

MELHORAMENTO GENÉTICO VEGETAL

TOLERÂNCIA DE GENÓTIPOS DE TRIGO COMUM, TRIGO DURO E TRITICALE À TOXICIDADE DE ALUMÍNIO EM SOLUÇÕES NUTRITIVAS ⁽¹⁾

CARLOS EDUARDO DE OLIVEIRA CAMARGO^(2,4); JOÃO CARLOS FELICIO⁽²⁾; ANTONIO WILSON PENTEADO FERREIRA FILHO⁽²⁾; MARY TÚLIA VARGAS LOBATO⁽³⁾

RESUMO

Foi estudado o comportamento diferencial de 12 genótipos de trigo comum (*Triticum aestivum* L.), um genótipo de trigo duro (*Triticum durum* L.), e um de triticales (*Triticosecale* sp) em soluções nutritivas de tratamento contendo duas concentrações salinas (1/5 e 1/10 da completa) e seis concentrações de alumínio (0, 2, 4, 6, 8 e 10 mg L⁻¹), à temperatura de 25 ± 1 °C e pH 4,0. Foram utilizadas dez plântulas por parcela e quatro repetições. A tolerância foi medida pela capacidade de as raízes primárias continuarem a crescer em solução sem alumínio, após permanecer 48 horas em solução nutritiva completa, contendo uma concentração conhecida de alumínio combinada com cada uma das concentrações salinas. Os genótipos de trigo comum IAC-289, IAC-350 e IAC-370 e a cultivar controle Anahuac, e os genótipos de trigo duro IAC-1003 e de triticales IAC-5 foram os mais sensíveis a níveis crescentes de Al³⁺ nas soluções nutritivas de tratamento e, portanto, somente seriam indicados para cultivo em solos corrigidos. Os genótipos de trigo comum IAC-24 e IAC-378 e a cultivar controle BH-1146 destacaram-se pela tolerância à toxicidade de Al³⁺, com potencial para uso em solos ácidos e como fontes genéticas de tolerância nos futuros cruzamentos. Os sintomas de toxicidade de alumínio foram maiores com a elevação da concentração de alumínio e da diminuição das concentrações de sais da solução nutritiva para todos os genótipos estudados.

Palavras-chave: genótipos de *Triticum aestivum* L., *Triticum durum* L. e *Triticosecale* sp, crescimento das raízes, índice de tolerância relativa.

ABSTRACT

TOLERANCE OF BREAD WHEAT, DURUM WHEAT AND TRITICALE GENOTYPES TO ALUMINUM TOXICITY IN NUTRIENT SOLUTION

Twelve bread wheat (*Triticum aestivum* L.), one durum wheat (*Triticum durum* L.) and one triticales (*Triticosecale* sp) genotypes were studied in nutrient solutions with a high salt concentration in experiment 1 and a weak salt concentration in experiment 2, for aluminum tolerance at six levels: 0, 2, 4, 6, 8 and 10 mg L⁻¹, under temperature 25 ± 1 °C and pH 4.0. Four replications were used per experiment. Aluminum tolerance was evaluated by measuring root growth in an aluminum-free complete nutrient solution after a treatment of 48 hours in an aluminum solution associated with a particular salt concentration, according

⁽¹⁾ Trabalho parcialmente financiado pela FAPESP. Recebido para publicação em 28 de julho de 2004 e aceito em 8 de fevereiro de 2006.

⁽²⁾ Instituto Agrônomo (IAC), Centro de Análise e Pesquisa Tecnológica do Agronegócio de Grãos e Fibras, Caixa Postal 28, 13001-970 Campinas (SP).

⁽³⁾ Bolsista de mestrado da CAPES.

⁽⁴⁾ Com bolsa de produtividade em pesquisa do CNPq.

to the experiment. The bread wheats IAC-289, IAC-350 and IAC-370, the durum wheat IAC-1003 and the triticale IAC-5 genotypes were the most sensitive for increasing levels of Al^{3+} in treatment nutrient solutions. Thus, they would be indicated only for cultivation in limed soils. The bread wheat IAC-24 and IAC-378 genotypes and the check cultivar BH-1146 were the most tolerant to Al^{3+} toxicity, being able to show good performance in acidic soils and/or to be used as genetic sources for tolerance in future crosses. Under constant temperature 25 ± 1 °C and pH 4,0 aluminum toxicity results in inhibition of root growth which was dependent on the increase of the aluminum concentration or on the reduction of the salt concentration of the nutrient solution for all evaluated genotypes.

Index terms: *Triticum aestivum* L., *Triticum durum* L., *Triticosecale* sp., root growth, relative tolerance index.

1. INTRODUÇÃO

A cultura do trigo se instala no Estado de São Paulo em condições de sequeiro e de solos ácidos, no período de abril a agosto, em sucessão principalmente às culturas de soja e milho.

A obtenção de cultivares de trigo, no Instituto Agrônomo (IAC) tem sido até recentemente, baseada nos métodos tradicionais de melhoramento a partir de cruzamentos envolvendo genótipos brasileiros, com tolerância à toxicidade de alumínio, adaptados às condições de sequeiro e de cultivo em solo ácido e linhagens obtidas no Centro Internacional de Melhoramento de Milho e Trigo (CIMMYT), México. Essas últimas são portadoras de características agrônômicas de interesse, tais como porte baixo, precocidade, espigas com grande fertilidade, resistência às ferrugens e alto potencial produtivo em solos sem a presença de Al^{3+} , portanto, não se adaptando ao cultivo em solos ácidos. É reconhecido que ferramentas como indução de mutação e outras biotecnologias podem contribuir para aumentar a variabilidade genética e/ou reduzir o número de anos para liberar novos cultivares. Em cooperação com o Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), da Universidade de São Paulo e com apoio financeiro da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), Viena, Áustria o programa de melhoramento genético do trigo, do IAC, está empregando o método de melhoramento por indução de mutação para aumentar a variabilidade genética em cruzamentos ou para melhorar algumas cultivares comerciais (CAMARGO et al, 1997 e 2000; CAMARGO e FERREIRA FILHO, 2000; TULMANN NETO et al. 1995 a e b, 1996 e 2001).

A prática da calagem provoca, muitas vezes, a precipitação do alumínio das camadas superiores dos solos ácidos, permanecendo, no entanto, esse elemento tóxico no subsolo (FOY et al., 1965). Como ocorre a paralisação do crescimento radicular em consequência dos efeitos tóxicos do alumínio, em especial no trigo, o desenvolvimento de cultivares tolerantes seria de interesse, pois permitiria um aumento na absorção de água e nutrientes do subsolo

e tornaria as culturas menos sensíveis durante as secas (REID et al., 1969) comuns no Estado de São Paulo e Brasil Central por ocasião do cultivo dessa gramínea.

A toxicidade de alumínio não é o único fator limitante em solos ácidos; portanto, os métodos de separação de plantas tolerantes e sensíveis a determinado nível de alumínio usando solos ácidos não são bastante precisos. Além disso, as raízes, que são as partes da planta diretamente afetadas, não são facilmente observadas. O emprego de soluções nutritivas pode tornar mais eficiente e precisa a separação das plantas em relação à tolerância ao alumínio (CAMPBELL e LAFEVER, 1976; CAMARGO, 1985).

Resultados de pesquisas demonstraram que o crescimento das raízes nos estádios iniciais de desenvolvimento é afetado pela força (concentração salina), temperatura, pH e concentração de fósforo da solução, na presença de Al^{3+} (ALI, 1973; CAMARGO e OLIVEIRA, 1981; CAMARGO et al., 1981; CAMARGO, 1984a; MOORE, 1974; MOORE et al., 1976).

Foi demonstrado em trigo que os sintomas causados pela presença de alumínio em soluções nutritivas poderiam ser evidenciados, aumentando-se a concentração desse elemento na solução em níveis constantes de sais ou diminuindo-se a concentração de sais mantendo constante a concentração de alumínio, sugerindo que a tolerância à toxicidade de alumínio seja uma característica muito mais relativa que absoluta (ALI, 1973, CAMARGO et al., 1981).

Considerando os experimentos instalados em condições de solo ácido e cultivo de sequeiro do município de Capão Bonito, SP (1997-99), as correlações simples calculadas foram positivas e significativas entre as produções médias de grãos de cada genótipo e os respectivos crescimentos médios das raízes, medido após 72 horas de crescimento na solução nutritiva, que se seguiu a crescimento na solução tratamento contendo 2 (0,65), 4 (0,59), 6 (0,51), 8 (0,52) e 10 (0,61) mg L⁻¹ de Al^{3+} . Esses resultados sugeriram que os genótipos mais adaptados (mais produtivos) nessas condições de solo ácido e cultivo de sequeiro foram tolerantes à toxicidade ao Al^{3+} , em soluções nutritivas (CAMARGO et al., 2003).

O objetivo da pesquisa foi identificar as cultivares tolerantes ao alumínio para cultivo em solos ácidos e/ou as melhores fontes de tolerância para uso no programa de melhoramento genético.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os genótipos de trigo comum (*Triticum aestivum* L.) avaliados quanto a tolerância à toxicidade de Al^{3+} , bem como os cruzamentos dos quais se originaram foram os seguintes: IAC-24 (IAS-51/4/SON64/Y50E//GTO/3*CIANO), IAC-289 (KVZ/BUHOS//KAL/BLUEBIRD), IAC-350 (2109.36/SERI), IAC-364 (IAS-58/IAS-55//ALD“S” /3/IAC-5/4/ALD“S”/IAS-58/8.1034.A//ALD“S”/5/CNR/6/BUC“S”/7/IAC-24), IAC-370 (BOW /NAC/VEE/3/BJY/COC), IAC-373 (FCT//YR/PAM), IAC-375 (IAC-5/BUC“S”// BLO“S”/PSN“S”/3/BUC/PVN), IAC-376 (BUC“S”/PVN“S”//IAC-24), IAC-377 (PF8619/IAC-60) e IAC-378 (ALD/IAC-24). Foram também estudados os genótipos de trigo duro

(*Triticum durum* L.) IAC-1003 e de tritcale (*Triticosecale* sp) IAC-5. As duas cultivares-controle de trigo comum: BH-1146 (tolerante) e Anahuac (sensível) foram também avaliadas, sendo utilizadas como padrão de tolerância e sensibilidade à toxicidade de alumínio.

Experimento 1: As sementes dos genótipos foram lavadas com uma solução de hipoclorito de sódio e colocadas em placas de Petri para germinar no refrigerador a uma temperatura de 12 °C por 72 horas. Após esse período, as raízes estavam começando a emergência.

Foram selecionadas dez sementes com emergência uniforme de raízes de cada genótipo e colocadas, com auxílio de uma pinça, sobre o topo de 12 telas de náilon, que foram postas em contato com soluções nutritivas completas existentes, em 12 vasilhas plásticas de 8,3 litros de capacidade cada uma. As telas foram cobertas durante 24 horas com um filme plástico visando manter alta umidade relativa favorecendo o crescimento uniforme das plântulas (Figura 1).

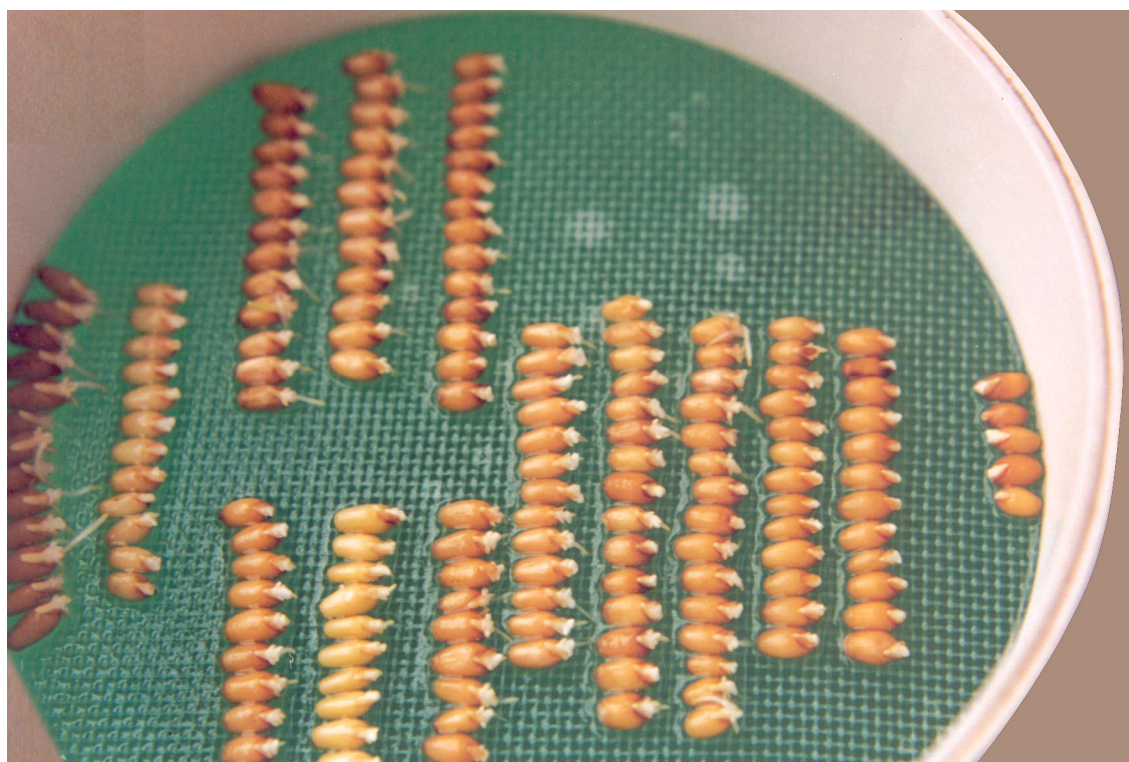


Figura 1. Sementes uniformes de cada genótipo de trigo comum, trigo duro e tritcale avaliados, colocadas com auxílio de uma pinça, sobre o topo de tela de náilon, que foi posta em contato com solução nutritiva completa existente em vasilha plástica de 8,3 litros de capacidade.

A composição da solução nutritiva completa foi a seguinte: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 4 mmol L^{-1} ; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 2 mmol L^{-1} ; KNO_3 4 mmol L^{-1} ; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0,435 mmol L^{-1} ; KH_2PO_4 0,5 mmol L^{-1} ; $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 2 $\mu\text{mol L}^{-1}$; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0,3 $\mu\text{mol L}^{-1}$; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,8 $\mu\text{mol L}^{-1}$; NaCl 30 $\mu\text{mol.L}^{-1}$; Fe-CYDTA 10 $\mu\text{mol L}^{-1}$; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,10 $\mu\text{mol L}^{-1}$ and H_3BO_3 10 $\mu\text{mol L}^{-1}$. A solução, nas vasilhas plásticas, ficou no nível que tocasse a parte inferior da tela de náilon, de maneira que as sementes foram mantidas úmidas, tendo as radículas emergentes pronto suprimento de nutrientes. As soluções foram previamente ajustadas para pH 4,0 com H_2SO_4 0,5 mol L^{-1} . Cada solução foi continuamente arejada e as vasilhas plásticas com as soluções foram colocadas em banho-maria à temperatura de $25 \pm 1^\circ\text{C}$ no laboratório. O experimento foi mantido com luz fluorescente em sua totalidade.

As plantas desenvolveram-se nessas condições por 48 horas. Após esse período, cada plântula tinha três raízes primárias, uma mais longa medindo cerca de 4,5 cm e duas mais curtas localizadas lateralmente à primeira.

Em cada uma das quatro repetições empregaram-se seis telas de náilon contendo as dez plântulas de cada uma das cultivares, as quais foram transferidas para soluções de tratamento contendo respectivamente 0, 2, 4, 6, 8 e 10 mg L^{-1} de alumínio na forma de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$.

A composição da solução de tratamento foi de um quinto da solução completa, exceto que o fósforo foi omitido e o ferro, adicionado em quantidade equivalente como $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ no lugar de Fe-CYDTA , como descrito por MOORE et al., (1976). O fósforo foi omitido para evitar a possível precipitação do alumínio. Por causa da possibilidade da precipitação do alumínio como $\text{Al}(\text{OH})_3$, especial atenção foi dada a esse ponto. Antes de transferir as telas para as soluções de tratamento, suficiente H_2SO_4 0,5 mol L^{-1} foi adicionado a fim de trazer o pH para cerca de 4,2 e, então, foi colocada a necessária quantidade de Al como $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$. Ajustou-se o pH final para 4,0, com uma solução de H_2SO_4 0,5 mol L^{-1} , evitando-se adicionar NaOH, que poderia causar a precipitação do alumínio, pelo menos no local da queda da gota. As plantas ficaram crescendo por 48 horas nas soluções de tratamento, quando foram transferidas novamente para as soluções nutritivas completas onde as plântulas cresceram nas primeiras 48 horas. As plântulas permaneceram nessas soluções completas por 72 horas. O crescimento da raiz, após esse período na solução completa depende da severidade da prévia solução de tratamento. Com as raízes das plantas sensíveis ao alumínio, ocorre uma injúria típica em sua extremidade (meristema apical) com

descoloramento e param de crescer permanecendo grossas; já com as raízes das plantas tolerantes, após a injúria causada pelo alumínio, ocorre novo surto de crescimento (Figuras 2 e 3). A quantidade de crescimento da raiz após o efeito prejudicial do alumínio foi determinada, em cada uma das 10 plântulas de cada genótipo, medindo-se o comprimento total da raiz primária central ao término das 72 horas de crescimento na solução completa e subtraindo-se o crescimento até a injúria provocada pelo alumínio. Esse procedimento foi repetido quatro vezes para cada concentração de alumínio.

Durante todo o experimento, o pH das soluções foi mantido o mais próximo possível de 4,0, com ajustamentos diários.

Para auxiliar a classificação dos níveis de tolerância, calculou-se segundo CAMARGO et al. (1991), para cada concentração de alumínio (2, 4, 6, 8 e 10 mg L^{-1}), o índice de tolerância relativa (ITR), que foi dado pela seguinte fórmula:

$$\text{ITR} = [(\text{CRx} - \text{CRS}) / (\text{CRT} - \text{CRS})] \times 4 + 1$$

em que: CRx, CRS e CRT representam os valores do crescimento relativo (crescimento radicular na presença de Al^{3+} / crescimento radicular na ausência de Al^{3+}) de raízes dos genótipos de trigo comum, trigo duro e triticale em estudo (x), controle sensível (S) (cultivar Anahuac) e controle tolerante (T) (cultivar BH-1146). Desse modo, o genótipo tolerante teria um ITR = 5 e o sensível, um ITR = 1.

O delineamento estatístico empregado foi o de blocos ao acaso com parcelas subdivididas (Split Plot), onde as parcelas foram compostas pelas seis diferentes concentrações de alumínio e as subparcelas, formadas pelas cultivares e linhagens de trigo comum, trigo duro e triticale, efetuando-se quatro repetições para cada uma das soluções de tratamento.

O crescimento das raízes e os índices de tolerância relativa foram analisados estatisticamente, considerando-se a média das dez plântulas de cada genótipo após a influência prejudicial do alumínio nas diferentes soluções (CAMARGO e OLIVEIRA, 1981; CAMARGO et al., 1987, 2000 e SALOMON, 2001). A comparação entre as médias dos crescimentos das raízes e dos índices de tolerância relativa dos genótipos de trigo comum, trigo duro e triticale, dentro de uma mesma concentração de alumínio, foram feitas pelo teste de Tukey.

Experimento 2: Foram considerados os mesmos procedimentos relatados para o experimento 1, com exceção da concentração de sais das soluções de tratamento que foi de um décimo da solução completa.

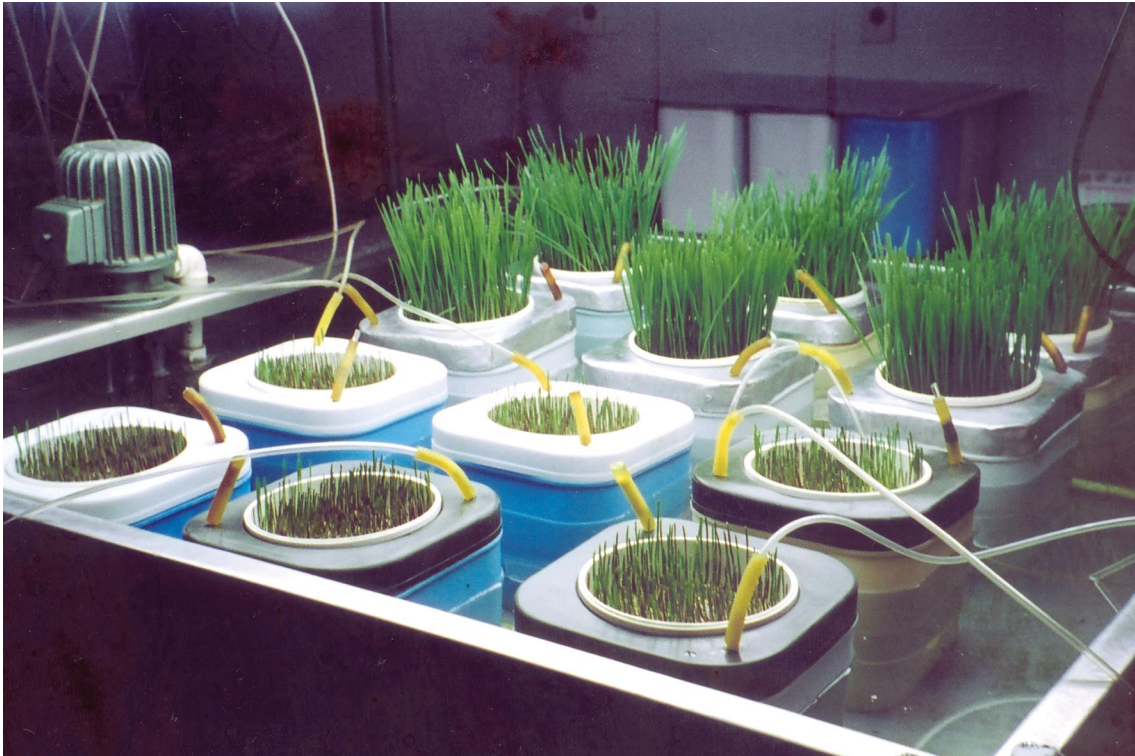


Figura 2. Vista geral do experimento 1, com genótipos de trigo comum, trigo duro e triticale, empregando soluções nutritivas de tratamento contendo uma concentração salina e um quinto da solução completa, com seis concentrações de alumínio ($0, 2, 4, 6, 8$ e 10 mg L^{-1}), à temperatura de $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ e pH 4,0.



Figura 3. Plântula tolerante e sensível com o crescimento das raízes primárias e a paralisação irreversível de crescimento do meristema apical das raízes, respectivamente, após 72 horas em solução nutritiva completa que se seguiu de permanência durante 48 horas em solução de tratamento contendo uma determinada concentração de alumínio.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Experimento 1: Os resultados das análises da variância para os crescimentos das raízes e para os índices de tolerância relativa, mostraram, pelo teste F, efeitos altamente significativos de repetições, concentrações de alumínio, genótipos e interação genótipos x concentrações de alumínio.

Quando avaliados em solução-tratamento com ausência de alumínio, observou-se crescimento normal das raízes em todos os genótipos.

Verificou-se diminuição do crescimento das raízes primárias centrais de todos os genótipos de trigo comum, trigo duro e triticale, medidos após 72 horas de crescimento em soluções nutritivas completas, que se seguiu de 48 horas de crescimento nas soluções de tratamento contendo um quinto da concentração de sais das soluções nutritivas completas à medida que as concentrações de alumínio foram aumentadas (Tabela 1).

A cultivar controle Anahuac de trigo comum e a cultivar IAC-1003 de trigo duro foram as mais sensíveis ao Al^{3+} , diferindo dos demais genótipos avaliados, uma vez que suas raízes primárias pararam de crescer em solução completa, após 48 horas de tratamento com solução contendo 2 mg L^{-1} . Esse resultado confirma a elevada sensibilidade de genótipos de trigo duro à toxicidade de alumínio sendo essa uma das razões que impede seu cultivo em solos ácidos (CAMARGO et al. 1995).

Houve crescimento das raízes dos demais genótipos que foram considerados tolerantes a essa concentração de alumínio. Destacou-se pelo crescimento das raízes nessa concentração de alumínio (2 mg L^{-1}) o genótipo de trigo comum BH-1146 somente não diferindo de IAC-376 e IAC-378. Esses genótipos mais IAC-24, IAC-350, IAC-364, IAC-373, IAC-375 e IAC-377 revelaram índices de tolerância relativa variando de 4,5 a 5,8 sendo considerados os mais tolerantes a 2 mg L^{-1} (Tabela 2).

Tabela 1. Crescimento médio das raízes de 12 genótipos de trigo comum, um genótipo de trigo duro e um genótipo de triticale medido após 72 horas nas soluções nutritivas completas, que se seguiu a 48 horas de permanência nas soluções de tratamento com um quinto da concentração salina da solução completa, contendo seis diferentes concentrações de alumínio (média de 4 repetições)

Genealogia	Concentração de alumínio (mg L^{-1})					
	0	2	4	6	8	10
	mm					
Trigo comum (<i>T. aestivum</i> L.)						
IAC-24	65,1 bc	58,2 bc	52,3 b-e	53,5 a-c	48,3 ab	44,5 ab
IAC-289	71,5 bc	51,5 c	33,2 f	22,1 d	8,1 fg	3,0 e
IAC-350	91,3 a	64,0 bc	43,4 c-f	30,0 d	20,2 d-f	8,9 de
IAC-364	73,9 a-c	67,6 bc	60,7 a-c	54,8 a-c	48,8 ab	45,8 ab
IAC-370	82,9 ab	52,9 bc	34,5 ef	21,2 d	11,9 e-g	3,4 e
IAC-373	73,9 a-c	61,8 bc	51,9 b-e	48,7 bc	41,4 bc	36,4 bc
IAC-375	68,1 bc	56,9 bc	41,1 d-f	36,8 cd	26,7 c-e	23,6 cd
IAC-376	82,9 ab	67,9 a-c	58,4 a-d	51,7 bc	37,6 b-d	35,9 bc
IAC-377	73,9 a-c	67,5 bc	62,7 ab	58,6 ab	53,2 ab	51,0 ab
IAC-378	63,5 c	70,7 ab	51,3 b-f	49,9 bc	43,9 bc	42,0 bc
BH-1146	91,7 a	86,3 a	71,8 a	70,5 a	63,3 a	61,2 a
Anahuac	72,1 bc	0,0 e	0,0 g	0,0 e	0,0 g	0,0 e
Trigo duro (<i>T. durum</i> L.)						
IAC-1003	72,4 bc	0,0 e	0,0 g	0,0 e	0,0 g	0,0 e
Triticale (<i>Triticosecale</i> sp)						
IAC-5	79,7 a-c	22,9 d	11,2 g	0,0 e	0,0 g	0,0 e
D.M.S. ⁽¹⁾	18,5					

(¹) Diferença mínima significativa, pelo teste de Tukey, ao nível de 5%, para a comparação das médias dos genótipos de trigo comum, trigo duro e triticale dentro de uma mesma concentração de alumínio. Os genótipos seguidos de uma letra comum dentro de uma mesma concentração de alumínio (coluna) não diferem entre si.

Tabela 2. Índices de tolerância relativa de 12 genótipos de trigo comum, um genótipo de trigo duro e um genótipo de triticales levando-se em consideração o crescimento das raízes após 72 horas em soluções nutritivas completas que se seguiu a 48 horas de permanência em soluções de tratamento com um quinto da concentração salina da solução completa, contendo cinco diferentes concentrações de alumínio (média de 4 repetições)

Genealogia	Concentração de alumínio (mg L ⁻¹)				
	2	4	6	8	10
Trigo comum (<i>I. aestivum</i> L.)	n.º				
IAC-24	5,1 ab	5,4 a	5,6 a	5,5 a	5,4 a
IAC-289	4,0 b	3,4 c	2,6 de	1,6 f	1,2 e
IAC-350	4,5 ab	3,8 bc	3,0 c-e	2,5 d-f	1,7 de
IAC-364	4,9 ab	5,2 ab	4,9 ab	4,9 ab	4,8 ab
IAC-370	3,7 bc	3,1 cd	2,2 ef	1,9 ef	1,2 e
IAC-373	4,6 ab	4,6 a-c	4,5 a-c	4,3 a-c	4,0 a-c
IAC-375	4,6 ab	4,1 a-c	3,8 b-d	3,3 c-e	3,1 cd
IAC-376	4,5 ab	4,6 a-c	4,2 a-c	3,6 b-d	3,6 bc
IAC-377	5,0 ab	5,4 a	5,2 ab	5,2 a	5,2 a
IAC-378	5,8 a	5,2 ab	5,2 ab	5,1 ab	5,0 ab
BH-1146	5,0 ab	5,0 ab	5,0 ab	5,0 ab	5,0 ab
Anahuac	1,0 d	1,0 e	1,0 f	1,0 f	1,0 e
Trigo duro (<i>T. durum</i> L.)					
IAC-1003	1,0 d	1,0 e	1,0 f	1,0 f	1,0 e
Triticale (<i>Triticosecale</i> sp)					
IAC-5	2,3 cd	1,8 de	1,0 f	1,0 f	1,0 e
D.M.S. ⁽¹⁾	1,6				

(¹) Diferença mínima significativa, pelo teste de Tukey, ao nível de 5%, para a comparação das médias dos genótipos de trigo comum, trigo duro e triticales dentro de uma mesma concentração de alumínio. Os genótipos seguidos de uma letra comum dentro de uma mesma concentração de alumínio (coluna) não diferem entre si.

BH-1146 foi o que exibiu o maior crescimento das raízes após permanecer 48 horas em soluções com 4 mg L⁻¹ de alumínio, não diferindo de IAC-364, IAC-376 e IAC-377 (Tabela 1). Esses genótipos acrescidos de IAC-24, IAC-373 e IAC-378 foram os mais tolerantes a essa concentração de alumínio com índices de tolerância relativa variando de 4,1 a 5,4 (Tabela 2).

O genótipo de triticales IAC-5 (Tabela 1) teve paralisação irreversível no crescimento das raízes após permanecer 48 horas em soluções com 6 e 8 mg L⁻¹, diferindo dos demais genótipos avaliados, com exceção do trigo duro IAC-1003 e da cultivar de trigo controle Anahuac nas duas concentrações testadas e da cultivar IAC-370, apenas, na concentração de 8 mg L⁻¹. Nos genótipos com essas condições, houve um índice de tolerância relativa igual a 1,0. Como a espécie triticales é originária do cruzamento interespecífico entre o trigo duro ou comum com o centeio, provavelmente o IAC-5 não tem em sua constituição genética os genes para elevada tolerância ao alumínio presentes no centeio (CAMARGO e FELICIO, 1984; CAMARGO et al., 1991, 1998).

Nessas concentrações de alumínio (6 e 8 mg L⁻¹), nos genótipos de trigo comum IAC-24, IAC-364 e IAC-377, além da cultivar BH-1146, ocorreram os maiores crescimentos das raízes (Tabela 1). Esses genótipos mais IAC-373 e IAC-378 foram os mais tolerantes às concentrações de 6 e 8 mg L⁻¹ de Al³⁺, levando-se em conta os índices de tolerância relativa (Tabela 2).

Observou-se na cultivar controle BH-1146 as raízes com o maior crescimento quando se adicionaram 10 mg L⁻¹ de Al³⁺, não diferindo apenas dos genótipos IAC-24, IAC-364 e IAC-377. Esses genótipos mais IAC-373 e IAC-378 foram considerados os mais tolerantes a essa concentração de alumínio, pois tiveram os maiores índices de tolerância relativa, variando de 4,0 a 5,4. Os genótipos de trigo comum: IAC-289, IAC-350 e IAC-370 exibiram os menores crescimentos das raízes e os menores índices de tolerância relativa (variando de 1,2 a 1,7), após tratamento em soluções contendo 10 mg L⁻¹ de Al³⁺, diferindo dos demais genótipos, sendo portanto, considerados os menos tolerantes a essa concentração de alumínio.

Experimento 2: Como no experimento 1, os resultados das análises da variância para os crescimentos das raízes e para os índices de tolerância relativa mostraram pelo teste F, efeitos altamente significativos de repetições, concentrações de alumínio, genótipos e interação genótipos x concentrações de alumínio.

Nesse experimento também ocorreu crescimento normal das raízes de todos os genótipos de trigo comum, trigo duro e triticale, medidos após 72 horas de crescimento em soluções nutritivas completas seguido de 48 horas de crescimento nas soluções de tratamento contendo um décimo da concentração de sais das soluções nutritivas completas, com ausência de alumínio nas soluções de tratamento; também verificou-se redução do crescimento das raízes primárias centrais de todos os genótipos à medida que se aumentaram as concentrações de alumínio (Tabela 3).

Os genótipos de trigo duro IAC-1003 e de triticale IAC-5 bem como a cultivar controle Anahuac foram-se sensíveis à presença de 2 mg L⁻¹ de alumínio.

Esses genótipos mais IAC-289 e IAC-370 foram sensíveis à presença de 4, 6 e 8 mg L⁻¹ de alumínio. Além desses já considerados, o genótipo de trigo comum IAC-350 foi mais sensível, com paralisação irreversível do crescimento do meristema apical das raízes, após 48 horas de permanência em soluções de tratamento contendo 10 mg L⁻¹ de alumínio (Tabela 3).

A cultivar controle BH-1146 foi a que exibiu a maior tolerância à presença de 8 e 10 mg L⁻¹ de alumínio porque suas raízes primárias tiveram o maior crescimento diferindo dos demais genótipos estudados após a permanência em soluções de tratamento contendo essas concentrações de alumínio (Tabela 3). Esse fato confirma resultados já publicados (CAMARGO, 1984b; CAMARGO et al., 2000a; LAGOS et al., 1991) nos quais se verificam que essa cultivar tem um par de alelos dominantes para tolerância ao Al³⁺ localizado no cromossomo 4 do genoma D. Verificou-se na cultivar BH-1146 índice de tolerância relativa igual a 5,0 na presença de 8 e 10 mg L⁻¹ de alumínio, somente não diferindo dos genótipos IAC-24 e IAC-378 com índices variando entre 4,1 e 3,6 (Tabela 4).

Tabela 3. Crescimento médio das raízes de 12 genótipos de trigo comum, um genótipo de trigo duro e um genótipo de triticale medido após 72 horas nas soluções nutritivas completas, que se seguiu a 48 horas de permanência nas soluções de tratamento com um décimo da concentração salina da solução completa, contendo seis diferentes concentrações de alumínio (média de 4 repetições)

Genealogia	Concentração de alumínio (mg L ⁻¹)					
	0	2	4	6	8	10
	mm					
Trigo comum (<i>T. aestivum</i> L.)						
IAC-24	68,7 a-d	49,9 bc	34,2 ab	32,4 ab	26,3 b	17,6 b
IAC-289	63,6 d	18,4 e	0,0 e	0,0 f	0,0 e	0,0 d
IAC-350	74,4 a-d	35,2 d	7,0 de	2,0 f	0,6 e	0,0 d
IAC-364	73,1 a-d	45,1 b-d	31,9 a-c	24,0 b-d	20,0 b-d	12,8 b-d
IAC-370	78,1 a-c	15,2 e	0,0 e	0,0 f	0,0 e	0,0 d
IAC-373	72,2 a-d	44,5 b-d	28,6 bc	12,2 d-f	7,1 de	3,8 b-d
IAC-375	67,8 b-d	36,8 cd	18,8 cd	8,7e f	5,7 e	1,9 cd
IAC-376	78,8 a-c	44,9 b-d	18,5 cd	20,6 b-e	11,3 c-e	7,8 b-d
IAC-377	78,1 a-c	54,5 ab	28,0 bc	17,0 c-e	12,3 b-e	4,8 b-d
IAC-378	66,2 cd	44,5 b-d	27,5 bc	25,5 bc	21,4 bc	15,8 bc
BH-1146	82,1 a	68,3 a	44,3 a	41,4 a	40,9 a	30,6 a
Anahuac	74,6 a-d	0,0 f	0,0 e	0,0 f	0,0 e	0,0 d
Trigo duro (<i>T. durum</i> L.)						
IAC-1003	69,4 a-d	0,0 f	0,0 e	0,0 f	0,0 e	0,0 d
Triticale (<i>Triticosecale</i> sp)						
IAC-5	80,4 ab	0,0 f	0,0 e	0,0 f	0,0 e	0,0 d
D.M.S. ⁽¹⁾	14,1					

(¹) Diferença mínima significativa, pelo teste de Tukey, ao nível de 5%, para a comparação das médias dos genótipos de trigo comum, trigo duro e triticale dentro de uma mesma concentração de alumínio. Os genótipos seguidos de uma letra comum dentro de uma mesma concentração de alumínio (coluna) não diferem entre si.

Tabela 4. Índices de tolerância relativa de 12 genótipos de trigo comum, um genótipo de trigo duro e um genótipo de triticales levando-se em consideração o crescimento das raízes após 72 horas em soluções nutritivas completas que se seguiu a 48 horas de permanência em soluções de tratamento com um décimo da concentração salina da solução completa, contendo cinco diferentes concentrações de alumínio (média de 4 repetições)

Genealogia	Concentração de alumínio (mg L ⁻¹)				
	2	4	6	8	10
	n.º				
IAC-24	4,5 ab	4,7 ab	4,9 a	4,1 ab	3,9 ab
IAC-289	2,4 c-e	1,0 e	1,0 d	1,0 e	1,0 e
IAC-350	3,2 b-d	1,7 de	1,2 d	1,1 e	1,0 e
IAC-364	4,1 ab	4,4 ab	3,4 a-c	3,3 b-d	2,7 b-d
IAC-370	2,0 de	1,0 e	1,0 d	1,0 e	1,0 e
IAC-373	4,0 a-c	4,1 ab	2,3 cd	1,8 de	1,6 de
IAC-375	3,6 a-d	3,2 b-d	2,0 cd	1,8 de	1,3 de
IAC-376	3,7 a-c	2,7 cd	3,2 bc	2,2 c-e	2,1 c-e
IAC-377	4,3 ab	3,6 a-c	2,7 bc	2,2 c-e	1,7 de
IAC-378	4,2 ab	3,9 a-c	4,1 ab	3,6 a-c	3,6 a-c
BH-1146	5,0 a	5,0 a	5,0 a	5,0 a	5,0 a
Anahuac	1,0 e	1,0 e	1,0 d	1,0 e	1,0 e
Trigo duro (<i>T. durum</i> L.)					
IAC-1003	1,0 e	1,0 e	1,0 d	1,0 e	1,0 e
Triticales (<i>Triticosecale</i> sp)					
IAC-5	1,0 e	1,0 e	1,0 d	1,0 e	1,0 e
D.M.S. ⁽¹⁾	1,7				

(¹) Diferença mínima significativa, pelo teste de Tukey, ao nível de 5%, para a comparação das médias dos genótipos de trigo comum, trigo duro e triticales dentro de uma mesma concentração de alumínio. Os genótipos seguidos de uma letra comum dentro de uma mesma concentração de alumínio (coluna) não diferem entre si.

Os genótipos tolerantes de trigo comum IAC-24 e IAC-378 foram obtidos por seleção genealógica realizada durante vários ciclos, a partir de populações provindas de cruzamentos envolvendo genótipos brasileiros, com tolerância à toxicidade de alumínio, adaptados às condições de sequeiro e de cultivo em solo ácido e linhagens obtidas no CIMMYT, México. Essas, normalmente, são de grande potencial produtivo, porém sensíveis à toxicidade de alumínio por não sofrerem pressão de seleção para essa característica, pois os solos onde foram selecionadas são alcalinos (CAMARGO, 1993).

Os genótipos IAC-289, IAC-350, IAC-370, IAC-373, IAC-375 e Anahuac, os mais sensíveis entre os

avaliados, foram introduzidos do CIMMYT, México (Tabela 4). Pelos resultados, verifica-se que o método utilizado no IAC para a seleção de genótipos tolerantes ao Al³⁺ foi eficiente, quando comparado com as linhagens selecionadas no CIMMYT, México, onde não houve pressão de seleção para tolerância ao Al³⁺.

Os genótipos IAC-24 e IAC-378 devem se destacar em solos ácidos considerando-se a existência de alta associação entre as respostas de genótipos de trigo para a toxicidade de alumínio em soluções nutritivas e produção de grãos em solos ácidos (MISTRO et al., 2001; CAMARGO et al., 2001 e 2003; BAIER et al., 1995).

As médias de crescimento das raízes dos genótipos após permanência de 48 horas em soluções de tratamento contendo alumínio, porém, com um quinto da concentração salina das soluções nutritivas completas (Tabela 1), foram maiores em relação às médias dos mesmos genótipos após permanência de 48 horas em soluções de tratamento contendo alumínio porém com um décimo da concentração das soluções completas (Tabela 3). Esses dados concordam com os obtidos por CAMARGO et al., 1981, nos quais se verificou como tendência geral, a diminuição do crescimento das raízes de genótipos de trigo tolerantes à toxicidade de Al^{3+} com a redução da concentração salina das soluções nutritivas de tratamento (1/5 para 1/10 da concentração da solução completa) contendo uma determinada concentração de alumínio. Esse fato foi explicado por ALI (1973) como devido à menor proteção do meristema apical das raízes exercida pelos cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Na^+ contra os efeitos adversos do Al^{3+} . Na ausência de Al^{3+} , as raízes crescem mais na presença de teores adequados de macro e micronutrientes, pois não há limitações devido à redução da disponibilidade de nutrientes.

4. CONCLUSÕES

1. A cultivar controle Anahuac e os genótipos de trigo duro IAC-1003 e de triticale IAC-5 foram os mais sensíveis à toxicidade de alumínio, independentemente dos níveis de Al^{3+} e das concentrações salinas das soluções de tratamento. Os genótipos de trigo comum IAC-289, IAC-350 e IAC-370 foram também sensíveis à toxicidade de alumínio, principalmente quando os níveis de Al^{3+} aumentaram de 2 a 10 mg L⁻¹ e empregaram-se soluções de tratamento com um décimo da concentração salina da solução normal.

2. Os genótipos IAC-24 e IAC-378 e a cultivar-controle BH-1146 destacaram-se pela tolerância à toxicidade de Al^{3+} , com potencial para uso em solos ácidos e como fontes genéticas de tolerância nos futuros cruzamentos.

3. Os sintomas de toxicidade de alumínio podem ser obtidos aumentando a concentração de alumínio ou diminuindo as concentrações de sais da solução nutritiva para todos os genótipos estudados.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro ao projeto e pela concessão de bolsa de produtividade científica.

Aos Técnicos de Apoio à Pesquisa Carlos Aparecido Fernandes e José Roberto Cassanelli Junior, bolsistas do CNPq, pelo auxílio na realização do trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALI, S.M.E. **Influence of cations on aluminum toxicity in wheat (*Triticum aestivum* Vill., Host)**, 1973. 102f. Thesis (Doctor of Philosophy) - Oregon State University, Corvallis.
- BAIER, A.C.; SOMERS, D.J.; GUSTAFSON, J.P. Aluminum tolerance in wheat: correlating hydroponic evaluations with field and soil performances. **Plant Breeding**, Hamburg, v.114, p. 291-296, 1995.
- CAMARGO, C.E. de O. O pH das soluções nutritivas no comportamento de cultivares de trigo à toxicidade de alumínio. **Bragantia**, Campinas, v.43, n.2, p. 327-335, 1984a.
- CAMARGO, C.E. de O. Melhoramento do trigo: VI. Hereditabilidade da tolerância a três concentrações de alumínio em solução nutritiva. **Bragantia**, Campinas, v.43, p.279-291, 1984b.
- CAMARGO, C.E. de O. A concentração de fósforo na tolerância de cultivares de trigo à toxicidade de alumínio em soluções nutritivas. **Bragantia**, Campinas, v.44, n.1, p.49-64, 1985.
- CAMARGO, C.E. de O. Trigo. In: FURLANI, A.M.C.; VIEGAS, G.P. (Ed.) **O melhoramento de plantas no Instituto Agrônomo**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1993. cap.12, p.433-488.
- CAMARGO, C.E. de O.; FELICIO, J.C. Tolerância de cultivares de trigo, triticale e centeio em diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva. **Bragantia**, Campinas, v.43, n. 1, p.9-16, 1984.
- CAMARGO, C.E. de O.; FELICIO, J.C.; FERREIRA-FILHO, A.W.P. Triticale: tolerância ao alumínio em solução nutritiva. **Bragantia**, Campinas, v.50, n. 2, p.323-330, 1991.
- CAMARGO, C.E. de O.; FELICIO, J.C.; FERREIRA-FILHO, A.W.P.; BARROS, B. de C.; PEREIRA, J.C.V.N.A.; PETTINELLI-JUNIOR, A. Comportamento agrônomo de linhagens de trigo no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.60, p.35-44, 2001.
- CAMARGO, C. E. de O.; FELICIO, J.C.; FREITAS, J.G. de; FERREIRA-FILHO, A. W. P. Trigo duro: tolerância à toxicidade de alumínio, manganês e ferro em soluções nutritivas. **Bragantia**, Campinas, v.54, n. 2, p.371-383, 1995.
- CAMARGO, C. E. de O.; FELICIO, J.C.; ROCHA JUNIOR, L.S. Trigo: tolerância ao alumínio em solução nutritiva. **Bragantia**, Campinas, v.46, p.183-190, 1987.
- CAMARGO, C. E. de O.; FERREIRA-FILHO, A. W. P. São Paulo State Brazil Wheat Pool. In: BONJEAN, A. P.; ANGUS, W. J. (Ed). **The world wheat book: a history of wheat breeding**. Paris: Lavoisier, 2000. Cap. 21, p.549-577.

- CAMARGO, C.E. de O.; FERREIRA-FILHO, A.W.P.; FREITAS, J.G. Avaliação de genótipos de centeio, triticale, trigo comum e trigo duro quanto à tolerância ao alumínio em solução nutritiva. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.55, p.227-232, 1998.
- CAMARGO, C.E. de O.; FERREIRA-FILHO, A.W.P.; RAMOS, L.C. da S.; PETTINELLI-JUNIOR, A.; CASTRO, J.L. de.; FELICIO, J.C.; SALOMON, M.V.; MISTRO, J.C. Comportamento de linhagens diaplóides de trigo em dois locais do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.62, n. 2, p.217-226, 2003.
- CAMARGO, C.E. de O.; OLIVEIRA, O.F. de. Tolerância de cultivares de trigo a diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva e no solo. **Bragantia**, Campinas, v.40, p.21-31, 1981.
- CAMARGO, C.E. de O.; OLIVEIRA, O.F.; LAVORENTI, A. Efeito de diferentes concentrações de sais na solução nutritiva na tolerância de cultivares de trigo à toxicidade de alumínio. **Bragantia**, Campinas, v.40, p. 93-101, 1981.
- CAMARGO, C.E. de O.; TULMANN-NETO, A.; FERREIRA-FILHO, A.W.P.; FELICIO, J.C. Genetic control of aluminum tolerance in mutant lines of the wheat cultivar Anahuac. **Euphytica**, Dordrecht, v.114, p.47-53, 2000.
- CAMARGO, C.E. de O.; TULMANN-NETO, A.; FERREIRA-FILHO, A.W.P.; FELICIO, J.C.; CASTRO, J.L. de.; PETTINELLI-JUNIOR, A. Novos genótipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) obtidos por irradiação gama. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.54, p.195-202, 1997.
- CAMPBELL, L.G.; LAFAEVER, H.N. Correlation of field and nutrient culture techniques of screening wheat for aluminum tolerance. In: WORKSHOP ON PLANT ADAPTATION TO MINERAL STRESS IN PROBLEM SOILS, 1976, Beltsville. **Proceedings...** Ithaca: Cornell University, 1976. p.277-286.
- FOY, C.D.; ARMIGER, W.H.; BRIGGLE, L.W.; REID, D.A. Differential aluminum tolerance of wheat and barley varieties in acid soils. **Agronomy Journal**, Madison, v.57, p. 413-417, 1965.
- LAGOS, M.B.; FERNANDES, M.I.B. de M.; CAMARGO, C.E. de O.; FEDERIZZI, L.C.; CARVALHO, F.I.F. de. Genetics and monosomic analysis of aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Revista Brasileira de Genética**, Ribeirão Preto, v.14, n. 4, p.1011-1020, 1991.
- MISTRO, J.C.; CAMARGO, C.E. de O.; PETTINELLI-JUNIOR, A. Avaliação de genótipos de trigo, de diferentes origens, em relação à toxicidade de alumínio. **Bragantia**, Campinas, v.60, n. 3, p.177-184, 2001.
- MOORE, D.P. Physiological effects of pH on plant roots. In: CARSON, E.W. (Ed.). **The plant root and its environment**. Charlottesville, VA: University Press of Virginia, 1974. p.135-151.
- MOORE, D.P.; KRONSTAD, W.E.; METZGER, R.J. Screening wheat for aluminum tolerance. In: WORKSHOP ON PLANT ADAPTATION TO MINERAL STRESS IN PROBLEM SOILS, Beltsville, 1976. **Proceedings...** Ithaca: Cornell University, 1976. p.287-295.
- REID, D.A.; JONES, G.D.; ARMIGER, W.H.; FOY, C.D.; KOCH, E.J.; STARLING, D.A. Differential aluminum tolerance of winter barley varieties and selections in associated greenhouse and field experiments. **Agronomy Journal**, Madison, v.61, p. 218-221, 1969.
- SALOMON, M.V. **Trigo: avaliação de linhagens diaplóides obtidas via cultura de anteras**. 2001. 91f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, Piracicaba.
- TULMANN NETO, A.; CAMARGO, C.E. de O.; ALVES, M.C.; CASTRO, J.L. de; GALLO, P.B. Indução de mutação visando a redução de altura de planta e resistência às doenças no cultivar de trigo (*Triticum aestivum* L.) IAC-17. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.52, n.2, p.287-293, 1995a.
- TULMANN NETO, A.; CAMARGO, C.E. de O.; ALVES, M.C.; SANTOS, R.R. dos; FREITAS, J.G. de. Indução de mutação visando a obtenção de resistência às doenças na cultivar de trigo IAC-24. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n.4, p.497-504, 1995b.
- TULMANN NETO, A.; CAMARGO, C.E. de O.; CASTRO, J.L. de; FERREIRA FILHO, A.W.P. New Wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes tolerant to aluminum toxicity obtained by mutation breeding. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.1, p.61-70, 2001.
- TULMANN NETO, A.; CAMARGO, C.E. de O.; PETTINELLI JUNIOR, A.; FERREIRA FILHO, A.W.P. Plant height reduction and disease resistance in wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivar IAC-18 by gamma irradiation-induced mutations. **Revista Brasileira de Genética**, Ribeirão Preto, v.19, n.2, p.275-281, 1996.