

AVALIAÇÃO DE ÍNDICES FENOTÍPICOS DE MILHO À TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO

Celso Henrique Moreira Coelho¹ e Silvane Vestena²

RESUMO: Objetivou-se avaliar a eficiência do comprimento inicial da raiz seminal (CIRS), comprimento final da raiz seminal (CFRS), comprimento líquido da raiz seminal (CLRS) e comprimento relativo da raiz seminal (CRRS) como indicadores fenotípicos quanto à tolerância ao alumínio na avaliação de plantas de milho. Plântulas de genótipos tolerantes e sensíveis ao alumínio foram submetidas à solução nutritiva diluída contendo nível tóxico deste elemento, por um período de cinco dias, sendo que CIRS foi determinado um dia depois das plântulas terem aclimatado na solução sem alumínio e os outros parâmetros determinados no término do experimento. Os resultados obtidos mostraram que os valores médios de CLRS, CRRS e taxa de sobrevivência foram capazes de discriminar genótipos tolerantes dos sensíveis. O nível de 5 $\mu\text{M-Al}$ foi suficiente para distinguir os materiais, indicando com isso, uma concentração adequada para uso em futuros programas de melhoramento de milho buscando tolerância ao alumínio. O parâmetro mais eficiente para detectar diferenças de materiais quanto tolerância ao alumínio foi o CLRS.

PALAVRAS-CHAVE: *Zea mays*, tolerância ao alumínio, solução nutritiva.

EVALUATION OF PHENOTYPIC INDEX OF *Zea mays* L. TO THE TOLERANCE OF ALUMINUM

ABSTRACT: The aim was to evaluate the efficiency of the initial length of seminal root (CIRS), final length of seminal root (CFRS), liquid length of seminal root (CRRS) as phenotypes indicators as to the tolerance of aluminum in the evaluation of corn plants. Genotypes seedlings tolerant and sensible to aluminum were submitted to the nutritive solution dissolved containing toxic level of this element, for a period of five days, being that CIRS was determined one day after the seedlings had acclimated in the solution without aluminum and the other parameters determined at the end of the experiment. The results obtained showed that the medium values of CLRS, CRRS and tax of survival were able to discriminate tolerant genotypes from the sensible ones. The level of 5 $\mu\text{M-Al}$ was enough to distinguish the materials, indicating with this, a suitable concentration for the use in future programs of improvement of corn looking for tolerance of aluminum. The most efficient parameter to detect differences of materials as to tolerance to aluminum was the CLRS.

KEYWORDS: *Zea mays*, aluminum of tolerance, nutrient solution.

¹ Mestre em Fitotecnia – Departamento de Solos e Nutrição Mineral – Universidade Federal de Viçosa – UFV – 36570-000, Viçosa, MG. ² Doutora em Fisiologia Vegetal pela Universidade Federal de Viçosa – UFV – Professora da Universidade Federal do Pampa – UNIPAMPA - , São Gabriel, RS -. E-mail: svestena@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

No Brasil os solos ácidos encontram-se principalmente na região do Cerrado, ocupando uma área em torno de 20% do território nacional, que corresponde a 205 milhões de hectares, dos quais 175 milhões estão localizados no Brasil Central. Os Estados de Goiás, Mato Grosso e Minas Gerais respondem por 73% desta área (BLAMEY et al., 1992). Atualmente, apenas 12 milhões de hectares do Cerrado brasileiro são utilizados para a agricultura, sendo 3,5 milhões de hectares cultivados com milho. Entretanto, essa taxa de utilização é muito baixa, considerando-se que aproximadamente 112 milhões de hectares do Cerrado são adequados para produção agrícola auto-sustentável (GAMA et al., 1996).

Além disso, no Brasil, o plantio de culturas importantes já está ocorrendo em grande parte dos solos sob cerrado, que se caracteriza pela existência de problemas de deficiência e, ou toxidez nutricional, baixa capacidade de retenção de água e baixa atividade de microrganismos benéficos, resultando numa menor produtividade (FAGERIA e STONE, 1999; SILVA e MALAVOLTA, 2000).

O alumínio, na região do Cerrado, é o metal presente em maior abundância no solo e tem sido extensivamente, relatado como um dos principais agentes relacionados com a baixa produtividade em cereais (ISHIKAWA e WAGATSUMA, 1998; SILVA et al., 2006). Segundo Kochian (1995), o alumínio tem prejudicado mais de 40% das terras agricultáveis em todo o mundo.

É um dos metais, presente quase sempre, na forma de alumino-silicato, que

facilmente libera Al^{+3} , um íon fitotóxico, aumentando, assim, o problema da acidez do solo (MOFFAT, 1999). Após ter sido liberado pela dissolução das argilas, por efeito de vários fatores do solo, pode tornar-se disponível para as raízes em concentrações elevadas, que resultam em vários tipos de injúrias nas plantas (KOCHIAN, 1995). Apresenta-se sob diferentes formas, dependendo do pH e, em valores de pH abaixo de 5,0 a forma predominante e, aparentemente mais tóxica, é a forma de íon trivalente positiva (Al^{+3}) (MARSCHNER, 1995).

A calagem é uma prática que possibilita minimizar este problema e que contribui para elevar o pH, principalmente na camada arável do solo, tornando o alumínio menos solúvel e, portanto reduzindo sua toxicidade (SILVA e MALAVOLTA, 2000). No entanto, muitas vezes esta prática não é realizada, por não estar ao alcance econômico dos produtores (PANDEY et al., 1994; ZEIGLER et al., 1995). Além disso, existe dificuldade técnica de realizar a calagem abaixo da camada arável, uma vez que o excesso de alumínio trocável torna-se especialmente prejudicial no subsolo, porque reduz a profundidade e a ramificação do sistema radicular, tornando as plantas suscetíveis a outros tipos de estresses, como, por exemplo, a seca (KENNEDY et al., 1987).

Desta forma, o desenvolvimento de materiais tolerantes ao estresse provocado pelo alumínio constitui uma alternativa ecologicamente compatível, de custo relativamente baixo, podendo proporcionar ganhos estáveis de produtividade (DUQUE-VARGAS et al., 1994), além de reduzir os riscos da produção nestes solos (LOPES et al., 1987). Entretanto, a seleção para

tolerância ao alumínio somente ao nível de campo é complicada pela desuniformidade desses solos e pela dificuldade de avaliar danos nas raízes, o que determina erros significativos na identificação de genótipos tolerantes. Neste sentido, é importante desenvolver métodos eficientes de caracterização da tolerância ao alumínio em condições controladas de ambiente (MAZZOCATO et al., 2002). Então, o emprego de solução nutritiva e alumínio em cultivo hidropônico permitem imediata observação dos efeitos pela inibição do crescimento da raiz, evitando os inconvenientes do uso de solo, onde a intensidade de seleção não pode ser quantitativamente controlada (BERTAN et al., 2005; SILVA et al., 2006).

Um dos melhores índices para avaliar a tolerância ao alumínio em milho tem sido definido pelo crescimento da raiz seminal de plântulas desenvolvidas em solução nutritiva. O teste em solução nutritiva é conveniente, pois permite maior controle experimental e apresenta as seguintes vantagens: rapidez, menor custo operacional, maior facilidade de avaliação e satisfatória eficiência (PATERNIANI e FURLANI, 2002; HARTWIG et al., 2007). Os resultados em solução nutritiva devem ser então corroborados com o comportamento dos cultivares em campo, uma vez que se considera nessa avaliação apenas o excesso de alumínio (PATERNIANI e FURLANI, 2002).

Segundo Paterniani et al. (2000), o programa da Embrapa visando ao desenvolvimento de genótipos de milho adaptados a solos ácidos baseia-se no binômio tolerância ao alumínio em solução nutritiva e produção em solos ácidos e férteis. Esses autores ressaltam que a seleção

no campo é feita para um complexo determinante de solo ácido, havendo outros fatores envolvidos, além da concentração de alumínio.

Em razão da rápida expansão das fronteiras agrícolas brasileiras e da utilização cada vez mais intensa de solos do cerrado, a seleção de genótipos de milho em solução nutritiva com tolerância ao alumínio apresenta-se como alternativa para melhor exploração destas áreas.

Assim, teve-se como objetivo avaliar índices fenotípicos de comprimento de raiz seminal de plantas de milho (*Zea mays* L.) quanto à tolerância ao alumínio.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Solos e no Laboratório de Nutrição Mineral do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa no período de agosto a dezembro de 2003.

Foram utilizados três materiais: um híbrido simples P33F88 e duas variedades de polinização livre, a UFVM-100 e CMS-36, sendo esta considerada tolerante ao alumínio (PARENTONI, 1996). Incluiu-se, ainda, neste experimento, o fator nível de alumínio, utilizando-se as seguintes concentrações: 1, 2,5, 5, 10 e 25 $\mu\text{M-Al}$ e controle (0 $\mu\text{M-Al}$). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com parcelas subdivididas, três repetições, sendo o fator nível de alumínio a parcela e, genótipos as subparcelas, com seis plantas cada. Esses materiais foram fornecidos pela Universidade Federal de Viçosa e Embrapa Milho e Sorgo (CNPMS), sendo ambos escolhidos com base em ensaios

preliminares realizados em campo e casa de vegetação.

As sementes foram previamente desinfestadas em hipoclorito de sódio a 5% por 5 minutos, efetuando-se, posteriormente, cinco lavagens sucessivas, sendo colocadas para germinar em rolos de papel de germinação. As sementes foram colocadas para germinar em bandejas contendo solução de CaSO_4 na concentração de 10 mM. Foram efetuados testes preliminares em laboratório para verificação da viabilidade e do vigor da germinação das sementes. Ainda, foi feita semeadura de uma quantidade de sementes que permitisse uma padronização do tamanho das raízes.

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, sendo as plantas acondicionadas em bandejas de plástico, constituindo três repetições com seis plantas cada, contendo 10 litros de água deionizada e após 24 horas de aclimatação, mediu-se o comprimento inicial da raiz seminal (CIRS) e aplicou-se cálcio na forma de CaCl_2 na concentração de 1 mM em todas as bandejas e os níveis de alumínio: 0, 1, 2,5, 5, 10 e 25 μM , aplicados na forma de AlCl_3 , e sob aeração constante. Durante os cinco dias de condução do experimento em solução

mínima (solução de CaSO_4 na concentração de 10 mM), realizaram-se diariamente, em todas as bandejas, leituras de pH da solução nutritiva. Os ajustes de pH da solução foram corrigidos com NaOH e HCl. Após este período foi realizada a medição do comprimento final da raiz seminal (CFRS).

Os dados de comprimento inicial da raiz seminal (CIRS) e comprimento final da raiz seminal (CFRS) foram utilizados para calcular o comprimento líquido da raiz seminal (CLRS), que foi determinado subtraindo-se o comprimento inicial do comprimento final. Calculou-se também o comprimento relativo da raiz seminal (CRRS), dividindo-se o CLRS pelo CIRS (MAGNAVACA, 1982). Todos estes parâmetros foram utilizados para a realização de análises de variância (ANOVA) e as médias, comparadas pelo teste Tukey a 5% de probabilidade (BEIGUELMAN, 2002), com base nos valores fenotípicos de medição de seis plantas em cada um dos tratamentos avaliados. Avaliou-se também a taxa de crescimento (TC) da raiz seminal, conforme a seguir:

$$TC = 1 - \frac{[\text{CRRS} (0 \mu\text{M Al}) - \text{CRRS} (1, 2,5, 5, 10, 25 \mu\text{M Al}) * 100]}{\text{CRRS} (0 \mu\text{M Al})}$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O desenvolvimento de um método eficiente para caracterizar genótipos com tolerância ao alumínio é o primeiro passo para a realização de estudos de mecanismos genéticos envolvidos na herança desse caráter. No caso de gramíneas, há um

consenso de que características baseadas no desenvolvimento do sistema radicular (CIRS, CFRS, CLRS e CRRS) são os melhores critérios para a avaliação da tolerância (MARTINS et al., 1999).

O CIRS é uma característica fenotípica de vital importância em programas de melhoramento de milho visando tolerância

ao alumínio, principalmente quando avalia populações em que a variabilidade intra-varietal é grande.

Neste sentido, verificou-se para CIRS, que existiram efeitos significativos para genótipos, em que a variedade UFVM-100, apresentou os maiores valores e o híbrido P33F88 os menores valores (Tabela 1). Já dentro da cada material não houve diferença

significativa, o que é uma observação de grande importância, indicando alta precisão na seleção de plântulas, com uma variação máxima de 1,6, 1,0 e 1,5 cm entre plântulas para UFVM-100, P33F88 e CMS-36, respectivamente (Tabela 1). Os coeficientes de variação para este índice fenotípico avaliado foram de cerca de 7%, o que confirma também boa precisão experimental.

Tabela 1. Médias para crescimento inicial da raiz seminal (CIRS) (cm) em três genótipos de milho submetidos a seis níveis de Al^{3+} , cultivados por cinco dias em solução diluída na casa de vegetação do Departamento de Solos/UFV, Viçosa, 2003.

CIRS Genótipos	Doses de alumínio ($\mu M Al^{3+}$)						CV (%)
	0	1	2,5	5	10	25	
UFVM-100	21,6 Aa	20,5 Aa	21,1 Aa	19,4 Aa	21,3 Aa	19,0 Aa	6,8
P33F88	16,8 Ba	16,2 Ba	16,4 Ba	16,5 Ba	15,8 Ba	16,7 Aa	5,8
CMS-36	17,6 Ba	18,3 Aa	18,3 Ba	19,1 Aa	18,8 Aa	18,7 Aa	6,6
CV (%)	7,35						

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula nas colunas, para genótipos, e minúscula nas linhas entre doses, não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Já para CFRS, houve redução do comprimento final com aumento do nível de alumínio para todos os genótipos avaliados (Tabela 2), sendo novamente os maiores valores para a variedade UFVM-100 e os menores para P33F88. Isso se deve ao fato do primeiro material ter apresentado o maior tamanho inicial de raiz, enquanto o híbrido o menor no momento da transferência para as bandejas, devido à diferença de vigor entre os materiais. Vale ressaltar, que no nível de 5 $\mu M-Al$, foi importante para discriminar os genótipos, havendo neste um decréscimo de 8,0, 3,7 e 1,4 cm para UFVM-100, P33F88 e CMS-36, respectivamente em relação ao nível de 2,5 μM , o que determina tolerância ao alumínio para

esta última variedade em relação aos outros dois materiais (Tabela 2). O resultado obtido está de acordo com Parentoni (1996) e Lopes et al. (1987), que, trabalhando com populações de milho e seus cruzamentos para tolerância à toxidez de alumínio em solução nutritiva, indicaram a variedade CMS-36 como sendo tolerante ao alumínio. No presente trabalho, os maiores decréscimos, foram verificados na dose 25 μM em relação ao controle, apresentando valores de 15,4, 10,4 e 11,0 para UFVM-100, P33F88 e CMS-36, respectivamente (Tabela 2). O coeficiente de variação para este parâmetro fenotípico oscilou entre 4,8 e 7,8%, indicando também boa precisão experimental.

Tabela 2. Médias para crescimento final da raiz seminal (CFRS) (cm) em três genótipos de milho submetidos a seis níveis de Al^{3+} , cultivados por cinco dias em solução diluída na casa de vegetação do Departamento de Solos/UFV, Viçosa, 2003.

CFRS	Doses de alumínio ($\mu M Al^{3+}$)						CV (%)
Genótipos	0	1	2,5	5	10	25	
UFVM-100	36,7 Aa	35,9 Aa	35,3 Aa	27,3 Ab	25,4 Abc	21,3 Ac	7,1
P33F88	28,0 Ca	27,3 Ca	25,6 Ca	21,9 Bb	18,1 Bc	17,6 Ac	4,8
CMS-36	32,0 Ba	31,0 Ba	31,3 Ba	29,9 Aa	23,4 Ab	21,0 Ab	7,8
CV (%)	6,39						

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula nas colunas, para genótipos, e minúscula nas linhas entre doses, não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Com relação ao índice fenotípico de CLRS (Tabela 3), observou-se que este também possibilitou a discriminação entre o material tolerante (CMS-36) e sensível (P33F88). Similar ao parâmetro anterior, com aumento da dose de alumínio, ocorreu uma redução no CLRS para todos os genótipos estudados, sendo que em todos os níveis de alumínio, os maiores valores de CLRS foram verificados na variedade CMS-36, com exceção dos níveis 1 e 2,5 $\mu M-Al$, enquanto os menores foram observados no híbrido P33F88. Novamente, o

nível de 5 $\mu M-Al$, foi o melhor tratamento para discriminar o genótipo tolerante do sensível, em que houve uma redução no CLRS de 44, 41 e 17% em relação ao nível de 2,5 μM para UFVM-100, P33F88 e CMS-36, respectivamente, indicando desta forma, a tolerância do CMS-36 em relação aos outros dois materiais. Ainda nesta dose, o decréscimo do CLRS foi de 3,4 e 5,9 cm para UFVM-100 e P33F88 respectivamente, em relação ao CMS-36 (Tabela 3).

Tabela 3. Médias para crescimento líquido da raiz seminal (CLRS) (cm) em três genótipos de milho submetidos a seis níveis de Al^{3+} , cultivados por cinco dias em solução diluída na casa de vegetação do Departamento de Solos/UFV, Viçosa, 2003.

CLRS	Doses de alumínio ($\mu M Al^{3+}$)						CV (%)
Genótipos	0	1	2,5	5	10	25	
UFVM-100	16,1 Aa	15,4 Aa	14,2 Aa	7,9 Bb	4,1 ABc	1,3 Ac	12,1
P33F88	11,1 Ba	11,1 Ba	9,2 Ba	5,4 Cb	2,3 Bc	0,9 Ac	14,3
CMS-36	14,3 Aa	13,6 Aa	13,0 Aa	11,3 Aa	4,7 Ab	2,4 Ab	20,5
CV (%)	10,53						

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula nas colunas, para genótipos, e minúscula nas linhas entre doses, não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

Observou-se também a importância do índice fenotípico da CRRS, para discriminar genótipo tolerante do sensível. Semelhante aos dois parâmetros avaliados anteriormente (CFRS e CLRS), o nível de 5 $\mu M-Al$ também

foi suficiente para determinar o genótipo tolerante e sensível (Tabela 4), o que indica que este nível em questão já é suficiente para causar um estresse e, portanto, um decréscimo significativo no crescimento do sistema radicular

de materiais sensíveis. No entanto, Faria et al. (2003), trabalhando com seis níveis de alumínio, em solução diluída consideraram como adequada para discriminar genótipo tolerante do sensível, a dose de 2,5 $\mu\text{M-Al}$.

Tabela 4. Médias para crescimento relativo da raiz seminal (CRRS) (cm) em três genótipos de milho submetidos a seis níveis de Al^{3+} , cultivados por cinco dias em solução diluída na casa de vegetação do Departamento de Solos/UFV, Viçosa, 2003.

CRRS	Doses de alumínio ($\mu\text{M Al}^{3+}$)						CV (%)
	0	1	2,5	5	10	25	
UFVM-100	0,75 Aa	0,76 Aa	0,68 Aa	0,41 Bb	0,19 Ac	0,072 Ac	13,3
P33F88	0,66 Aa	0,68 Aa	0,56 Aa	0,32 Bb	0,15 Abc	0,053 Ac	18,4
CMS-36	0,81 Aa	0,75 Aa	0,71 Aa	0,59 Aab	0,25 Abc	0,13 Ac	22,7
CV (%)	14,22						

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula nas colunas, para genótipos, e minúscula nas linhas entre doses, não diferem entre si, pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.

É importante lembrar que no nível de 25 $\mu\text{M-Al}$, só não houve diferença significativa, devido a um coeficiente de variação mais alto (14,22), pois é claro a diferença da variedade CMS-36 (tolerante) em relação aos outros dois materiais (Tabela 4). Ainda, as médias para todas as variáveis analisadas mostraram a diferença entre a variedade CMS-36 (tolerante) e o híbrido P33F88 (sensível), confirmando sua maior tolerância ao alumínio em níveis elevados na solução tratamento (Tabelas 1, 2, 3 e 4).

O coeficiente de variação para CLRS foi menor que CRRS, o que sugere maior acurácia daquele parâmetro para avaliação do caráter tolerância ao alumínio, o CLRS, também, não esteve associada com a variável CIRS. De acordo com as constatações relatadas anteriormente acima, Sawazaki e Furlani (1987), trabalhando com essas mesmas variáveis obtiveram dados de correlação demonstrando que o crescimento líquido da radícula (CLRS) foi o menos afetado pelo crescimento inicial em solução nutritiva. Os autores citados, também, consideraram o CLRS como a característica mais eficiente para

discriminar genótipos de milho quanto ao grau de tolerância ao alumínio. Ainda, Prioli (1987) verificou que o CLRS foi mais eficiente, quando comparado ao CRRS por apresentar menor coeficiente de variação. Segundo Mazzocato (2002), a variável CLRS foi a mais eficiente para a detecção da tolerância ao alumínio por não estar associada com a variável CIRS. Por outro lado, autores como Magnavaca e Bahia Filho (1995) e Martins et al. (1999) utilizaram o comprimento relativo da raiz seminal (CRRS) para avaliar a tolerância ao alumínio, demonstrando ser a única variável que considerava diferenças de vigor de plântula entre genótipos testados e que apresentava os menores coeficientes de variação nos ensaios.

Andrade junior et al. (2005) avaliando a tolerância a alumínio de dois genótipos de sorgo comprovaram que o crescimento relativo de raízes foi mais eficiente em relação ao acúmulo de alumínio em ápices radiculares na discriminação das diferenças entre as duas cultivares e, Paterniani e Furlani (2002) avaliando a tolerância à toxicidade de alumínio de linhagens e híbridos de milho em solução nutritiva também comprovaram que o um dos

melhores índices para avaliar a tolerância ao alumínio em milho tem sido definido pelo crescimento da raiz seminal das plântulas, sendo isso também verificado com outros trabalhos de Cambraia et al. (1991) e Vicente et al. (1998).

A inibição do crescimento de raízes é tida como a principal causa da fitotoxicidade do alumínio, resultando em menor volume de solo explorado pela planta, reduzindo conseqüentemente, a nutrição mineral e a absorção de água. Essa redução de crescimento ocorre, basicamente, em função de sua ação danosa ao se ligar a componentes das membranas celulares, reduzindo sua permeabilidade, à redução da atividade de replicação e transcrição, devido à ligação do alumínio ao grupo fosfato de ácido desoxirribonucléico (DNA) (MALAVOLTA et al., 1997; ANDRADE JUNIOR et al., 2005).

No que diz respeito a taxa de sobrevivência, a variedade CMS-36 apresentou,

em solução nutritiva, valores bem maiores que os demais materiais, sendo de 88, 79 e 93% para UFVM-100, P33F88 e CMS-36, respectivamente (Figura 1), no nível de 2,5 μM . Por mais uma vez o nível de 5 μM -Al foi bastante adequado para discriminar os genótipos UFVM-100, P33F88 e CMS-36, com uma taxa de sobrevivência de 49, 45 e 78%, respectivamente e, desta forma, uma diferença da variedade CMS-36 (tolerante) para o híbrido (sensível) de 33% (Figura 1). A partir do nível de 10 μM -Al houve uma tendência de comportamento semelhante dos três materiais, cabendo ressaltar que no nível de 25 μM -Al considerado bastante tóxico os valores obtidos foram de 17% para a variedade CMS-36 e os mesmos valores para UFVM-100 e P33F88 ficando em torno de 8% (Figura 1), o que se verifica uma redução na taxa de sobrevivência de 106% desses dois últimos materiais em relação ao CMS-36.

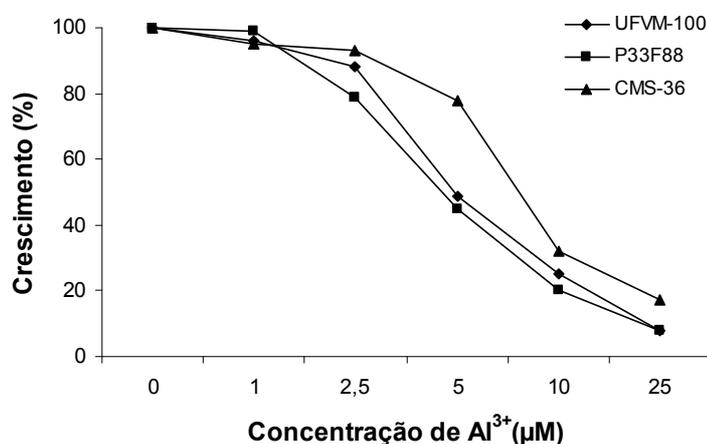


Figura 1. Taxa de crescimento da raiz seminal (%) em genótipos de milho tolerante e sensível ao alumínio, avaliados em solução nutritiva diluída contendo 0, 1, 2,5, 5, 10 e 25 μM de Al^{3+} . As porcentagens foram calculadas com valores médios tomados de seis plântulas.

Vale lembrar que neste estudo, pelo fato de um dos materiais ser híbrido, espera-se que as variações fossem em sua maior parte fenotípicas, resultantes de efeitos ambientais. Entretanto, com relação às variedades UFVM-100 e CMS-36, além de efeitos ambientais há também variabilidade genética intra-varietal, por tratar de materiais de polinização livre.

É confirmado que o alumínio, tão logo absorvido pelas plantas, tende a se acumular preferencialmente no ápice radicular, promovendo inibição do alongamento radicular. Isto tem sido interpretado, por alguns pesquisadores, um indicativo de ser esta região, o sítio principal da ação inibitória do alumínio sobre o crescimento radicular (DELHAIZE et al., 1993; SAMUELS et al., 1997). Além disso, o ápice radicular parece possuir um papel na percepção da presença do alumínio e no desencadeamento de mecanismos de tolerância

(RENGEL, 1996). Em estudos realizados por Moffat (1999) foi verificado que, o alumínio além de induzir maior produção de calose no ápice radicular de cultivares de feijão induziu, também, a formação de calose na interface entre a parede celular e a membrana plasmática, principalmente ao longo do plasmodesma, bloqueando-o e, interrompendo, assim, a comunicação intercelular.

Recomenda-se, a complementação dos testes laboratoriais com ensaios de campo para confirmar se há correlação entre a metodologia utilizada e a tolerância ou a sensibilidade dos materiais ao alumínio e, indiretamente, a solos ácidos, visto que o objetivo maior deste é a determinação de metodologia para a identificação de genótipos promissores para a obtenção de bons níveis produtivos em condições de solos ácidos.

4. CONCLUSÕES

Conforme os resultados obtidos no experimento pode-se concluir que o método empregado permitiu separar genótipos de milho tolerante e sensível ao alumínio, podendo ser empregado em programas de melhoramento genético, sendo que a melhor dose para discriminar os genótipos tolerante e sensível ao alumínio foi a de 5 μ M de alumínio e, dentre as variáveis analisadas, a CLRS foi a mais eficiente para indicar tolerância ao alumínio.

REFERÊNCIAS

ANDRADE JUNIOR, V.C.; MOTA, J.H.; CASTRO, N.E.A. Avaliação da tolerância a alumínio de dois genótipos de sorgo. *Revista Científica Eletrônica de Agronomia*, n.7, 2005.

BEIGUELMAN, B. *Curso prático de bioestatística*. 5. ed. Ribeirão Preto: Funpec, 274 p. 2002.

BERTAN, I.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; OLIVEIRA, P.H.; SILVA, J.A.G.; BENIN, G.; SILVA, G.C.; HARTWIG, I.; PADILHA, E.B. Caracteres associados a tolerância ao alumínio tóxico em genótipos de trigos sul brasileiros. *Revista Brasileira de Agrociência*, v.11, n.2, p.149-154, 2005.

BLAMEY, F. P. C.; ROBINSON, N.J.; ASHER, C. J. Interspecific differences in aluminum tolerance in relation to root cation-exchange capacity. *Plant and Soil*, v.146, p.77-82, 1992.

CAMBRAIA, J.; SILVA, M.A.da; CANO, M.A.O.; SANT'ANNA, R. Método simples para avaliação de cultivares de sorgo quanto a tolerância a alumínio. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, v.3, n.2, p.87-95, 1991.

DELHAIZE, E.; GRAIG, S.; BEATON, C.D.; BENNET, R.J.; JAGADISH, V.C.; RANDALL, P.J. A. Aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) I. Uptake and distribution of aluminum in root apices. *Plant Physiology*, v.103, n.3, p.685-693, 1993.

DUQUE-VARGAS, J.; PANDEY, X.; GRANADOS, G.; CEBALLOS, II.; KNAPP, E. Inheritance of tolerance to soil acidity in tropical maize. *Crop Science*, v.34, p.50-54, 1994.

- FAGERIA, N.K.; STONE, L.F. **Manejo da acidez dos solos de cerrado e de várzea do Brasil**. Santo Antônio de Goiás, GO, Embrapa, 1999. 42 p.
- FARIA, E.S.T; PINTO, J.C.; BATISTA, M.A.; INOUE, T.T. Discriminação de genótipos de milho à toxicidade de alumínio em solução diluída. In: **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v.15 (supplement), p.95, 2003.
- GAMA, E.E.G., LOPES, M.A PARENTONI, S.N. O programa de melhoramento de milho do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo CNPS-EMBRAPA. In: Reunião de coordenadores sulamericanos de programas de maiz, 4, 1996. **Anais**. Cali: CIMMYT, 1996. P. 33-73.
- HARTWIG, I.; OLIVEIRA, A.C.; CARVALHO, F.I.F.; BERTAN, I.; SILVA, J.A.G.; SCHMIDT, D.A.M.; VALERIO, I.P.; MAIA, L.C.; FONSECA, D.A.R.; REIS, C.E.S. Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.28, n.2, p.219-228, 2007.
- ISHIKAWA, S.; WAGATSUMA, T. Plasma membrane permeability of root-tips cells following temporary exposure to Al ions is a rapid measure of Al tolerance among plant species. **Plant Physiology**, v.39, n.5, p.516-525, 1998.
- KENNEDY, C.W.; BA, M.T.; CALDWELL, A.G.; HUTCHINSON, R.L.; JONES, J.E. Differences in root and shoot growth and soil moisture extraction between cotton cultivars in an acid subsoil. **Plant and Soil**, v.101, p.241-246, 1987.
- KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual Review Plant Physiology Plant Molecular Biology**, v.46, p.237-260, 1995.
- LOPES, M.A., MAGNAVACA, R., GAMA, E.E.G. Avaliação de populações de milho e seus cruzamentos para tolerância à toxidez de alumínio em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.22, n.3, p.257-263, 1987.
- MAGNAVACA, R. **Genetics variability and inheritance of aluminum tolerance in maize**. Lincoln: Univ. of Nebraska, 1982. 135p. Ph.D. Thesis.
- MAGNAVACA, R.; BAHIA FILHO, A.F.C. Seleção de milho para tolerância a alumínio. In: Simpósio Internacional sobre estresse ambiental, 1, 1992, Belo Horizonte, MG. O milho em perspectiva: **Anais...** Sete Lagoas: Embrapa/CNPMS; México, CYMMIT/UNDP, 1995. 449p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 889p. 1995.
- MARTINS, P.R.; PARENTONI, S.N.; LOPES, M.A.; PAIVA, E. Eficiência de índices fenotípicos de comprimento de raiz seminal na avaliação de plantas individuais de milho quanto à tolerância ao alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.10, p.1897-1904, 1999.
- MAZZOCATO, A.C.; ROCHA, P.S.G.; SERENO, M.J.C.M.; BOHNEN, H.; GRONGO, V.; NETO, J.F.B. Tolerância ao alumínio em plântulas de milho. **Ciência Rural**, v.32, n.1, p.19-24, 2002.
- MOFFAT, A.S. Engineering plants to cope with metals. **Science**, v.285, p.369-370, 1999.
- PANDEY, S.; CEBALLOS, H.; MAGNAVACA, R.; BAHIA FILHO, A.F.C.; DUQUE-VARGAS, J.; VINASCO, L.E. Genetics of tolerance to soil acidity in tropical maize. **Crop Science**, v.34, p.1511-1514, 1994.
- PARENTONI, S.N. Avanços no programa de adaptação de milho a solos ácidos do CNPMS/Embrapa. In: Reunião de coordenadores suramericanos de programas de maiz, 4., **anais...** 1996, Cali. Memórias. Cali: CIMMYT, 1996, p.74-103.
- PATERNIANI, M.E.A.G.Z.; SAWAZAKI, E.; DUDIENAS, C.; DUARTE, A.P.; GALLO, P.B. Diallel crosses among maize lines with emphasis on resistance to foliar diseases. **Genetics and Molecular Biology**, v.23, n.2, p.381-385, 2000.
- PATERNIANI, M.E.A.G.Z.; FURLANI, P.R. Tolerância à toxicidade de alumínio de linhagens e híbridos de milho em solução nutritiva. **Bragantia**, v.61, n.1, p.11-16, 2002.
- PRIOLI, A.J. **Análise genética da tolerância à toxidez do alumínio em milho (*Zea mays* L.)**. Campinas: Unicamp, 1987. 182p. Tese de Doutorado.
- RENGEL, Z. Uptake of aluminum by plant cells. **New Phytology**, v.134, p.389-406, 1996.
- SAWAZAKI, E.; FURLANI, P.R. Genética da tolerância ao alumínio em milho cateto. **Bragantia**, v.46, p. 269-278, 1987.
- SAMUELS, T.D.; KUCUKAKYUZ, K.; RINCÓN-ZACHARY, M. Al partitioning patterns and root growth as related to Al sensitivity and Al tolerance in wheat. **Plant Physiology**, v.99, n.3, p.1021-1028, 1997.
- SILVA, A.R.; MALAVOLTA, E.A. A conquista do cerrado. In: PATERNIANI, E. (Org.). **Agricultura brasileira e pesquisa agropecuária**. Brasília, 2000, p.31-44.
- SILVA, G.C.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; SILVA, J.A.G.; BENIN, G.; VIEIRA, E.A.; BERTAN, I.; HARTWIG, I.; FINATTO, T. Parâmetros de avaliação da tolerância ao alumínio tóxico em diferentes cultivares de aveia (*Avena sativa* L.). **Revista Brasileira de Agrociência**, v.12, n.4, p.401-402, 2006.

VICENTE, F.M.P.; ROSSIELO, R.O.P.; PEREIRA, M.B.
Características indicativas de sensibilidade ao alumínio em arroz.
Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.33, n.1, p.9-15, 1998.

ZEIGLER, R.S.; PANDEY, S.; MILES, J.; GOURLEY, L.M.;
SARKARUNG, S. Advances in the selection and breeding of
acid-tolerant plants: rice, maize sorghum and tropical forages. In:
DATE, R.A.; GRUNDON, N.J.; RAYMENT, G.E.; PROBERT,
M.E. (Eds). **Plant-soil interactions at low pH**: principles and
management. Dordrecht: Kluwer academic, 1995. p. 391-406.