciaram que as plantas providas do caráter permanência verde mostraram superioridade quanto à insensibilidade ao ácido giberélico nos caracteres AF, IPF, CSF e EPL (Tabela 2) e também revelaram correlações significativas com EST (Tabela 3), o que confirma a hipótese de obtenção de ganho genético na seleção de plantas de estatura reduzida em linhagens portadoras do caráter “stay-green”, quando selecionados para estes caracteres em cultivo hidropônico. Quanto à tolerância à toxidez por alumínio, o grupo de plantas com maturação sincronizada (trigo comum) evidenciou valores mais elevados dos caracteres AR e REC, indicando ser mais tolerante ao alumínio tóxico no solo do que grupos de plantas permanência verde.

Os genótipos avaliados obtiveram diferentes estaturas quando conduzidos em experimento a campo (Tabela 2). Entretanto, a separação desses genótipos através da sensibilidade ao ácido giberélico, se observada em condições de laboratório, permite, com mais rapidez e controle de ambiente, identificar e selecionar genótipos de reduzida estatura

somente em estágio de plântula em cultivo hidropônico. Assim, alguns caracteres indicativos de sensibilidade ao ácido giberélico avaliados em laboratório foram correlacionados com o caráter EST a fim de verificar uma associação para possível seleção (Tabela 3). Desse modo, foi possível avaliar a magnitude e a direção das influências de um caráter sobre o outro, dando um indicativo simples de associação entre eles. A magnitude destas correlações evidenciou uma direção em sua maioria positiva. O maior grau de associação foi observado entre a estatura de plântula e o comprimento da 2ª folha (0,963), indicando que a EPL pode ser utilizada de forma mais fácil e eficiente na substituição do CSF, a qual necessita de medições minuciosas. Além disso, ambos os caracteres supracitados obtiveram maior associação com a estatura de planta (0,542 e 0,577), seguida do caráter IPF (0,504). Resposta similar foi obtida por CANCI et al. (1997) utilizando mesma metodologia para avaliação em laboratório, em que a estatura de plântula foi aferida pela distância da inserção da raiz à extremidade da folha mais desenvolvida no momento da aferição, no caso da segunda folha. O caráter AF também evidenciou elevado grau de associação com o EPL (0,858), com ótimo indicativo de viável utilização como parâmetro de seleção para estatura reduzida por ser medido por aparelho fotoelétrico, de fácil manipulação. Entretanto, o EPL, CSF e IPF representam ser de mais fácil utilização, visto que não necessitam de aparelho medidor de área foliar.

Tabela 3 - Coeficientes de correlação fenotípica de Pearson entre os caracteres indicativos de tolerância ao alumínio tóxico e insensibilidade ao ácido giberélico (estatura reduzida) de linhas de trigo permanência verde e de maturação sincronizada, submetidos a 10mg L⁻¹ de Al³⁺ e 100mg L⁻¹ de AG₃. FAEM/UFPEL, 2004.

	EST	AR	REC	AF	IPF	CPF	ISF	CSF	DIF
AR	0,393 **								
REC	0,275 **	0,54 **							
AF	0,432 **	0,669 **	0,323 **						
IPF	0,504 **	0,587 **		0,674 **					
CPF	0,328 **	0,505 **	0,094	0,709 **	0,661 **				
ISF	0,114	0,353 **	0,071	0,342 **	0,244	0,177 **			
CSF	0,577 **	0,583 **	0,337 **	0,826 **	0,707 **	0,702 **	0,241		
DIF	0,340 **	0,249	0,084	0,334 **	0,691 **	0,452 **	-0,527 **	0,436 **	
EPL	0,542 **	0,635 **	0,279 **	0,858 **	0,798 **	0,834 **	0,351 **	0,963 **	0,435 **

** significativo a 1 % de probabilidade, pelo teste t. Estatura de planta (EST), área radicular (AR), crescimento de raiz (REC), área foliar (AF), inserção da 1ª folha (IPF), comprimento da 1ª folha (CPF), inserção da 2ª folha (ISF), comprimento da 2ª folha (CSF), diferença da inserção da 1ª e 2ª folha (DIF) e estatura de plântula (EPL).

Houve correlação negativa significativa apenas entre os caracteres ISF e DIF. Além disso, a diferença da inserção da 1ª e 2ª folha (DIF) foi o caráter que apresentou menor correlação com a maioria dos caracteres. Isso pode ser explicado porque nem todas as plântulas apresentaram inserção da 2ª folha (ISF). Isso indica que quanto maior for a estatura de plântula (EPL), e maior for a estatura de planta (EST), maior será a inserção da 1ª folha (IPF). Com isso, haverá maior possibilidade de surgir a 2ª folha, e esta proporcionará uma maior DIF. A correlação entre o crescimento de raiz (REC) e a área radicular (AR) foi positiva e significativa (0,54), indicando que ambos os caracteres podem ser utilizados para avaliação de tolerância ao alumínio tóxico. Entretanto, essa correlação não é suficiente para recomendar para tolerância à toxicidade do alumínio. Correlacionando esses mesmos caracteres, PAN et al. (1989) verificaram que a exposição do sistema radicular por vários dias à toxicidade do elemento tóxico (Al³⁺) afeta em maior grau a elongação de raízes laterais do que o eixo principal, o que pode implicar uma maior sensibilidade do caráter AR total em relação à medição isolada do comprimento da raiz principal, apresentando baixa correlação desta com o REC, visto ser o REC mensurado na raiz principal através de seu crescimento longitudinal. Contudo, é importante a aplicação conjunta desses dois caracteres para avaliação de tolerância ao Al³⁺, porém quando houver a impossibilidade de avaliação desses dois caracteres simultaneamente, o mais indicado é o emprego do caractere REC, por possibilitar uma visualização direta da paralisação do meristema da raiz principal por meio do seu engrossamento e escurecimento, como a técnica sugerida por KERRIDGE et al. (1971), LAFEVER et al. (1977) e CAMARGO & OLIVEIRA (1981).

CONCLUSÕES

As concentrações de 10mg L⁻¹ de Al³⁺ e 100mg L⁻¹ de AG₃ são adequadas para identificar precocemente genótipos de trigo com diferentes níveis de tolerância ao alumínio tóxico e de sensibilidade ao ácido giberélico. Os caracteres estatura de plântula, comprimento da segunda folha e inserção da primeira folha são os mais indicados para identificar genótipos de estatura reduzida através da ação do ácido giberélico. Grupo de plantas providas do caráter permanência verde apresentam maior insensibilidade à ação do ácido giberélico, enquanto o grupo de plantas com maturação sincronizada revela maior tolerância ao alumínio em nível tóxico. É possível selecionar linhas quase isogênicas dentro do grupo permanência verde com tolerância à toxicidade ao alumínio e insensibilidade ao ácido giberélico através da técnica de cultivo hidropônico sobre solução nutritiva em ambiente controlado, visto a existência de variabilidade genética para ambos os caracteres testados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelos auxílios financeiros recebidos e pelas bolsas de graduação e de pós-graduação, permitindo a viabilização e realização do trabalho.

REFERÊNCIAS

ALLAN, R.E. et al. Comparative response to gibberellic acid of dwarf, semidwarf and standart short and tall winter wheat

- varieties. **Agronomy Journal**, Madison, v.51, n.4, p.737-740, 1959.
- CAMARGO, O.C.E. de; OLIVEIRA, O.F. Tolerância de cultivares de trigo a diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva e no solo. **Bragantia**, Campinas, v.40, n.1, p.21-23, 1981.
- CANCI, P.C. et al. Diferentes ambientes para a avaliação de sensibilidade ao ácido giberélico em genótipos de trigo (*Triticum aestivum* L.). **Ciência Rural**, Santa Maria, v.27, n.1, p.21-25, 1997.
- DORNELLES, A.L.C. et al. Avaliação simultânea para tolerância ao alumínio e sensibilidade ao ácido giberélico em trigo hexaplóide. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.9, p.893-896, 1997.
- DORNELLES, A.L.C. et al. O uso de ácido giberélico em solução nutritiva na avaliação precoce de estatura de genótipos de trigo hexaplóide. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.25, n.3, p.363-366, 1995.
- FEDERIZZI, L.C. et al. Avaliação da resposta de genótipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) de diferentes estaturas à aplicação de ácido giberélico no estádio de plântula. **Revista do Centro Ciências Rurais**, Santa Maria, v.18, n.2, p.149-161, 1988.
- FOY, G.D. et al. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Bethesda, v.29, p.511-566, 1978.
- GALE, M.D. et al. A classification of the 'Norin10' and 'Ton thumb' dwarfing genes in British, Mexican, Indian and other hexaploid bread wheat varieties. **Euphytica**, Wageningen, v.30, n.2, p.355-361, 1981.
- GALE, M.D.; GREGORY, R.S. A rapid method for early generation selection of dwarf genotypes in wheat. **Euphytica**, Wageningen, v.26, n.3, p.733-738, 1977.
- KERRIDGE, P.C. et al. Separation of degrees of aluminum tolerance in wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v.63, n.4, p.586-590, 1971.
- LAFFEVER, H.N. et al. Differential response of wheat cultivars to Al. **Agronomy Journal**, Madison, v.4, n.69, p.563-568, 1977.
- MOORE, D.P. et al. Screening wheat for aluminum tolerance. In: WORKSHOP ON PLANT ADAPTATION TO MINERAL STRESS IN PROBLEM SOILS, 1976, Beltsville. **Proceedings...** Ithaca: Cornell University, 1976. p.287-295.
- PAN, W.L. et al. Aluminum inhibition of shoot lateral branches of *Glycine max* and reversal by exogenous cytokinin. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.20, n.1, p.1-9, 1989.
- ROSSIELLO, R.O.P. et al. Comparação dos métodos fotoelétricos e da interseção na determinação da área, comprimento e raio médio radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, n.30, n.5, p.633-638, 1995.
- SILVA, S.A. et al. Genetic basis of stay-green trait in bread wheat. **Journal of New Seeds**, Binghamton, v.2, n.2, p.55-68, 2000.
- STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. **Principles and procedures of statistics: a biometrical approach**. New York: MacGraw-Hill Book, 1980. 633p.