

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Agronomia



Dissertação

**Genótipos de aveia branca (*Avena sativa* L.) submetidos a
diferentes protocolos e doses de alumínio em cultivo
hidropônico**

Maraisa Crestani

Pelotas, 2008.

MARAISA CRESTANI

**Genótipos de aveia branca (*Avena sativa* L.) submetidos a
diferentes protocolos e doses de alumínio em cultivo
hidropônico**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências (área do conhecimento: Fitomelhoramento).

Orientador: Fernando Irajá Félix de Carvalho, PhD.

Co-orientadores: José Antonio Gonzalez da Silva, Dr.

Irineu Hartwig, Dr.

Pelotas, 2008.

Dados de catalogação na fonte:
(Marlene Cravo Castillo – CRB-10/744)

C922g Crestani, Maraisa

Genótipos de aveia branca (*Avena sativa* L.) submetidos a diferentes protocolos e doses de alumínio em cultivo hidropônico / Maraisa Crestani. - Pelotas, 2008.

108f : il.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2008, Fernando Irajá Félix de Carvalho, Orientador; José Antonio Gonzalez da Silva e Irineu Hartwig, Co-orientadores.

1.Toxidez por alumínio 2.Solução nutritiva 3.Comprimento da raiz 4.Caracteres de plântula 5.Correlação 6.Análise multivariada. I. Carvalho, Fernando Irajá Félix de (orientador)
II.Título.

CDD 633.13

Banca examinadora:

Fernando Irajá Félix de Carvalho, PhD. – Dep. de Fitotecnia, FAEM/UFPeI

Antonio Costa de Oliveira, PhD. – Dep. de Fitotecnia, FAEM/UFPeI

José Antonio Gonzalez da Silva, Dr. – Dep. de Estudos Agrários, DEAG/UNIJUI

Rogério Oliveira de Sousa, Dr. – Dep. de Solos, FAEM/UFPeI

Aos meus pais Sérgio Crestani e Maria Clélia Lanius Crestani, pelo apoio e confiança que sempre depositaram em mim, me auxiliando e me confortando em todos os momentos... por sempre acreditarem no meu potencial e me incentivarem a seguir em frente. Por todas as madrugadas que me recebem mais uma vez em casa sempre com um grande sorriso no rosto!

Ao meu irmão Steben Crestani, meu grande amigo, com o qual sempre vivi e compartilhei os momentos difíceis, mas também as alegrias e as vitórias.

Ao meu namorado Fernando José Hawerth, por sua bondade, amor, lealdade, e pela sua companhia... juntos seguimos nosso caminho, e aos poucos construímos nossa história e nossa formação.

Dedico

À Deus, agradeço pela minha vida, pela força que me impulsiona a lutar para atingir meus objetivos, pelas oportunidades que surgem, por minha família e pessoas que amo, e por mais esta conquista!

Agradeço ao Professor Fernando Irajá Félix de Carvalho pela amizade, pela experiência e conhecimentos transmitidos, companheirismo, e acima de tudo pela confiança que depositou em mim, possibilitando minha formação científica na área do fitomelhoramento sob vossa orientação.

Aos Professores José Antonio Gonzalez da Silva, Antonio Costa de Oliveira, Rosa Lia Barbieri, Caroline Marques Castro e demais professores da pós-graduação, pelos conhecimentos transmitidos, pela amizade, pela disponibilidade e auxílio em todos os momentos em que precisei.

Aos colegas e amigos do Centro de Genômica e Fitomelhoramento, pela colaboração nos trabalhos, partilha de conhecimentos, convívio e amizade... muito obrigada pela contribuição com a minha formação.

Aos funcionários do Centro de Genômica e Fitomelhoramento pela amizade e constante auxílio prestado.

Às instituições de pesquisa CAPES, CNPq, FAPERGS e Fundação Pró-Sementes de Apoio à Pesquisa pela viabilização financeira para implantação deste projeto e financiamento da bolsa de pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Faculdade de Agronomia "Eliseu Maciel", da Universidade Federal de Pelotas, por oportunizar o aprimoramento de minha formação profissional.

MUITO OBRIGADA!!!

Resumo

CRESTANI, Maraisa. **Genótipos de aveia branca (*Avena sativa* L.) submetidos a diferentes protocolos e doses de alumínio em cultivo hidropônico.** 2008, 110f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS.

O emprego de avaliações em ambiente controlado, como o cultivo hidropônico, tem despertado grande interesse dos melhoristas na seleção de plantas tolerantes ao alumínio (Al), pois além da fácil visualização do dano em estádios iniciais de desenvolvimento das plantas, representa um método não destrutivo e que fornece resultados altamente correlacionados aos obtidos em condições de campo. Diferentes metodologias de avaliação quanto à tolerância ao Al em condições de hidroponia têm sido adotadas. No entanto, se faz necessário um entendimento mais aprimorado destas técnicas de seleção a fim de otimizar a obtenção de genótipos tolerantes. A restrição do crescimento radicular tem se tornado a base dos procedimentos de avaliação da tolerância ao Al em aveia branca sob cultivo hidropônico, contudo, a análise da expressão de outros caracteres em nível de plântula pode viabilizar a seleção indireta para este caráter, ou mesma a adoção de análises envolvendo vários caracteres morfológicos simultaneamente. Neste sentido, cultivares de aveia branca padrão para a tolerância ao Al foram submetidas a diferentes protocolos e doses de Al em condições de hidroponia visando determinar a técnica mais efetiva na identificação de plantas superiores para o caráter tolerância ao Al com base no comprimento de raiz, além de verificar a relação entre caracteres em nível de plântula e o desempenho simultâneo na discriminação da tolerância ao Al pelo emprego de estatística multivariada. O delineamento experimental adotado foi o completamente casualizado com três repetições, adotando três protocolos de avaliação: 'solução nutritiva completa' tendo Al

fornecido na fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, nos níveis 0, 8, 16 e 32 mg L^{-1} de Al; 'solução nutritiva completa' e Al adicionado no sal $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; e o protocolo 'solução nutritiva mínima', com Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, nos níveis 0, 1, 3 e 5 mg L^{-1} . Os protocolos caracterizados pela adoção de Al à 'solução nutritiva completa' por meio de distintas fontes são altamente eficientes na identificação de genótipos de aveia branca tolerantes e sensíveis ao Al tóxico com base no comprimento da raiz em condições de hidroponia. O desempenho dos caracteres de plântula está altamente relacionado com o comprimento de raiz em aveia branca quando submetidos ao efeito tóxico do Al em condições de hidroponia, sendo que a composição da solução nutritiva e as fontes de Al empregadas interferem nesta relação. O estudo com base na análise conjunta dos caracteres em nível de plântula não permite a eficiente discriminação de genótipos de aveia branca quanto à tolerância ao Al tóxico em cultivo hidropônico quando há relação de dependência entre as variáveis consideradas.

Palavras-chave: Toxidez por alumínio, solução nutritiva, comprimento da raiz, caracteres de plântula, correlação, análise multivariada.

Abstract

CRESTANI, Maraisa. **White oat genotypes (*Avena sativa* L.) subjected to different methodologies and aluminum levels under hydroponic conditions.** 2008, 110f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS.

The ability to perform experiments under controlled conditions employment of evaluations in controlled environment such as hydroponic culture has attracted crop breeders' attention regarding the selection of aluminum (Al) tolerant plants. This strategy facilitates the detection of plant injuries in early stages of development, representing a non-destructive method. Also, the results obtained are highly correlated to field performances of tested genotypes. Different methods have been used to study aluminum tolerance in hydroponic conditions. However, it is necessary to improve the understanding of these techniques in order to optimize their efficiency. Stalling of root growth has become the basis of major procedures evaluating aluminum tolerance of white oat genotypes in hydroponic culture. However, the expression of other characters in plantlets can be associated to tolerance and may turn out to facilitate the indirect selection for this character. Also, this could lead to the adoption of analyses involving all morphological characters. Therefore, standard white oat genotypes were subjected to different methods and Al levels under hydroponic conditions aiming to establish the most effective technique to identify superior aluminum tolerant plants based on root length. In addition, this study aimed to verify the relationship between plantlet characters and their performance in the aluminum tolerance characterization using multivariate statistics. The experimental design was complete randomized blocks with three replications, using three methods: 'complete nutrient solution' with 0, 8, 16 and 32 mg L⁻¹ of Al supplied as Al₂(SO₄)₃.18H₂O; 'complete nutrient solution' with 0, 8, 16 and 32 mg L⁻¹ of Al

supplied as $\text{Al}_2\text{Cl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; and the 'minim nutrient solution' with 0, 1, 3 and 5 mg L^{-1} of Al supplied as $\text{Al}_2\text{Cl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. The 'complete nutrient solution' methods are efficient to identify aluminum tolerant white oat genotypes based on root length. The performance of the plantlet characters is highly correlated with root length in white oat genotypes subjected to the aluminum stress under hydroponic conditions. The nutrient composition and the Al sources employed influence the plant responses. The study based on the joint analysis of plantlet characters does not allow the efficient discrimination of white oats genotypes regarding their level of aluminum tolerance in hydroponic culture when there is a relationship of dependence between the variables.

Keywords: Aluminum toxicity, nutrient solution, root length, plantlet characters, correlation, multivariate analysis.

Lista de Figuras

Capítulo 2. Ambientes diferenciados na manifestação fenotípica de genótipos de aveia branca quanto à tolerância ao alumínio

Figura 2.1. Representação das equações de regressão ajustadas geradas pelo comportamento apresentado pelos genótipos de aveia branca em relação ao caráter comprimento de raiz (CR) avaliados sob estresse por protocolos de avaliação e doses de alumínio em hidroponia (a - solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$; b - solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ de alumínio em solução nutritiva; c - solução nutritiva mínima, com Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). CGF - FAEM/UFPel, Pelotas-RS, 2008..
.....63

Lista de Tabelas

Capítulo 2. Ambientes diferenciados na manifestação fenotípica de genótipos de aveia branca quanto à tolerância ao alumínio

Tabela 2.1	Resumo da análise de variância do caráter comprimento total de raiz (CR) de genótipos de aveia branca submetidos ao estresse por alumínio, disponibilizado em diferentes fontes. CGF - FAEM/UFPeI, Pelotas-RS, 2008.	61
Tabela 2.2	Análise de médias para o caráter comprimento total de raiz (CR) em genótipos de aveia branca submetidos ao estresse por alumínio proporcionado por diferentes protocolos e doses de alumínio em solução nutritiva. CGF - FAEM/UFPeI, Pelotas-RS, 2008.	65
Tabela 2.3	Análise de médias para o caráter comprimento de raiz (CR) em genótipos de aveia branca submetidos ao estresse por alumínio proporcionado por diferentes protocolos de avaliação em hidroponia. CGF - FAEM/UFPeI, Pelotas-RS, 2008..	69
Tabela 2.4	Coeficientes de correlação fenotípica entre diferentes protocolos e doses de alumínio estimados para o caráter comprimento de raiz (CR) em genótipos de aveia branca testados em cultivo hidropônico. CGF - FAEM/UFPeI, Pelotas-RS, 2008..	71

Capítulo 3. Caracteres relacionados e análise multivariada na avaliação da tolerância ao alumínio em aveia branca

Tabela 3.1	Resumo da análise de variância para os caracteres de plântula (CR, CPA, CPF, CSF, CC, IPF, MSR e MSPA) em genótipos de aveia branca submetidos ao estresse por diferentes protocolos e doses de alumínio. CGF - FAEM/UFPeI, Pelotas-RS, 2008.....	85
------------	---	----

Tabela 3.2 Estimativa de correlação entre o caráter comprimento de raiz (CR) e demais caracteres de plântula (CPA, CPF, CSF, CC, IPF, MSR e MSPA) em genótipos de aveia branca avaliados quanto a tolerância ao Al em solução completa, com Al fornecido na fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$. CGF - FAEM/UFPeI, Pelotas-RS, 2008..	86
Tabela 3.3 Estimativa de correlação entre o caráter comprimento de raiz (CR) e demais caracteres de plântula (CPA, CPF, CSF, CC, IPF, MSR e MSPA) em genótipos de aveia branca avaliados quanto a tolerância ao Al em solução completa, com Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. CGF - FAEM/UFPeI, Pelotas-RS, 2008..	87
Tabela 3.4 Estimativa de correlação entre o caráter comprimento de raiz (CR) e demais caracteres de plântula (CPA, CPF, CSF, CC, IPF, MSR e MSPA) em genótipos de aveia branca avaliados quanto a tolerância ao Al em solução mínima, com Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. CGF - FAEM/UFPeI, Pelotas-RS, 2008..	88
Tabela 3.5 Agrupamento de genótipos de aveia branca submetidos ao estresse por diferentes protocolos e doses de alumínio em hidroponia, utilizando o método de agrupamento de Tocher, com base na distância generalizada de Mahalanobis (D^2). CGF - FAEM/UFPeI, Pelotas-RS, 2008..	92
Tabela 3.6 Importância dos caracteres de plântula na análise de diversidade entre genótipos de aveia branca submetidos ao estresse por alumínio em cultivo hidropônico, utilizando a distância generalizada de Mahalanobis (D^2). CGF - FAEM/UFPeI, Pelotas-RS, 2008..	94

Sumário

Resumo	3
Abstract	5
Lista de figuras	7
Lista de tabelas	8
Introdução geral	13
1. Toxidez por alumínio e a seleção de plantas tolerantes	17
1.1 Introdução	18
1.2 A toxicidade do alumínio nas plantas	20
1.3 Mecanismos de tolerância ao alumínio	22
1.4 Expressão gênica da tolerância em plantas cultivadas	24
1.5 Avaliação e seleção de plantas com base na expressão fenotípica.....	26
1.5.1 Soluções mínimas.....	27
1.5.2 Soluções completas	29
1.5.3 Bioensaios e experimentos em condições de campo	36
1.5.4 Outras técnicas de avaliação	37
1.6 Considerações finais	39
1.7 Referências bibliográficas	40
2. Ambientes diferenciados na manifestação fenotípica de genótipos de aveia branca quanto à tolerância ao alumínio	55
2.1 Introdução	56
2.2 Material e métodos	58
2.3 Resultados e discussão.....	60
2.4 Conclusões.....	72
2.5 Referências bibliográficas	73

3. Caracteres relacionados e análise multivariada na avaliação da tolerância ao alumínio em aveia branca.....	78
3.1 Introdução	79
3.2 Material e métodos	81
3.3 Resultados e discussão.....	83
3.4 Conclusões.....	95
3.5 Referências bibliográficas	96
Discussão geral.....	101
Referências bibliográficas (Introdução e Discussão geral)	104
Vitae.....	108

Introdução geral

A aveia branca (*Avena sativa* L.) pertence à família Poaceae, subfamília Poideae, tribo Avenae e gênero *Avena*. Este cereal possui um número cromossômico básico igual a sete, sendo um alohexaplóide natural ($2n=6x=42$) que apresenta uma meiose regular, semelhante à indivíduos diplóides (TAVARES et al.; 1993). Há evidências de que a aveia branca tenha como centro de origem a Ásia e o Oriente Médio, e de acordo com Coffman (1961), no princípio, a aveia persistiu como planta invasora em lavouras de trigo e cevada, que eram culturas mais importantes naquele momento. Segundo o mesmo autor, ela foi introduzida na Europa juntamente com as sementes de trigo e cevada, e à medida que estas espécies foram dispersas para o centro e norte do continente, a aveia branca foi ganhando competitividade e, finalmente, sendo domesticada como uma lavoura alternativa. Foi trazida para o Brasil pelos imigrantes europeus no século XVI (TAVARES et al., 1993), e atualmente é o quinto cereal mais cultivado, constituindo o grupo das oito culturas anuais mais trabalhadas no país, apresentando 125.320 ha cultivados no ano de 2007, com produção total de 243.911 kg e produtividade média de 1.946 kg ha⁻¹ (FAOSTAT, 2008).

A cultura da aveia branca caracteriza uma excelente alternativa de diversificação e contribuição para a efetividade econômica do sistema produtivo agrícola. Na alimentação humana, se destaca pela elevada qualidade protéica e porcentagem de lipídios com predominância de ácidos graxos insaturados, aliado ao adequado conteúdo de carboidratos, fração que apresenta alta proporção de fibras alimentares, destacando a fração β -glucanas, de grande responsabilidade pelas propriedades hipocolesterolêmicas desta espécie (DE SÁ et al., 2000).

Esta espécie tem sido utilizada na alimentação animal na forma de grãos, formação de pastagens em cultivo isolado ou consociado, produção de feno e

silagem, sendo também destinada à formação de adubação verde, cobertura de solo para o sistema de semeadura direta, apresentando um reconhecido efeito de recuperação e conservação do solo (CARVALHO et al., 1987; SCHEFFER-BASSO et al., 2001; HARTWIG et al., 2007).

Embora o clima da região Sul seja extremamente favorável ao desenvolvimento da aveia branca com qualidade e alto rendimento, a ocorrência de moléstias, pragas e a toxicidade por elementos químicos presentes no solo, atuam como fatores limitantes para a expressão do potencial produtivo da cultura em diferentes regiões do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Deste modo, o melhoramento genético vem objetivando a expansão desta cultura pelo desenvolvimento de variedades modernas, capazes de obter melhor tipo agrônomo, maior rendimento e qualidade de grãos, resistência a moléstias necrotróficas e biotróficas, bem como adaptação e estabilidade em diferentes ambientes de cultivo.

Entre os fatores de ambiente prejudiciais ao desenvolvimento das culturas, o alumínio (Al) presente na solução do solo representa um dos principais agentes responsáveis pela baixa produtividade dos cereais no Brasil (DELHAIZE e RYAN, 1995). Ao mesmo tempo, o Al é o metal mais abundante da crosta terrestre, e em concentrações da ordem de micromolares provoca alterações morfológicas, bioquímicas e fisiológicas em plantas de diversas culturas, cujos efeitos nocivos e severidade variam de acordo com a espécie e cultivar (KOCHIAN et al, 2004). De acordo com Silva et al. (2007), a obtenção de elevado rendimento de grãos em aveia branca em solos com níveis considerados tóxicos de Al livre presente na solução exige a correção da acidez ou o emprego de genótipos tolerantes.

O uso de cultivares tolerantes ao Al representa uma solução sustentável, proporcionando ganhos permanentes de produtividade em solos ricos em Al livre, vinculado ao elevado desempenho em solos corrigidos. Na cultura da aveia branca, estudos indicam que a tolerância ao Al é controlada por um ou dois genes dominantes (WAGNER et al., 2001; OLIVEIRA, 2002; NAVA et al.; 2006). Desta forma, a tolerância ao Al nesta espécie caracteriza um caráter qualitativo, controlado por um pequeno número de genes de grande influência na expressão do caráter, indicando maior facilidade de transferência de alelos de tolerância às constituições genéticas elite sensíveis, além da elevada eficiência de seleção para este caráter mesmo em gerações segregantes precoces (ALLARD, 1960).

A variabilidade genética é de essencial interesse para o melhorista na obtenção de progressos no melhoramento de plantas através da seleção artificial, viabilizando o emprego de técnicas que possibilitem a identificação de genótipos superiores (HARTWIG et al., 2007a). Vinculado a isto, a seleção de constituições genéticas tolerantes ao Al só será obtida com a adoção de um eficiente processo de avaliação das plantas para este caráter.

Na literatura é possível encontrar uma grande variedade de técnicas de avaliação de plantas quanto à tolerância ao Al, as quais são adotadas com o objetivo de elucidar os processos genéticos e fisiológicos da tolerância, além de buscar maior eficiência de seleção para este caráter nas espécies cultivadas. De forma geral, estas metodologias têm como base os efeitos tóxicos deste elemento nas plantas, os processos fisiológicos e bioquímicos envolvidos na tolerância ao Al, e a herança deste caráter, sendo modificadas e adaptadas de acordo com as características das espécies trabalhadas.

A seleção de plantas quanto à tolerância ao Al em programas de melhoramento genético tem sido efetuada principalmente através da adoção de soluções nutritivas, pois esta caracteriza uma técnica simples, e que evidencia elevada correlação com resultados obtidos em condições de campo (CAMARGO e OLIVEIRA, 1981; BAIER et al., 1995; SOUZA, 2001; SPEHAR e SOUZA, 2006).

Segundo Ryan et al. (1993), o ápice da raiz corresponde ao sítio crítico da toxidez do Al, onde promove danos nos tecidos meristemáticos, interagindo com a parede celular e membrana plasmática, ou com o simplasma das células das raízes (CANÇADO et al., 1999). Desta forma, a restrição do crescimento radicular tem sido o parâmetro mais utilizado na avaliação e caracterização de genótipos quanto à tolerância ao Al, inclusive na cultura da aveia branca (SANCHES-CHÁCON et al., 2000; NAVA et al., 2006; SILVA et al., 2006; FINATTO et al., 2007; SILVA et al. 2007). No entanto, a análise da expressão de outros caracteres quando em condição de toxidez por Al em hidroponia pode viabilizar a seleção indireta de genótipos tolerantes, desde que evidenciem forte associação com o padrão de tolerância e elevada herdabilidade, ou mesmo pela análise simultânea, envolvendo vários caracteres morfológicos observados em nível de plântula.

De forma geral, as soluções nutritivas se caracterizam pela combinação de uma série de componentes químicos essenciais às plantas, formando uma solução nutritiva completa, na qual é adicionado o Al; ou pela utilização de uma solução

mínima, formada pela inclusão de concentrações de Al a uma solução constituída unicamente por Ca diluído. O Ca é adicionado para evitar a desestabilização do pH, acelerar o alongamento radicular e, conseqüentemente, aumentar a absorção de Al (GARLAND et al., 1990). Contudo, o desenvolvimento e o aprimoramento dos processos de avaliação de plantas em relação à tolerância e sensibilidade ao Al requer um entendimento mais aprimorado destas técnicas de seleção, a fim de otimizar a obtenção de genótipos elite e tolerantes a este elemento tóxico. Com base nestas informações, se faz necessário a realização de estudos visando conhecer o comportamento de genótipos de aveia branca perante diferentes metodologias de avaliação quanto à tolerância ao Al em solução nutritiva. Outro aspecto importante a ser avaliado é o desempenho dos vários caracteres em nível de plântula em relação à presença do Al tóxico na solução de cultivo.

O objetivo geral desta dissertação foi contribuir para a maior eficiência dos métodos de seleção precoce de genótipos de aveia branca tolerantes ao Al em cultivo hidropônico. O trabalho teve os seguintes objetivos específicos: (1) apresentar as principais técnicas de seleção precoce de genótipos tolerantes ao Al em condições de hidroponia adotados em estudos com espécies cultivadas, compreendendo a composição dos nutrientes nas soluções, fonte e concentrações de Al utilizadas; (2) avaliar o comportamento de genótipos de aveia branca padrões quanto a tolerância ao Al em diferentes protocolos e doses deste íon metálico pela mensuração do caráter comprimento de raiz avaliado no estágio de plântula em condições de hidroponia; (3) verificar a relação entre caracteres de plântula em aveia branca submetidos a diferentes protocolos e concentrações de Al em condições de hidroponia e; (4) analisar o desempenho simultâneo dos caracteres em nível de plântula na discriminação da tolerância ao Al pelo emprego de estatística multivariada em aveia branca submetidos a diferentes protocolos e concentrações de Al em condições de hidroponia.

**1. Toxidez por alumínio e a seleção de plantas tolerantes
(Revisão bibliográfica)**

1.1 Introdução

Considerando o cenário da agricultura sustentável e o gradativo aumento da demanda global por alimentos, existe a necessidade evidente em intensificar o volume de alimentos e a eficiência de produção, necessitando inclusive, a expansão de áreas de cultivo. Neste contexto, para o sucesso da atividade agrícola, é imprescindível a adoção de adequadas técnicas de manejo, vinculadas ao uso de cultivares que expressam elevado desempenho produtivo, mesmo em condições restritivas de ambiente.

Considerando os fatores de ambiente prejudiciais ao desenvolvimento das culturas, o alumínio (Al) presente na solução do solo representa um dos principais agentes responsáveis pela redução da produtividade dos cereais no Brasil (DELHAIZE e RYAN, 1995; CANÇADO et al., 2001; VOSS et al., 2007). Ao mesmo tempo, o Al é o metal mais abundante da crosta terrestre, e em concentrações da ordem de micromolares provoca alterações morfológicas, bioquímicas e fisiológicas em plantas de diversas culturas, cujos efeitos nocivos e de severidade variam de acordo com a espécie e cultivar (KOCHIAN et al, 2004).

No processo de formação dos solos das regiões com altas precipitações pluviométricas, os cátions Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} e os ânions cloreto, nitrato e sulfato são lixiviados, e quando a remoção de cátions básicos é maior que sua taxa de liberação pela intemperização, o pH do solo diminui (TEDESCO e BISSANI, 2004). A perda de cátions do solo é associada à retenção preferencial de cátions de maior valência, como o Al (valência 3+), nos sítios de troca da argila e da matéria orgânica (BISSANI et al., 2006). Desta maneira, o Al é um dos principais componentes da acidez potencial dos solos e sua solubilização na solução e conseqüente toxidez são influenciadas por vários fatores, incluindo tipo de argila predominante, concentração de sais na solução, teor e dinâmica da matéria orgânica, técnicas culturais, e

principalmente o pH (BISSINI et al., 2006). Aproximadamente 30 à 40% dos solos aráveis do mundo apresentam pH inferior a 5,5, e no Brasil, estes solos compõem em torno de 60% do território nacional (BRONDANI e PAIVA, 1996).

Em soluções ácidas ($\text{pH} < 5,0$), o Al se apresenta na forma $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$, caracteristicamente tóxica para as plantas, porém, quando o pH se eleva, esta molécula sofre hidrólise, com a formação dos complexos mononucleares $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$ e $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ (ROSSIELLO e JACOB NETTO, 2006). Nas espécies magnoliopsidas, as formas $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$ e $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ são altamente tóxicas, e nas liliopsidas o $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$ provoca maiores efeitos nocivos (SCHULZE et al., 2005). Em pH neutro, é formado a gibbsite, $\text{Al}(\text{OH})_3$, relativamente insolúvel, e no pH comumente estabelecido no citoplasma da célula ($\approx \text{pH } 7,4$), o íon aluminato, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, é a forma dominante (KOCHIAN, 1995).

De modo geral, o Al em teores tóxicos pode estar localizado em todo o perfil do solo e sua neutralização é temporariamente obtida com a calagem apenas na camada arável, devido baixa mobilidade dos corretivos aplicados ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$, CaO , CaOH) e elevado custo da correção em profundidade. Desta forma, a ineficiência da calagem em reduzir a acidez do subsolo limita o desenvolvimento das raízes em profundidade, elevando a sensibilidade a deficiências hídricas ocasionais, e conseqüentemente, reduzindo a eficiência na absorção de nutrientes nas camadas mais profundas (FOY et al., 1978; CANÇADO et al., 2001; FERREIRA et al., 2006). Contudo, a acidez na camada superficial pode, muitas vezes, assumir grande importância, mesmo em áreas onde se emprega a calagem periodicamente, como fruto de práticas culturais inadequadas. Neste sentido, aplicações excessivas de adubos nitrogenados promovem a produção natural de prótons H^+ pela nitrificação a partir do nitrogênio amoniacal, assim como o processo de colheita que, associado ao manejo do solo, acarreta a redução de cátions básicos no perfil do solo (Ca, Mg, K e Na), favorecem a predominância do Al livre na solução do solo (CARVER e OWNBY, 1995).

O uso de cultivares tolerantes ao Al representa uma solução sustentável e duradoura, proporcionando ganhos permanentes de produtividade em solos ricos em Al livre. Além disso, o fato de um genótipo apresentar tolerância ao Al não implica em inferioridade genética em relação à sua capacidade produtiva. Segundo Rosa et al. (1994), genótipos elite de trigo que incorporaram genes da tolerância ao Al em sua constituição genética, via retrocruzamentos, apresentaram elevado potencial de

rendimento de grãos quando avaliados em ambientes livres de Al tóxico no solo. Da mesma forma, Paterniani e Furlani (2002) identificaram híbridos de milho tolerantes ao Al em solução nutritiva que evidenciaram elevada produtividade de grãos inclusive em solos corrigidos.

Na literatura é possível encontrar uma grande variedade de técnicas de avaliação de plantas quanto à tolerância ao Al, as quais são adotadas com o objetivo de elucidar os processos genéticos e fisiológicos da tolerância, além de buscar maior eficiência de seleção para o caráter nas espécies cultivadas. De forma geral, estas técnicas têm por base os efeitos tóxicos deste elemento nas plantas, e também as alterações visíveis proporcionadas no fenótipo, permitindo a identificação e a seleção de genótipos tolerantes ao íon metálico.

1.2 A toxicidade do alumínio nas plantas

O alumínio livre na solução do solo representa o principal fator causador do crestamento, problema típico verificado nos cereais de estação fria cultivados em regiões caracterizadas por solos ácidos não corrigidos (ARAÚJO, 1951; BECKMANN, 1954; ARAÚJO, 1956; CAMARGO et al., 1995; VOSS et al., 2007). As plantas com este aspecto têm como característica o crescimento anormal, coloração púrpura nos colmos, limbo foliar e nervuras, além do enrolamento das folhas jovens, colapso do ápice da planta e dos pecíolos, florescimento deficiente, e baixa produtividade (PAIVA, 1942; ARAÚJO, 1951; BECKMANN, 1954; FERREIRA, 2006). Contudo, os efeitos adversos do Al são nítidos e rapidamente verificados no sistema radicular das plantas, onde as raízes danificadas pelo íon tóxico são visivelmente mais curtas, grossas e quebradiças, com poucas ramificações, e crescem paralelamente ao solo, conduzindo as plantas à deficiência mineral e ao estresse hídrico (FOY, 1978; KOCHIAN, 1995; DEGENHARDT et al., 1998; CANÇADO et al., 2001; FERREIRA et al., 2006). A redução do crescimento e do desenvolvimento de parte aérea ocorre num momento posterior (RYAN et al., 1993; JONES e KOCHIAN, 1995) e parece ser uma consequência dos danos causados primeiramente na raiz (MATSUMOTO et al., 1976).

A inibição da absorção de O_2 nos ápices radiculares também pode ser promovida pelo Al tóxico, afetando o fluxo de elétrons na mitocôndria, talvez por

interferir com a oxidação de substratos que doam elétrons no processo respiratório (JONES e KOCHIAN, 1995). Neste sentido, Moustakas et al., (1995) observaram que a inibição do crescimento da parte aérea em trigo é uma resposta secundária ao Al, decorrente da alteração provocada no fotofuncionamento do tilacóide, pois este cátion inibe parcialmente o transporte de elétrons no fotossistema II e nas proximidades do seu centro de reação, o que é mais proeminente nas cultivares sensíveis.

Para Ryan et al. (1993), o ápice da raiz corresponde ao sítio crítico da toxidez do Al, sendo a inibição da elongação desencadeada em torno de uma à duas horas em exposição ao Al (KOCHIAN, 1995); uma vez que, quando em contato com as raízes, este cátion promove danos no meristema radicular, podendo levar a morte do tecido, devido sua interação com a parede celular, membrana plasmática ou com o simplasma das células da raiz (CANÇADO et al., 1999). Desta forma, a restrição do crescimento radicular tem sido a variável mais utilizado na avaliação e caracterização de genótipos quanto à tolerância ao Al.

Frequentemente, plantas afetadas pelo Al apresentam sintomas de deficiência de nutrientes, tais com fósforo (P), cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e molibdênio (Mo), devido à interferência do Al nos processos de absorção, transporte e uso destes nutrientes (FURTINI NETO et al., 1999; BASSO et al., 2003; FREITAS et al., 2005). Entre os nutrientes disponíveis no solo, a disponibilidade de P para as plantas é altamente afetada em situação de pH baixo, visto que os óxidos e hidróxidos de Al têm uma capacidade de reter este elemento muito maior que as argilas (BISSANI et al., 2006). A deficiência em Ca é especialmente pesquisada, visto que a inibição de sua absorção provocada pela presença do Al tóxico ocorre de forma rápida e reversível, podendo estar associada à mudanças da homeostase celular e bloqueio de canais de Ca na membrana plasmática, afetando processos como mitose, citocinese, gravitropismo, crescimento polar, correntes citoplasmáticas e sinalização celular (KOCHIAN, 1995; HUANG et al., 1996).

Conforme Miranda e Miranda (1997), em situações de cultivo em ambientes com elevada acidez e Al livre, a eficiência de absorção de nutrientes decorrente do processo de associação micorrízica sofre variação, resultando no menor crescimento e produtividade das plantas colonizadas, sendo também constatada variação da espécie de fungo responsável pela colonização. Além disto, estes fatores de ambiente afetam diretamente a sobrevivência, a taxa de crescimento e a morfologia

de rizóbios presentes na rizosfera de espécies noduladoras, resultando na perda de efetividade e da eficiência simbiótica (HUNGRIA et al, 1997). Além disto, Cançado et al., (1999) citam a influência negativa do Al sobre enzimas envolvidas na assimilação de nitrogênio, uma vez que a atividade das enzimas glutamina sintetase (GS), glutamato sintase (GOGAT), glutamato desidrogenase (GDH) e fosfoenolpiruvato carboxilase (PEPC), foi alterada em genótipos de milho cultivados em hidroponia, na presença de Al.

Trabalhos científicos têm indicado que interações do Al com elementos envolvidos na transdução de sinais responsáveis pela comunicação da célula com o ambiente são, aparentemente, eventos primários da toxidez causada pelo Al. Este elemento químico teria como alvos no interior da célula, o fosfatidilinositolbifosfato e a proteína Gp, moléculas responsáveis pela produção de dois importantes mensageiros secundários, o inositol-1,4,5-trifosfato e o diacilglicerol, e por sua vez, ocasionando rápidas disfunções metabólicas na planta (JONES e KOCHIAN, 1995). Além disto, o Al também possui efeitos prejudiciais sobre moléculas de ácidos nucléicos, principalmente por modificar a conformação espacial da dupla hélice devido a interações com as cargas residuais dos grupamentos fosfato, reduzindo ou inibindo a divisão celular (FOY et al., 1978).

Em nível de parede celular, o Al pode promover o aumento na síntese de lignina, resultante da injúria nas células, prejudicando o processo de alongação radicular (SASAKI et al., 1996). Este íon metálico ainda interfere na permeabilidade da membrana plasmática devido provocar alterações na fluidez e na densidade do empacotamento dos fosfolipídios, resultante da ligação eletrostática de espécies catiônicas de Al à regiões polares dos fosfolipídeos, ou à interação com proteínas de membrana, além de alterar a razão fosfatidilcolina/fosfadiletanolamina (RENGEL, 1996).

1.3 Mecanismos de tolerância ao alumínio

Segundo FLEMING e FOY (1968), a tolerância das plantas ao Al está relacionada à capacidade de continuidade da divisão e alongação celular sob condições de estresse, modificação do ambiente radicular reduzindo a concentração

de Al disponível e da possibilidade de manter áreas meristemáticas viáveis para formação de novos tecidos.

Vários mecanismos de tolerância ao Al em plantas vem sendo postulados, os quais se baseiam na exclusão do Al com a imobilização ou neutralização do Al externamente à célula, e mecanismos simplásticos, decorrentes da imobilização ou neutralização do Al dentro da célula, inativado por algumas enzimas ou isolado no interior do vacúolo (JO et al., 1997).

Com relação aos possíveis mecanismos de tolerância interna, há indícios da existência de polipeptídeos que atuam no citosol como moléculas quelantes, complexando o Al presente no interior da célula; além disso, se acredita na existência de enzimas indiferentes, que não teriam sua atividade prejudicada na presença do Al; bem como na eliminação do Al do ambiente celular por compartimentalização no vacúolo ou em outra estrutura similar (TAYLOR, 1995).

A baixa capacidade de troca catiônica (CTC) da parede celular da raiz tem sido considerada como um mecanismo externo de tolerância ao Al, sugerindo que plantas com menor CTC apresentariam uma menor capacidade de absorver este íon tóxico para o interior da célula (RENGEL, 1996). Da mesma maneira, a membrana plasmática pode atuar como uma barreira à absorção do Al, uma vez que alterações na composição de fosfolipídeos pode promover a modificação de suas propriedades elétricas, dificultando a interação do Al com a membrana plasmática (YERMIYAHU et al., 1997); assim como a menor produção de proteínas genótipo-específicas de transporte do Al através da membrana, decorrente da supressão na expressão de genes que as codificam, resultando no menor fluxo de Al para o interior da célula em genótipos tolerantes (ZANG et al., 1995).

O aumento do pH na região da rizosfera também caracteriza uma forma de exclusão do Al, proporcionando a precipitação deste elemento, impossibilitando sua absorção (CANÇADO et al., 2001). Outras barreiras que o Al pode enfrentar para atingir as regiões sensíveis do meristema radicular são a mucilagem (ARCHAMBAULT et al., 1996) e a deposição de calose (ZHANG et al., 1994), que são substâncias formadas por polissacarídeos, as quais revestem a superfície radicular protegendo as regiões de crescimento da raiz, retendo o Al presente no apoplasto.

Alguns genes expressos em situação de estresse por Al nas diferentes espécies estão intimamente ligados a fatores fisiológicos que conferem proteção das

células contra o estresse oxidativo, confirmando uma possível participação destes mecanismos como componentes importantes da reação das plantas a níveis tóxicos de Al (RICHARDS et al., 1998). Neste sentido, projetos de seqüenciamento genômico e técnicas de análise de expressão diferencial de genes como microarrays e RT-PCR têm auxiliado na identificação de genes cuja expressão é alterada por estresses de ambiente, como a presença de Al (CANÇADO et al., 2001).

Nos últimos anos, grande parte das pesquisas está focada na avaliação da inativação do Al pela exsudação de moléculas quelantes que complexam este íon metálico. Tais quelantes são liberados no apoplasto e/ou na rizosfera, impedindo que o Al alcance seus sítios de toxidez, e uma vez complexado com a molécula exsudada pela raiz, perde seu efeito fitotóxico (CANÇADO et al. 1999). Segundo Basu et al. (1994), é verificada a síntese de polipeptídios pelas raízes de trigo em situação de estresse por Al, que o quelatizam nas proximidades da raiz, e assim limitam sua entrada no interior do simplasto, complementando a ação de possíveis polipeptídios citosólicos, e dessa forma, possibilitam o crescimento da planta em solos com teores de Al livre na solução.

Uma importante classe dos quelantes são os ácidos orgânicos de baixo peso molecular provenientes do ciclo dos ácidos tricarboxílicos (malato, citrato e oxalato). Genótipos tolerantes de muitas espécies cultivadas possuem a capacidade de reconhecer a presença do Al no ambiente de cultivo e estimular a exudação destes compostos pelas células do tecido apical da rizosfera, formando ligantes com o Al impedindo sua entrada na raiz, e auxiliando na fitodisponibilização de nutrientes que são complexados pelo íon tóxico, como o P (KLIMASHEVSKII e CHERNYSHEVA, 1980; LEE e FOY, 1986; MIYASAKA et al., 1991).

1.4 Expressão gênica da tolerância em plantas cultivadas

A tolerância ao Al demonstra ser governada predominantemente por genes com alelos dominantes, visto que, progênies de primeira geração (F_1) obtida do cruzamento de genótipos contrastantes no caráter evidenciam tolerância.

Pesquisas com trigo (*Triticum aestivum* L.) têm sugerido a presença de um ou dois genes maiores responsáveis pela tolerância o Al (KERRIDGE e KRONSTAD, 1968; CAMARGO e OLIVEIRA, 1981b; LAGOS et al., 1991; CAMARGO et al., 2000).

Enquanto isso, Nodari et al. (1982) concluíram que este caráter é governado por dois genes independentes, de efeito predominantemente aditivo e com elevada herdabilidade. DELHAIZE et al., (1993) demonstraram que o loco *Alt1* representa ser o grande responsável pela diferença na tolerância ao AI entre linhas isogênicas de trigo. O *Alt1* parece ser o mesmo loco identificado como *Alt2*, localizado no cromossomo 4 do genoma D em trigo por Luo e Dvorak (1996), através do mapeamento físico. O gene de tolerância ao AI *Alt_{BH}* foi encontrado neste mesmo cromossomo em trigo através da associação por marcadores RFLP, e representou 85% da variação fenotípica para tolerância ao AI em RILs (linhagens puras recombinantes), geradas através do cruzamento das cultivares de trigo contrastantes BH1146 e Anahuac (RIEDE e ANDERSON, 1996). Além disso, o gene *ALMT1*, que codifica para o transporte de malato ativado pelo AI, foi clonado por Sasaki et al. (2004), apresentando relação direta com a tolerância ao AI em trigo, havendo indícios que este gene corresponde ao *Alt1*.

Na cultura da cevada (*Hordeum vulgare* L.), a herança da tolerância ao AI é monogênica, com ação gênica de dominância no caráter (ECHART e CAVALLI-MOLINA, 2002; ECHART et al., 2006), governada pelo gene *Alp*, localizado no cromossomo 4H desta espécie (TANG et al., 2000).

Os autores Gallego e Benito (1997) propuseram a existência de pelo menos dois genes independentes com efeito dominante controlando a tolerância ao AI na cultura do centeio (*Secale cereale* L.). Enquanto isso, estudos relatam a presença de quatro locos: *Alt1*, localizado no cromossomo 6RS; *Alt2*, no cromossomo 3RS; *Alt3*, no cromossomo 4RL, e o loco *Alt4*, localizado no cromossomo 7RS (MIFTAHUDIN et al., 2005; MATOS et al., 2005).

Na cultura da aveia branca (*Avena sativa* L.), a tolerância ao AI é controlada por um gene (OLIVEIRA, 2002; NAVA et al., 2006), ou por um ou dois genes dominantes (WAGNER et al., 2001). Os pesquisadores Sánches-Chacón et al. (2000) igualmente concluíram que o controle da tolerância à toxicidade do AI em aveia branca é governada por um único gene com ação gênica de dominância, contudo, em seu trabalho é possível verificar a aditividade e a dominância parcial atuando na expressão deste caráter em alguns dos cruzamentos realizados. Enquanto isto, quatro QTLs relacionados à tolerância ao AI foram descritos na cultura da aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.), explicando 55% da variação de tolerância observada (WIGHT et al., 2006).

De acordo com Ferreira et al. (1997) e Ferreira et al. (1999), a tolerância ao Al em arroz (*Oryza sativa* L.) se comporta como um caráter quantitativo, entretanto, não há concordância em relação aos efeitos envolvidos na expressão do caráter. Esses dados corroboram com as avaliações efetuadas por Wu et al. (2000) e Nguyen et al., (2003), os quais verificaram QTLs identificados em todos os doze cromossomos, avaliando quatro diferentes populações de arroz.

A tolerância ao Al na cultura do milho (*Zea mayz* L.) parece ser controlada por um pequeno número de genes (SAWAZAKI e FURLANI, 1987); sendo relatado por Sibov et al. (1999) a identificação de dois QTLs associados a este caráter, localizados nos cromossomos dois e dez nesta espécie. Já Ninamango-Cárdenas et al. (2003) demonstraram a existência de cinco QTLs mapeados nos cromossomos dois, seis e oito. No sorgo (*Sorghum bicolor* L.), este caráter é controlada por um único grande gene, o *Alt_{SB}*, localizado no cromossomo três (MAGALHÃES et al., 2004).

Com o advento dos marcadores moleculares, se tornou possível identificar e mapear regiões genômicas associadas à tolerância ao Al, possibilitando a clonagem dos genes de interesse, e assim, dar suporte aos estudos sobre mecanismos envolvidos nos processos da tolerância nas diversas espécies, além de constituir uma ferramenta importante de caracterização e seleção de genótipos promissores (CANÇADO et al., 2001).

1.5 Avaliação e seleção de plantas com base na expressão fenotípica

A seleção de plantas quanto à tolerância ao Al em programas de melhoramento genético tem sido efetuada principalmente através da adoção de cultivo hidropônico pelo emprego de soluções nutritivas, pois se caracteriza como uma técnica simples, e que evidencia elevada correlação com resultados obtidos em condições de campo (CAMARGO e OLIVEIRA, 1981a; BAIER et al., 1995; SOUZA, 2001; SPEHAR e SOUZA, 2006). Atualmente, esta metodologia segue como um procedimento inicial para identificação dos genótipos mais tolerantes, que após seleção prévia, são avaliados em condições naturais de acidez e disponibilidade de Al na solução do solo.

O cultivo em solução nutritiva permite a avaliação não destrutiva de um grande número de genótipos em reduzido período de tempo, em estágio de plântula e com um mínimo de investimento em espaço e equipamentos, proporcionando ganhos significativos para a eficiência de seleção (CANÇADO et al., 1999). Além disto, esta técnica proporciona a avaliação específica quanto à tolerância ao Al, pois favorece o controle eficiente das condições experimentais, possibilitando o isolamento e análise exclusiva dos fatores de tratamento (VOSS et al., 2006).

De forma geral, as soluções nutritivas se caracterizam pela combinação de uma série de componentes químicos essenciais às plantas, formando uma solução nutritiva completa e adição de Al; ou pela utilização de uma solução mínima, caracterizada pela reduzida composição em elementos químicos, formada pela adoção de concentrações de Al à uma solução constituída unicamente por Ca diluído. O Ca é adicionado para evitar a desestabilização do pH, acelerar o alongamento radicular e, conseqüentemente, aumentar a absorção de Al (GARLAND et al., 1990). Contudo, a condução do experimento, a composição das soluções nutritivas (nutrientes constituintes e respectivas concentrações), as doses e fontes de Al adotadas, assim como os caracteres a serem considerados na avaliação, são fatores que devem ser determinados com base nas características de cada espécie em avaliação, exigindo uma abordagem mais aprofundada.

1.5.1 Soluções mínimas

Todas as técnicas de avaliação baseadas na utilização de soluções nutritivas se assemelham por iniciar com a germinação de sementes previamente desinfestadas em câmara de crescimento, respeitando as características intrínsecas e período de germinação de cada espécie. Posteriormente, sementes germinadas, apresentando tamanho uniforme de raiz, são transferidas para recipientes contendo solução nutritiva, com aeração constante e controle de temperatura e do pH da solução.

As metodologias de avaliação de plantas quanto a tolerância ao Al baseadas em soluções nutritivas mínimas vêm sendo empregada com grande eficiência na cultura do milho (*Zea mays* L.), da soja (*Glycine max* L. Merr.), e do arroz (*Oryza sativa* L.), apresentando variações na concentração dos íons Ca e Al adotadas,

tempo de exposição ao elementos tóxico e caracteres a serem considerados na avaliação.

Mazzocato et al. (2002) verificaram maior eficiência na caracterização de 22 genótipos de milho adotando 6 mg L^{-1} de Al em solução nutritiva contendo 40 mg L^{-1} de Ca (equivalente à $222,22 \text{ } \mu\text{M}$ de Al, e $1000 \text{ } \mu\text{M}$ de Ca), sendo os íons disponibilizados nas fontes $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ e $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectivamente. Nesta avaliação, foi mensurado o comprimento inicial da raiz principal (CIR) das plântulas germinadas, e então, transferidas para a solução contendo 40 mg L^{-1} de Ca e 6 mg L^{-1} de Al, onde permaneceram por 48 horas. Após este período, as plântulas permaneceram por mais 48 horas em solução contendo unicamente 40 mg L^{-1} de Ca. Ao completar esta etapa, foi determinado o comprimento final da raiz principal (CFR), definindo a variável comprimento líquido da raiz (CLR; $\text{CLR} = \text{CFR} - \text{CIR}$), considerada a mais eficiente para a detecção da tolerância ao Al em milho nestas condições de cultivo.

Adotando as mesmas fontes salinas utilizadas por Mazzocato et al. (2002), Freitas (2003) propôs a permanência de plântulas de arroz na presença de 40 mg L^{-1} de Ca e Al tóxico durante 120 horas, com posterior transplante e permanência por 48 horas em solução contendo unicamente 40 mg L^{-1} de Ca. Nesta ocasião, a concentração 2 mg L^{-1} de Al na solução tratamento proporcionou adequada caracterização dos 18 genótipos de arroz em avaliação, confirmando o uso da variável comprimento líquido da raiz principal (CLR) como um eficiente caráter em refletir os efeitos tóxicos do Al, inclusive na cultura do arroz. Diferentemente deste autor, Watanabe e Okada (2005) verificaram a maior eficiência na diferenciação entre cultivares de arroz índica e japônica quanto a tolerância ao Al pelo comprimento relativo da raiz (CR_R), quando derivada da relação entre o crescimento líquido apresentado na presença do nível “n” de Al tóxico na solução de cultivo (T), e o desempenho verificado no tratamento controle (C), caracterizado pela ausência do elemento tóxico na solução [$\text{CR}_R = (\text{CFR}_{\text{Tn}} - \text{CIR}_{\text{Tn}}) / (\text{CFR}_{\text{C}} - \text{CIR}_{\text{C}})$]. Nesta avaliação, as plântulas de arroz foram mantidas por 144 horas em solução nutritiva contendo $0,54 \text{ mg L}^{-1}$ de Al e 2 mg L^{-1} de Ca.

Segundo Hede et al. (2001), a maior eficiência de seleção para tolerância ao Al baseada em variáveis relativas comparada à adoção de variáveis diretas, sem sofrer tratamento matemático (caracteres puros), é observada quando sua aplicação possibilita a melhor adequação das diferenças devido à capacidade genotípica de

crescimento de raiz, permitindo a padronização das comparações entre os genótipos para o caráter tolerância ao Al, resultante da expressão dos genes que governam exclusivamente este caráter.

As metodologias baseadas no uso de soluções mínimas vêm sendo amplamente adotadas na caracterização de genótipos de soja quanto à tolerância ao Al. Avaliando 14 populações segregantes de soja, os autores Spehar e Souza (2006) obtiveram resultados eficientes na seleção de genótipos tolerantes ao Al com base no caráter comprimento líquido da raiz principal (CLR) na geração F_2 , sendo os resultados comprovados através do cultivo das plantas selecionadas (F_3) em condições de campo. Estes autores adotaram o nível de $2,0 \text{ mg L}^{-1}$ de Al adicionado à solução, contendo 160 mg L^{-1} de Ca, mantendo as plântulas por 48 horas expostas ao tratamento, com os íons fornecidos nas fontes $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ e $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Enquanto isso, Menosso et al. (2000) e Menosso et al. (2001), adotando o mesmo caráter de avaliação, efetuaram a seleção de genótipos de soja submetendo as plântulas à solução composta por $0,2 \text{ mg L}^{-1}$ de Al e 50 mg L^{-1} de Ca, durante 216 horas, disponibilizados nos sais $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ e $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

O sintoma de toxicidade de Al nas plântulas é evidenciado com a diminuição da força iônica da solução e conseqüente aumento da atividade iônica do Al, e também pelo aumento do período de crescimento das raízes em solução contendo este elemento tóxico (CAMARGO, 1985; CAMARGO et al. 1987). Neste sentido, Watanabe e Okada (2005) verificaram que a diferenciação da tolerância ao Al entre cultivares de arroz índica e japônica se tornou menor com o incremento da concentração de cátions na solução de cultivo, não sendo praticamente observado diferença entre os genótipos com a exposição das plântulas durante 96 horas à $2,7 \text{ mg L}^{-1}$ de Al em solução nutritiva contendo 80 mg L^{-1} de Ca.

1.5.2 Soluções completas

A adoção de soluções completas caracteriza a metodologia mais utilizada na avaliação de plantas cultivadas quanto aos efeitos tóxicos do Al. Esta técnica é amplamente variável de acordo com a composição de nutrientes e respectivos níveis adotados, bem como o modo e período de condução dos experimentos.

O protocolo proposto por Camargo e Oliveira (1981a) conste na técnica mais adotada na caracterização e seleção plantas tolerantes ao Al em cereais de estação fria. Esta metodologia vem sendo adotada a quase 30 anos na avaliação de genótipos de trigo (CAMARGO et al 1981b, 1985, 1987, 2000, 2006; ROSA et al., 1994; DORNELLES et al., 1997; MISTRO et al., 2001; SILVA et al., 2004; BERTAN et al., 2006; SILVA et al.; 2006); sendo verificado também sua adoção em trabalhos conduzidos com a cultura da aveia branca (NAVA et al., 2006; SÁNCHEZ-CHACÓN et al. (2006); SILVA et al., 2006; SILVA et al., 2007; FINATTO et al., 2007), centeio (CAMARGO e FELÍCIO, 1987), triticale (CAMARGO e FELÍCIO, 1987; CAMARGO et al. 2006), e arroz (CAMARGO et al., 1983; FREITAS et al., 2006). Neste protocolo, as sementes germinadas são submetidas ao desenvolvimento por 48 horas em solução nutritiva base (4,0 mM de $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; 2,0 mM de $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 4,0 mM de KNO_3 ; 0,435 mM de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; 0,5 mM de KH_2PO_4 ; 2,0 μM de $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; 0,3 μM de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; 0,8 μM de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 30,0 μM de NaCl ; 10,0 μM de Fe-EDTA; 0,10 μM de $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 10,0 μM de H_3BO_3). Após este período, os genótipos permanecem por 48 horas em solução tratamento, na presença do Al tóxico. A solução tratamento é caracterizada pela adição de Al a uma solução constituída por 10% da concentração salina da solução nutritiva base, adicionando o ferro na forma de $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ em quantidade equivalente ao oferecido na forma de Fe-EDTA, e excetuando o fósforo, a fim de evitar a possível precipitação do Al, conforme descrito por Moore et al. (1976), autor que propôs inicialmente tal composição da solução nutritiva. Posteriormente, as plântulas são retornadas à solução nutritiva base por mais 72 horas.

Segundo os autores Camargo e Oliveira (1981a), a retomada de crescimento de raiz (RCR) apresentada pelas plântulas durante as 72 horas em solução nutritiva base é dependente da severidade provocada pelo Al presente na solução tratamento, e caracteriza uma variável eficiente na diferenciação de genótipos quanto à tolerância a este elemento tóxico. Estes autores inicialmente efetuaram a mensuração do crescimento da raiz no momento do retorno à solução nutritiva e ao final deste período, quantificando a retomada de crescimento (RCR). Contudo, quase a totalidade dos trabalhos cita a realização das mensurações com base no dano visível (calo) causado pelo Al nas raízes, medindo o comprimento da raiz a partir deste ponto. Entre as variações deste protocolo, os níveis de Al adotados nas avaliações das diferentes espécies é a mais marcante, sendo a adição do Al

efetuada invariavelmente na forma de $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$. Doses variando de 1,0 à 10,0 mg L^{-1} de Al são adotadas na avaliação de genótipos de trigo, centeio e triticale (CAMARGO e FELÍCIO, 1987; CAMARGO et al., 2006), contudo, a concentração 10,0 mg L^{-1} de Al é preferencialmente adotada em trabalhos baseados no uso de um único nível do íon tóxico (DORNELLES et al., 1997; SILVA et al., 2004; BERTAN et al., 2006; SILVA et al., 2006). Na cultura da aveia branca, os níveis de Al indicados para a discriminação de genótipos se encontram no intervalo entre 10,0 à 20,0 mg L^{-1} de Al, sendo a concentração de 20,0 mg L^{-1} considerada altamente eficiente (NAVA et al., 2006; SILVA et al., 2006; SÁNCHEZ-CHACÓN et al. 2006; SILVA et al., 2007; FINATTO et al., 2007). Enquanto isso, concentrações compreendidas no intervalo de 5,0 à 40,0 mg L^{-1} tem sido adotadas na avaliação de constituições genética de arroz (CAMARGO et al, 1983; FREITAS et al., 2006).

Adotando a solução nutritiva base proposta por Camargo e Oliveira (1981), os autores Freitas et al. (2006) mantiveram plântulas de 18 genótipos de arroz em solução contendo 0, 10, 20 e 30 mg L^{-1} de Al durante 480 horas, caracterizando os genótipos quanto a tolerância ao Al com base na variável índice de tolerância relativa (ITR_{Al}). Este índice é amplamente adotado nos trabalhos de avaliação de genótipos de espécies anuais quanto á tolerância ao Al. Foi proposto inicialmente por Siddiqi e Glass (1981), e exprime a relação entre o crescimento das raízes na presença e na ausência do Al, corrigido por uma escala formalizada para os genótipos testemunha: $\text{ITR}_{\text{Al}} = \{[(\text{CLR}_x - \text{CLR}_s)/(\text{CLR}_t - \text{CLR}_s) \times 4,0] + 1,0\}$; sendo que: CLR_x , CLR_s e CLR_t , representam os valores do crescimento relativo (crescimento radicular na presença de Al/crescimento radicular na ausência de Al) de raízes dos genótipos em estudo (x), controle sensível (S) e controle tolerante (T). Desse modo, o genótipo tolerante teria um $\text{ITR} = 5$ e o sensível, um $\text{ITR} = 1$.

Foi sugerido por Dornelles et al. (1997) a caracterização simultânea quanto a tolerância ao Al e a sensibilidade ao ácido giberélico (AG_3) em genótipos de trigo adotando a metodologia proposta por Camargo e Oliveira (1981a) para a avaliação quanto à tolerância ao Al, e o uso adicional de AG_3 em solução nutritiva buscando a seleção simultânea de plantas de baixa estatura. O tratamento quanto à sensibilidade ao ácido giberélico é iniciado com a adição de AG_3 na solução nutritiva completa após as 48 horas em solução tratamento com Al, ou após completar as 72 horas em solução nutritiva base, no oitavo dia de avaliação, mantendo, em ambas as situações, as plantas em solução nutritiva contendo AG_3 por 336 horas. Assim

como Dornelles et al. (1997), os autores Silva et al. (2004) e Silva et al. (2006) obtiveram bons resultados caracterizando conjuntamente genótipos de trigo quanto à tolerância ao Al e sensibilidade ao ácido giberélico, adotando as concentrações 10 mg L⁻¹ de Al e 100 mg L⁻¹ de AG₃; efetuando a discriminação em relação à tolerância ao Al com base no caráter retomada do crescimento de raiz (RCR), e a seleção para estatura reduzida de acordo com os caracteres estatura de plântula, comprimento da segunda folha e inserção da primeira folha.

Outras metodologias de avaliação baseadas em soluções nutritivas completas são encontradas na literatura. Ferreira et al. (1997) e Ferreira et al. (1999) avaliaram a herança do caráter tolerância à toxidez de Al em arroz, mantendo as plântulas durante 240 horas na presença de 20 mg L⁻¹ de Al em solução nutritiva (0,75 mM de Ca - Ca(NO₃)₂.4H₂O; 0,46 mM de K - KH₂PO₄, KCl, KNO₃, K₂SO₄; 0,16 mM de Mg - Mg(NO₃)₂.6H₂O; 0,94 mM de NO₃ - Mg(NO₃)₂.6H₂O, Ca(NO₃)₂.4H₂O, NH₄NO₃, KNO₃; 0,27 mM de NH - NH₄NO₃; 0,006 mM de P - KH₂PO₄; 10,0 µM de B - H₃BO₃; 30,0 µM de Fe - FeSO₄.7H₂O, Na₂ EDTA; 4,0 µM de Mn - MnCl₂.4H₂O; 0,3 µM de Mo - Na₂MoO₄.2H₂O; 2,0 µM de Zn - ZnSO₄.7H₂O; 2 µM de Cu - CuSO₄.5H₂O), sendo o Al fornecido na fonte AlCl₃.6H₂O. Nesta situação de cultivo, entre os diversos caracteres de plântula avaliados, o comprimento líquido da raiz principal (CLR) possibilitou a melhor expressão dos efeitos tóxicos do Al nas plântulas de arroz, sendo adotado como caráter representativo da herança da tolerância ao Al nesta avaliação.

Furlani e Furlani (1988) formularam a seguinte solução nutritiva: 3,5 mM de Ca; 2,3 mM de K; 0,82 mM de Mg; 10,6 mM de N - NO₃; 1,29 mM de N - NH₄; 0,63 mM de S - SO₄; 0,03 mM de P - PO₄; 30,0 µM de Fe; 9,0 µM de B; 0,3 µM de Cu; 4,0 µM de Mn; 0,3 µM de Mo; µM de Zn 0,9. Adotando esta solução, Furlani e Furlani (1991) e Paterniani e Furlani (2002) avaliaram genótipos de milho mantendo as plântulas durante 168 horas em solução nutritiva na presença de 4,5 mg L⁻¹ de Al, adotando os caracteres comprimento líquido da raiz principal (CLR) e índice de tolerância relativa (ITR_{Al}) como critério de classificação dos genótipos de milho em tolerantes e sensíveis.

Com base na metodologia de Furlani e Furlani (1988), Vasconcelos et al. (2002) verificaram grande eficiência na caracterização de constituições genéticas de arroz quanto à tolerância ao Al com base no caráter comprimento relativo da raiz (CR_R), mantendo as plântulas 216 horas em solução nutritiva contendo

concentrações de Al variando de 2,15 à 8,64 mg L⁻¹. Adotando esta mesma metodologia, Vicente et al. (1998a) constaram que o caráter rendimento relativo da área radicular se mostra como o indicador mais sensível à toxidez de Al em genótipos de arroz mantidos por 264 horas em solução contendo 0, 10, 20 e 30 mg L⁻¹ de Al, seguido dos caracteres área foliar e comprimento radicular, enquanto que as variáveis rendimento relativo da massa seca das raízes e rendimento relativo da massa seca da parte aérea são medianamente sensíveis. Já Vicente et al. (1998b), procedendo a análise conjunta dos caracteres avaliados em plantas de arroz cultivadas em solução hidropônica no período de 40 dias (960 horas), constataram que a área radicular e o comprimento máximo das folhas são características, que conjuntamente, melhor refletem os efeitos nocivos do Al nas plantas quando presente no ambiente de cultivo, apresentando elevada correlação com os dados de produtividade, apresentados quando os genótipos foram cultivados em situação de campo com solo contendo elevada saturação por Al.

O protocolo descrito por Baier et al. (1995) é o método frequentemente adotado nas avaliações quanto à tolerância ao Al em trigo realizadas na Embrapa Trigo desde o ano de 1999 (VOSS et al., 2006). Este método se baseia na adoção de solução nutritiva composta pelos seguintes nutrientes: 400 mM de CaCl₂; 650 mM de KNO₃; 250 mM de MgCl₂; 10 mM de (NH₄)₂SO₄; 40 mM de NH₄NO₃; sendo a concentração 2 mg L⁻¹ de Al utilizada nas avaliações de rotina, tendo como fonte o sal AlCl₃.6H₂O. Nesta condição, as plântulas permanecem por 96 horas em solução contendo o Al, sendo a interpretação da tolerância ao Al efetuada com base no comprimento relativo da raiz (CR_R) ou no comprimento líquido da raiz principal (CLR), ambos comparados em relação ao desempenho apresentado pela testemunha sensível (cultivar Anahuac 75) e pela tolerante (IAC 5).

Em 1982, o autor Magnavaca, avaliando a herança do caráter tolerância ao Al em milho, propôs o uso na seguinte solução nutritiva: 3.527 mM de Ca; 2.310 mM de K; 855 mM de Mg; 10.857 mM de NO₃; 1.300 mM de NH₄⁺; 45 mM de P; 587 mM de S; 25 mM de B; 595 mM de Cl; 77 mM de Fe; 9,1 mM de Mn; 0,63 mM de Cu; 0,83 mM de Mo; 2,29 mM de Zn; 1,74 mM de Na; 75 mM de EDTA; e Al fornecido na forma de KAl(SO₄)₂.12H₂O, sendo adicionado nesta solução 6 mg L⁻¹ de Al, onde as plântulas permaneceram por 168 horas. Alves et al. (2004) confirmam a eficiência de uso da concentração 6 mg L⁻¹ de Al na caracterização de genótipos de milho quanto à tolerância ao Al em hidroponia com base no caráter comprimento líquido da raiz

principal (CLR), determinado após 120 horas em contato com a solução nutritiva. Enquanto isso, Andrade Junior et al. (2005), fazendo uso desta mesma técnica, verificaram melhor representação das diferenças entre genótipos de sorgo sensíveis e tolerantes de acordo com o comprimento relativo da raiz (CR_R), utilizando a concentração de $4,5 \text{ mg L}^{-1}$ do íon tóxico.

Avaliando genótipos de milho quanto à tolerância ao Al adotando o protocolo proposto por Magnavaca (1982), os autores Cançado et al. (2002) incluíram a etapa de coloração das raízes das plântulas com o corante hematoxilina. Esta técnica caracteriza uma ferramenta interessante na distinção de plantas tolerantes ao Al, pois além da elevada eficiência de seleção, possibilita a avaliação precoce e não destrutiva de grandes populações segregantes derivadas de germoplasma elite, não exigindo a adoção de mensurações quantitativas laboriosas (HEDE et al., 2001). Este método se baseia na propriedade colorimétrica da hematoxilina, que em presença do Al presente nas raízes é complexada e oxidada à hemateína, originando uma coloração azul-púrpura com intensidade diretamente proporcional à concentração interna de Al na raiz, e negativamente correlacionada com tolerância apresentada pelos genótipos, decorrente da capacidade de exclusão do Al do ápice radicular (TANG et al., 2000).

Na avaliação efetuada por Cançado et al. (2002), após o tratamento com Al, as raízes das plântulas foram lavadas por 15 minutos em água destilada, e em seguida colocadas por 20 minutos em solução de hematoxilina 2% e 0,2% de KIO_3 , e por fim, novamente lavadas em água destilada por 15 minutos. Nesta avaliação, os ápices radiculares das plântulas foram classificados visualmente através de notas conferidas, variando de 0 (ausência completa de coloração) à 5 (completamente corados). Estes autores verificaram que o uso combinado deste teste com a caracterização dos genótipos com base no comprimento líquido da raiz principal (CLR) proporcionou a discriminação eficaz e precoce de genótipos de milho quanto à tolerância ao Al, com elevada correlação entre as observações obtidas entre estas variáveis (0,76).

Avaliando genótipos de cevada, Tang et al. (2000) e Echart et al. (2006) iniciaram os estudos mantendo as plântulas por 72 horas em solução nutritiva ($4,0 \text{ mM}$ de $CaCl_2$; $6,5 \text{ mM}$ de KNO_3 ; $2,5 \text{ mM}$ de $MgCl_2$; $0,1 \text{ mM}$ de $(NH_4)_2SO_4$; $0,4 \text{ mM}$ de NH_4NO_3), com posterior adição de $1,85 \text{ mg L}^{-1}$ de Al (TANG et al., 2000) e $1,11 \text{ mg L}^{-1}$ de Al (ECHART et al., 2006) na solução, respectivamente, fornecido na forma de

$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, onde as plântulas permaneceram por mais 24 horas. Após este período, as raízes das plântulas foram lavadas em água deionizada e coradas em solução contendo 0,2% de hematoxilina e 0,02% de KIO_3 por 15 minutos, e em seguida, enxaguadas durante uma hora em água deionizada, classificando os genótipos de acordo com a coloração evidenciada no ápice radicular (C-completamente corada; P-parcialmente corada; N-não corada).

Existe uma série de variações na avaliação dos resultados obtidos após o tratamento com o corante hematoxilina. Polle et al. (1978) adotaram a coloração no ápice da raiz como o indicador da tolerância ao Al, pois verificou que à medida que a concentração de Al na solução era aumentada, a coloração das raízes das plântulas se elevava, gerando uma relação direta com a redução na taxa de sua elongação, com a coloração das radículas mais intensa nos genótipos sensíveis. Aniol (1984) adotou a avaliação da tolerância ao Al com base na habilidade das plântulas continuarem o crescimento da raiz após um curto período de exposição a elevadas concentrações de Al, onde as plântulas sensíveis não apresentam a retomada do crescimento das raízes (RCR) pelo dano provocado pelo Al no meristema apical da raiz. Desta forma, a tolerância ao Al com base neste método vem sendo definida tanto com base na retomada do crescimento da raiz (GALLEGO e BENITO, 1997; HEDE et al., 2001) quanto na intensidade de coloração das raízes (TANG et al., 2000; ECHART et al., 2006).

Na avaliação de culturas perenes, se verifica a adoção de maior período de exposição das plantas ao efeito tóxico do Al, e também o uso de maiores concentrações do íon metálico no meio de cultivo. Mauri et al (2004), avaliando clones de café (*Coffea canephora*; *Coffea arabica*) em solução nutritiva (3,750 mM de N; 1,28 mM de K; 0,03 mM de P; 1,25 mM de Ca; 0,5 mM de Mg; 11,5 mM de B; 0,02 mM de Cu; 220 mM de Fe-EDTA; 2,25 mM de Mn; 0,13 mM de Mo; 0,05 mM de Zn), efetuaram a caracterização dos genótipos após 2280 horas (95 dias) na presença de 13,5, 27, e 54 g L^{-1} de Al, disponibilizado na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Estes autores verificaram a redução da massa seca total, massa de parte aérea e do comprimento de raiz em doses superiores a 13,5 g L^{-1} de Al, sendo constatado o maior desenvolvimento das plantas em doses inferiores. Enquanto isso, Tecchio et al. (2005) avaliaram clones de porta-enxertos de videira das cultivares IAC313-Tropical e IAC572-Jales, submetidos à 1800 horas (75 dias) na presença de Al em solução nutritiva (3,5 mM de Ca; 2,2 mM de K; 2,6 mM de Mg; 10,6 mM de N - NO_3 ;

1,3 mM de N - NH_4 ; 0,5 mM de S - SO_4 ; 0,03 mM de P - PO_4 ; 0,5 mM de Cl; 89,5 μM de Fe; 46,2 μM de B; 0,3 μM de Cu; 9,1 μM de Mn; 0,01 μM de Mo; 0,8 μM de Zn). O Al foi fornecido na forma de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, sendo que doses inferiores a 10 mg L^{-1} de Al proporcionaram o incremento no desenvolvimento do porta-enxerto IAC572-Jales, enquanto que em concentrações superiores o menor desenvolvimento vegetal foi observado nas duas variedades avaliadas.

1.5.3 Bioensaios e experimentos em condições de campo

A avaliação de genótipos quanto à tolerância ao Al baseada em experimentos conduzidos em condições de campo ou mesmo na forma de bioensaios tem sido principalmente adotada no intuito de confirmar resultados previamente obtidos em avaliações conduzidas em solução nutritiva, bem como verificar possíveis efeitos de interação genótipo x ambiente (HEDE et al., 2001).

Os bioensaios se caracterizam por serem conduzidos em ambiente protegido, entretanto, com a adoção de solos ou substratos representativos de ambientes críticos ao desenvolvimento vegetal devido a elevada acidez e toxicidade por Al. Estes ensaios podem ser conduzidos através da utilização de solo ácido rico em Al, e obtendo diferentes concentrações de Al livre na solução do solo através da correção da acidez com a adição de doses de corretivos calculadas previamente (OLMOS e CAMARGO, 1976; MILAN et al., 1991; LIMA et al., 2003; COSTA et al., 2003). Outra metodologia proposta é a adição de alguma fonte salina de Al visando o aumento do conteúdo de Al no solo, com a disponibilização de diferentes concentrações deste elemento mantida através do controle do pH (ANDRADE, 1976; FURTINI NETO et al., 1999; JAIRÓ et al., 2003).

Diferenças para um mesmo genótipo verificadas nos distintos níveis de Al são devido ao efeito tóxico deste íon no ambiente de cultivo, enquanto as diferenças detectada entre os genótipos representam a variabilidade para o caráter tolerância ao Al entre as constituições testadas. Enquanto os caracteres de plântula (matéria seca total, matéria seca de parte aérea, comprimento de raiz, caracteres componentes do rendimento, etc) apresentam correlação positiva com a produção (grãos, matéria verde, frutos, etc), o desempenho observado para estes caracteres é

diretamente inverso à saturação com Al verificada no ambiente de cultivo (MILAN et al., 1991; LIMA et al., 2003; COSTA et al., 2003).

Avaliações em situação de campo apresentam a vantagem de representar com maior fidelidade as condições comerciais de cultivo, e caracterizam a forma mais direta de avaliar o nível de tolerância ao Al das constituições genéticas em estudo (SPEHAR e SOUZA, 2006). Contudo, a avaliação de genótipos quanto à tolerância ao Al a campo exige um período mais longo de experimentação, pois há a necessidade da condução do experimento até o final do ciclo das culturas anuais, e por um período mínimo que seja representativo em culturas perenes (VOSS et al., 2006; CANÇADO et al., 1999). Além disso, tais análises são extremamente trabalhosas, havendo ainda a influência de vários fatores ambientais de difícil controle e mensuração que podem interferir no processo de seleção (Ex: variações de pH, temperatura, umidade, teor de nutrientes no solo, etc....).

A tolerância ao Al avaliada a campo pode ser conduzida através da avaliação do desenvolvimento das plantas em duas situações de ambiente: uma em área experimental cuja fertilidade não é limitante em relação aos nutrientes exigidos para a cultura, entretanto, evidencia solos naturalmente ácidos e que possuem teores de Al livre na solução; e um segundo experimento conduzido em área apresentando fertilidade corrigida, e que não apresenta nenhuma limitação quanto à acidez e Al livre na solução do solo (CAMARGO et al., 1995; JOHNSON et al., 1997). Desta maneira, os dados podem ser obtidos com base na razão entre o desempenho na produtividade e nos caracteres de interesse obtidos nas condições restritivas de fertilidade, em relação ao observado no ambiente corrigido quanto à acidez e Al livre. Outra forma de caracterizar genótipos a campo é simplesmente submetendo-os ao cultivo em ambiente contendo solos naturalmente ácidos e ricos em Al livre na solução, e efetuando a comparação entre os genótipos com base no desempenho evidenciado nos diferentes caracteres de planta nestas condições de ambiente (SOUZA, 2001; SPEHAR e SOUZA, 2006).

1.5.4 Outras técnicas de avaliação

Outros métodos menos comuns de avaliação de plantas quanto aos efeitos nocivos do Al são encontrados na literatura, entre os quais, pode ser descrito o

cultivo *in vitro*. Contudo, a caracterização de constituições genéticas quanto à tolerância ao Al em cultivo *in vitro* tem sido pouco aplicada nas avaliações de plantas cultivadas, possivelmente pela dificuldade em cultivar células em baixo pH, o qual é necessário para manter o Al ativo no meio de cultivo (HEDE et al., 2001). Desta forma, a cultura de tecidos tem sido adotada basicamente com o objetivo de avaliar a expressão dos efeitos tóxicos do Al em nível celular (TAYLOR, 1995).

Através da adoção de metodologias particularmente distintas, os trabalhos conduzidos em cultivo *in vitro* se restringem à análise do desempenho de uma única constituição genética frente a diferentes tratamentos com Al, e não à caracterização entre genótipos propriamente dita (FORTUNATO e NICOLOSO, 2004; OLIVEIRA et al., 1999). Neste sentido, Basso et al. (2003), avaliaram clones de híbrido de eucalipto obtidos do cruzamento entre *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* em cultivo *in vitro*, adotando o meio de cultura proposto por Gonçalves (1980), adicionando 0, 6,75, 13,5 e 27,0 mg L⁻¹ de Al ao meio através do sal AlCl₃.6H₂O, onde foram mantidos por 672 horas (28 dias). Nesta avaliação, os autores verificaram que a adição de doses crescentes de Al ao meio de cultura provocou a diminuição da absorção dos nutrientes Ca, Mg, P e K pelas plantas, alterando o metabolismo celular, e ocasionando alterações morfológicas na parte aérea, como diminuição da estatura, formação de calos e brotações rígidas, além de evidenciarem maior acúmulo de matéria seca e redução de proteínas solúveis.

Métodos empíricos de avaliação podem ser adotados visando verificar o comportamento de genótipos na presença do Al no ambiente de cultivo. A indução da síntese e deposição de calose (1,3-β-D-Glucan) após curto período de exposição ao íon metálico presente na solução nutritiva tem apresentado elevada correlação com a tolerância ao Al em trigo (ZHANG et al., 1994) e em milho (HORST et al., 1997). Desta forma, o padrão de síntese de calose pode ser um bom indicativo do grau de injúria que o Al causa nas raízes, podendo, inclusive, ser utilizado como um parâmetro de seleção (CANÇADO et al., 2001). Desta mesma forma, Sasaki et al. (1996) propõem que a deposição de lignina pode refletir o grau de injúria que a raiz sofre, e a visualização do conteúdo depositado pode caracterizar um bom marcador da extensão e da localização do dano provocado pelo Al.

Outras avaliações são sugeridas como potenciais variáveis a serem adotadas para a diferenciação entre genótipos quanto a tolerância ao Al, tais como: taxa de atividade fotossintética, taxa de exsudação de ácidos orgânicos, síntese de

proteínas genótipo-específica, etc. (CANÇADO et al., 1999). Contudo, a adoção de métodos empíricos de avaliação deve ser preconizada com o conhecimento prévio dos efeitos nocivos e mecanismos de tolerância ao Al evidenciados por cada espécie em particular e emprego de constituições genéticas padrões, a fim de aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos.

1.6 Considerações finais

A variabilidade genética é de essencial interesse para o melhorista na obtenção de progressos no melhoramento de plantas através da seleção artificial, viabilizando o emprego de técnicas que possibilitem a identificação de genótipos superiores (HARTWIG et al., 2007a). Vinculado a isto, a seleção de constituições genéticas tolerantes ao Al só será obtida com a adoção de um eficiente processo de avaliação das plantas para este caráter.

A utilização de soluções completas na avaliação de genótipos quanto à toxidez por Al se mostra altamente eficiente, contudo, a adoção de soluções mínimas merece atenção, pois permite a economia de reagentes e agilidade na confecção das soluções nutritivas, além de apresentar grande eficiência de seleção quando adequadamente ajustadas à espécie em análise.

O número de plantas avaliadas é um fator importante no sentido de proporcionar representatividade da amostra. Entre as avaliações de espécies anuais baseadas na discriminação de genótipos quanto à tolerância ao Al em solução nutritiva, é observado variação no número de plântulas avaliadas por repetição, de 3 (MAZZOCATO et al., 2002; FREITAS et al., 2006) à 40 plantas em trabalhos com genótipos fixos (PATERNIANI e FURLANI, 2002); e de 35 (SILVA et al., 2006) à 120 indivíduos (FERREIRA et al. 1997) nas avaliações em gerações segregantes. Além disso, grande parte dos trabalhos conduz a caracterização dos genótipos com base em uma única concentração do Al na solução, não efetuando a avaliação do comportamento dos genótipos ao longo do incremento do elemento tóxico no ambiente de cultivo, fator que enriqueceria as informações a respeito da capacidade das plantas em responder fenotipicamente às restrições e melhorias do ambiente.

A tolerância ao Al caracteriza um caráter interessante no estudo comparativo entre genomas de plantas, visto que está relacionado a complexos processos

metabólicos não totalmente elucidados, sendo verificada grande variação nos possíveis mecanismos que determinam este caráter nas diferentes espécies. Além disso, o estudo comparativo consiste numa ferramenta importante na identificação dos alelos mais eficientes a serem incorporados na constituição genética de genótipos elite, tanto via melhoramento convencional quanto através da adoção de técnicas de biotecnologia. Genes e QTLs relacionados à tolerância ao Al estão localizados em regiões ortólogas do genoma entre algumas poáceas. O QTL relacionado à tolerância ao Al localizado no cromossomo 1 do arroz é ortólogo ao gene *Alt_{SB}* do sorgo, localizado no cromossomo 3; enquanto o QTL encontrado no cromossomo 3 do arroz é ortólogo ao gene *Alt_{BH}* do trigo, localizado no cromossomo 4DL, e ao gene *Alp* da cevada, localizado no cromossomo 4H (MAGALHÃES et al., 2004).

Goff et al. (2002) verificaram que aproximadamente 30% dos genes da *Arabidopsis* são encontrados no genoma de subespécies de arroz japônica. Este fato sugere que informações relativas à espécies liliopsida ou magnoliopsida podem ser utilizadas no isolamento de genes ortólogos pertencente ao outro grupo. Neste sentido, Drummond et al. (2001) observaram a semelhança de mais de 40 possíveis genes da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) com alelos envolvidos em mecanismos relacionados à tolerância ao Al em outras oito espécies liliopsidas e magnoliopsidas. Hoekenga et al. (2006) descreveu o isolamento do gene *AtALMT1* em *Arabidopsis thaliana* a partir da sequência do gene *ALMT1* (“Aluminum-activated malate transporter”) do trigo, e Ligaba et al. (2006) descreveram os genes *BnALMT1* e *BnALMT2* em *Brassica napus* a partir desta mesma sequência, sendo todos estes genes envolvidos nos mecanismos de tolerância ao Al. Contudo, o conhecimento dos mecanismos de tolerância da espécie em estudo, metodologia eficiente de avaliação e o caráter adequado de seleção representam de modo simultâneo informações básicas para a obtenção de ganho genético na seleção de plantas tolerantes ao Al.

1.7 Referências bibliográficas

ALVES, V.M.C.; PITTA, G.V.E.; PARENTONI, S.N.; SCHAFFERT, R.E.; COELHO, A.M.; MAGALHÃES, J.V. Toxidez por alumínio e hidrogênio no crescimento de

- raízes de milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.3, n.2, p.311-318, 2004.
- ANDRADE, J.M.V. **Seleção de genótipos de trigo (*Triticum aestivum* L.) tolerantes ao alumínio e ao manganês, com modificação das características químicas do solo**. Dissertação (Mestrado – Agronomia – Fitotecnia). Programa de Pós-graduação em Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, 110f.,1976.
- 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**, Garça, v.4, n.7, 2005. Disponível em <http://www.revista.inf.br/agro07/artigos/artigo01>.
- ANIOL, A. Introduction of aluminum tolerance into aluminum sensitive wheat cultivars. **Journal of Plant Breeding**, Berlin, v.93, n.4, p.331-339, 1984.
- ANIOL, A. Genetics of tolerance to aluminum in wheat (*Triticum aestivum* L. Thell). **Plant and Soil**, Netherlands, v.123, p.223-227, 1990.
- ARAÚJO, J.E.G. Comunicações complementares a respeito do problema do crestamento do trigo. **Archivo Fitotécnico del Uruguay**, Uruguai, v.4, p.337-386, 1951.
- ARAÚJO, J.E.G. O alumínio trocável, possível causa do crestamento do trigo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 4, 1956, Belo Horizonte. **Anais...** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Rio de Janeiro, p.329-337, 1956.
- ARCHAMBAULT, D.J.; ZHANG, G.; TAYLOR, G.J. Accumulation of Al in root mucilage of Al-resistant and Al-sensitive cultivar of wheat. **Plant Physiology**, Rockville, v.112, n.4, p.1471-1478, 1996.
- BAIER, A.C.; SOMMERS, D.J.; GUSTAFSON, J.P. Aluminium tolerance in wheat: correlating hydroponic evaluations with field and soil performances. **Journal of Plant Breeding**, Berlin, v. 114, p.291-296, 1995.
- BASSO, L.H.M.; GONÇALVES, A.N.; SILVEIRA, L.V.A.; LIMA, G.P.P. Efeito do alumínio no crescimento de brotações de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* cultivadas in vitro. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.63, p.167-177, 2003.
- BASU, U.; BASU, A.; TAYLOR, G.J. Differential exudation of polypeptides by roots of aluminum-resistant and aluminum-sensitive cultivars of *Triticum aestivum* L. in

response to aluminum stress. **Plant Physiology**, Rockville, v.106, p.151-158, 1994.

BECKMANN, I. Sobre o cultivo e melhoramento do trigo (*Triticum vulgare* Vill) no sul do Brasil. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.1, n.1, p.64-72, 1954.

BERTAN, I.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; SILVA, A.J.G.; BENIN, G.; VIEIRA, E.A.; SILVA, G.O.; HARTWIG, I.; VALÉRIO, I.P.; FINATTO, T. Dissimilaridade genética entre genótipos de trigo avaliados em cultivo hidropônico sob estresse por alumínio. **Bragantia**, Campinas, v.65, n.1, p.55-63, 2006.

BISSINI, C. A.; MEURER, E.J.; BOHNEN, H. Solos ácidos e afetados por sais. In: MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. 3 ed. Editora Evangraf, Porto Alegre, p.181-205, 2006.

BRONDANI, C.; PAIVA, E. Análise de "RFLP" da tolerância à toxidez do alumínio no cromossomo 2 do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.8, p.575-579, 1996.

CAMARGO, C.E.O.; OLIVEIRA, O.F. Tolerância de cultivares de trigo a diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva e no solo. **Bragantia**, Campinas, v.40, n.3, p.21-31, 1981a.

CAMARGO, C.E.O.; OLIVEIRA, O.F. Melhoramento do trigo. I. Hereditariedade da tolerância à toxicidade do alumínio. **Bragantia**, Campinas, v.40, n.3, p.33-45, 1981b.

CAMARGO, C.E.O.; CAMARGO, O.A.; SOUZA, D.M. Tolerância de cultivares de arroz a diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva. **Bragantia**, Campinas, v.42, n.1, p.192-201, 1983.

CAMARGO, C.E.O. Efeitos de níveis de cálcio combinados com diferentes concentrações de sais na tolerância de trigo à toxicidade de alumínio, em solução nutritiva. **Bragantia**, Campinas, v.44, n.2, p.659-668, 1985.

CAMARGO, C.E.O.; FELÍCIO, J.C. Trigo, tritcale e centeio: avaliação da eficiência ao fósforo e tolerância à toxicidade ao alumínio. **Bragantia**, Campinas, v.46, n.2, p.203-215, 1987.

CAMARGO, C.E.O.; FELÍCIO, J.C.; FERREIRA FILHO, A.W.P.; FREITAS, J.G.; RAMOS, V.J.; KANTHACK, R.A.D.; CASTRO, J.L. Melhoramento do trigo: XXX.

- Avaliação de linhagens com tolerância à toxicidade de alumínio, manganês e ferro em condições de campo. **Bragantia**, Campinas, v.54, n.1, p.81-93, 1995.
- CAMARGO, C.E.O. Controle genético da tolerância do trigo à toxicidade de alumínio em soluções nutritivas. **Bragantia**, Campinas, v.57, n.2, p.215-225, 1998.
- CAMARGO, C.E.O.; FERREIRA FILHO, A.W.P.; FELICIO, J.C. Herança da tolerância ao alumínio em populações híbridas de trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.3, p.517-522, 2000.
- CAMARGO, C.E.O.; FELÍCIO, J.C.; FERREIRA FILHO, A.W.P.; LOBATO, M.T.V. Tolerância de genótipos de trigo comum, trigo duro e tritcale à toxicidade de alumínio em soluções nutritivas. **Bragantia**, Campinas, v.65, n.1, p.43-53, 2006.
- CANÇADO, G.M.A.; LOPES, M.A.; PAIVA, E. Genética e bioquímica da tolerância de plantas ao alumínio. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CARVALHO, J.G. **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. SBCS, Viçosa; UFLA/DCS, Lavras; 818p., 1999.
- CANÇADO, G.M.A.; CARNEIRO, N.P.; CARNEIRO, A.A.; PURCINO, A.A.C.; GUIMARÃES, C.T.; ALVES, V.M.C.; PARENTONI, S.N.; SOUZA, I.R.P.; PAIVA, E. Novas perspectivas para a adaptação de culturas ao cerrado. **Biotecnologia Ciência e Desenvolvimento**, Brasília, n.23, p.56-61, 2001.
- CANÇADO, G.M.A.; PARENTONI, S.N.; BORÉM, A.; LOPES, M.A. Avaliação de nove linhagens de milho em cruzamentos dialélicos quanto à tolerância ao Al. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.4, p.471-478, 2002.
- CARVER, B.F.; OWNBY, J.D. Acid soil tolerance in wheat. **Advances in Agronomy**. Beltsville, v.54, p.117-173, 1995.
- COSTA, A.; CAMPOS, L.A.C.; RIEDE, C.R. Reaction of wheat genotypes to soil aluminum differential saturations. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v.46, n.1, p.19-25, 2003.
- DEGENHARDT, J.; LARSEN, P.B.; HOWELL, S.H.; KOCHIAN, L.V. Aluminum resistance in the *Arabidopsis* mutant *alr-104* is caused by an aluminum-induced increase in rhizosphere pH. **Plant Physiology**, Rockville, v.117, p.19-27, 1998.

- DELHAIZE, E.; RYAN, P.R.; RANDALL, P.J. Aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) II. Aluminum stimulated excretion of malic acid from root apices. **Plant Physiology**, Rockville, v.103, p.695-702, 1993.
- DELHAIZE, E.; RYAN P.R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, Rockville, v.107, n.2, p.315-321, 1995.
- DORNELLES, A.L.C.; CARVALHO, F.I.F.; FEDERIZZI, L.C.; SERENO, M.G.C.M.; AMARAL, A.; MILTTELMANN, A. 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.
- DRUMMOND, R.D.; GUIMARÃES, C.T.; FELIX, J., NINAMANGO-CÁRDENAS, F.E.; CARNEIRO, N.P.; PAIVA, E.; MENOSSI, M. Prospecting sugarcane genes involved in aluminum tolerance. **Genetics and Molecular Biology**, Ribeirão Preto, v.24, n.1/4, p.221-230, 2001.
- ECHART, C.L.; CAVALLI-MOLINA, S. Aluminum tolerance in barley: methods for screening and genetic analysis. **Euphytica**, Wageningen, v.126, p.309-313, 2002.
- ECHART, C.L.; BARBOSA-NETO, J.F.; CAVALLI, S.S. Aluminum tolerance in barley: molecular mapping analyses. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.12, n.1, p.15-20, 2006.
- FERREIRA, R.P.; SEDIYAMA, C.S.; CRUZ, C.D.; FREIRE, M.S. Herança da tolerância à toxidez de alumínio em arroz baseada em análises de médias e variâncias. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.5, p.505-515, 1997.
- FERREIRA, R.P.; CRUZ, C.D.; SEDIYAMA, C.S.; PINHEIRO, B.S. Herança da tolerância à toxidez de alumínio em arroz com base em análise dialélica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.4, p.615-621, 1999.
- FINATTO, T.; SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; VALÉRIO, I.P.; REIS, C.E.S.; RIBEIRO, G.; SILVEIRA, G.; FONSECA, D.A.R. Reação de tolerância de genótipos de aveia branca a concentrações de alumínio em solução nutritiva. **Magistra**, Cruz das Almas, v.19, n.1, p.07-15, 2007.
- FLEMING, A.L.; FOY, C.D. Root structure reflects differential aluminum tolerance in wheat varieties. **Agronomy Journal**, Madison, v.60, p.172-176, 1968.

- FORTUNATO, R.P.; NICOLOSO, F.T. Toxidez de alumínio em plântulas de grápia (*Apuleia leiocarpa* Vog. Macbride). **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.1, p.89-95, 2004.
- FOY, C.D.; CHANEY, R.L.; WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v.29, p. 511-566, 1978.
- FREITAS, F.A. **Dissimilaridade genética em arroz (*Oryza sativa* L.) quanto à toxicidade ao alumínio**. Dissertação (Mestrado - Ciência e Tecnologia de Sementes). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 69f., 2003.
- FREITAS, F.A.; KOPP, M.M.; SOUSA, R.O.; ZIMMER, P.D.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.72-79, 2006.
- FURLANI, P. R. Efeitos fisiológicos do alumínio em plantas. In: Simpósio Avançado de Solos e Nutrição de Plantas, 2, Piracicaba, 1989. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, p.73-87, 1989.
- FURLANI, P.R.; FURLANI, A.M.C. Tolerância a alumínio e eficiência a fósforo em milho e arroz: características independentes. **Bragantia**, Campinas, v.50, n.2, p.331-340, 1991.
- FURTINI NETO, A.E.; RESENDE, A.V.; VALE, F.R.; FAQUIN, V.; FERNANDES, L.A. Acidez do solo, crescimento e nutrição mineral de algumas espécies arbóreas, na fase de muda. **Cerne**, Lavras, v.5, n.2, p.01-12, 1999.
- GALLEGO, F.J., BENITO, C. Genetic control of aluminium tolerance in rye (*Secale cereale* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v.92, p.688-695, 1997.
- GARLAND, M.L.; CAMPBELL, K.A.; CARTER JUNIOR, T.E. Aluminum tolerance in soybean: genotypic correlation and repeatability of solution culture and greenhouse screening methods. **Crop Science**, Madison, v.30, p.1049-1054, 1990.
- GOFF, S.A.; RICKE, D.; LAN, T.H.; PRESTING, G.; WANG, R.; DUNN, M.; GLAZEBROOK, J.; SESSIONS, A.; OELLER, P.; VARMA, H.; HADLEY, D.; HUTCHISON, D.; MARTIN, C.; KATAGIRI, F.; LANGE, B.M.; MOUGHAMER, T.;

- XIA, Y. et al. A draft sequence of the rice genome (*Oryza sativa* L. ssp. *japonica*). **Science**, v.296, p.92-100, 2002.
- GONÇALVES, A.N. Reversion to juvenility and cloning of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake in cell and tissue culture systems. In: Simpósio IUFRO em melhoramento genético e produtividade de espécies florestais de rápido crescimento. Águas de São Pedro, 1980. Anais. Citado por BASSO, L.H.M.; GONÇALVES, A.N.; SILVEIRA, L.V.A.; LIMA, G.P.P. Efeito do alumínio no crescimento de brotações de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* cultivadas in vitro. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.63, p.167-177, 2003.
- HARTWIG, I.; SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; BERTAN, I.; VALÉRIO, I.P.; SILVA, G.O.; RIBEIRO, G.; FINATTO, T.; SILVEIRA, G. Variabilidade fenotípica de caracteres adaptativos da aveia branca (*Avena sativa* L.) em cruzamentos dialélicos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.2, p.337-345, 2007a.
- HARTWIG, I.; OLIVEIRA, A.C.; CARVALHO, F.I.F.; BERTAN, I.; SILVA, J.A.G.; SCHMIDT, D.A.M.; VALÉRIO, I.P.; MAIA, L.C.; FONSECA, D.N.R.; REIS, C.E.S. Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. **Semina Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 2, p.219-228, 2007b.
- HEDE, A.R.; SHOVMAND, B.; LÓPEZ-CESATI, J. Acid soils and aluminum toxicity. In: REYNOLDS, M.P., ORTIZ-MONASTERIO, J.I.; MCNAB, A. **Application of physiology in wheat breeding**. CIMMYT, Mexico - D.F., p.172-182, 2001.
- HOEKENGA, O.A.; MARON, L.G.; PIÑEROS, M.A.; CANÇADO, G.M.A.; SHAFF, J.; KOBAYASHI, Y. *AtALMT1*, which encodes a malate transporter, is identified as one of several genes critical for aluminum tolerance in *Arabidopsis*. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, USA, p.103, v.9738-9743, 2006.
- HORST, W.J., A.K. PSCHHEL, AND N. SCHMOHL. Induction of callose formation is a sensitive marker for genotypic aluminium sensitivity in maize. **Plant and Soil**, Netherlands, v.192, p.23-30, 1997.
- HUANG, J.W.W.; PELLET, D.M.; PAPERNIK, L.A.; KACHIAN, L.V. Aluminum interactions with voltage-dependent calcium transport in plasma membrane vesicles isolated from root of aluminum-sensitive and -resistant wheat cultivars. **Plant Physiology**, Rockville, v.110, n.2, p.561-569, 1996.

- HUNGRIA, M.; VARGAS, M.A.T.; ARAUJO, R.S. Fixação biológica do nitrogênio em feijoeiro. In: VARGAS, M.A.T.; HUNGRIA, M. **Biologia dos solos dos cerrados**. EMBRAPA-CPAC, Planaltina, p.189-294, 1997.
- JAN, F.; PETTERSSON, S. Varietal diversity of upland rice in sensitivity to aluminium. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.12, n.9, p.973-993, 1989.
- JO, J.; JANG, Y.; KIM, K.; KIM, M.; KIM, K.; CHUNG, W. Isolation of *ALU1-P* gene encoding a protein with aluminum tolerance activity from *arthrobacter viscosus*. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, Korea, v.239, n.3, p.835-839, 1997.
- JOHNSON, J.P.; CARVER, B.F.; BALIGAR, V.C. Productivity in great plains acid soils of wheat genotypes selected for aluminium tolerance. **Plant and Soil**, Netherlands, v.188, p.101-106, 1997.
- JONES, D.L., KOCHIAN, L.V. Aluminum inhibition of the 1, 4, 5-triphosphate signal transduction pathway in wheat roots: a role in aluminum toxicity? **Plant Cell**, Baltimore, v.7, p.1913-1922, 1995.
- KERRIDGE, P.C.; KRONSTAD, W.E. Evidence of genetic resistance to aluminum toxicity in wheat (*Triticum aestivum* Vill., Host). **Agronomy Journal**, Madison, v.60, p.710-711, 1968.
- KLIMASHEVSKII, E.L.; CHERNYSHEVA, N.F. Content of organic, acids and physiologically active compounds in plants differing in their susceptibility to the toxicity of Al^{3+} . **Soviet Agricultural Sciences**, v.2, p.05-08, 1980.
- KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v.46, p.237-260, 1995.
- KOCHIAN, L.V.; HOEKENGA, O.A.; PIÑEROS, M.A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v.55, p. 459-493, 2004.
- LAGOS, M.B.; FERNANDES, M.I.M.; CAMARGO, C.E.O., FEDERIZZI, L.C.; CARVALHO, F.I.F. Genetics and monosomic analysis of aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Revista Brasileira de Genética**, Ribeirão Preto, v.14, p.1011-1020, 1991.

- LEE, E.H.; FOY, C.D. Aluminum tolerances of two snapbean cultivars related to organic acid content evaluated by high performance liquid chromatography. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.9, p.1481-1498, 1986.
- LIGABA, A.; KATSUHARA, M.; RYAN, P.R.; SHIBASAKA, M.; MATSUMOTO, H. The *BnALMT1* and *BnALMT2* genes from rape encode aluminum-activated malate transporters that enhance the aluminum resistance of plant cells. **Plant Physiology**, Rockville, v.142, p.1294-1303, 2006.
- LIMA, D.V.; KLIEMANN, H.J.; FAGERIA, N.K.; MORAES, M.F.; LEANDRO, W.M.; SEVERIANO, E.C. Saturação por alumínio e relação Al/Ca para a cultura da soja em solos de Cerrado. **Revista Agricultura Tropical**, Goiânia, v.7, n.1, p.106-118, 2003.
- LUO, M.C.; DVORAK, J. Molecular mapping of an aluminum tolerance locus on chromosome 4D of Chinese Spring wheat. **Euphytica**, Wageningen, v. 91, p. 31-35, 1996.
- MAGALHÃES, J.V.; GARVIN, D.F.; WANG, Y.; SORRELLS, M.E.; KLEIN, E.P.; ROBERT, E.; SCHAFFERT, R.E.; LI, L.; KOCHIAN, L.V. Comparative mapping of a major aluminum tolerance gene in sorghum and other species in the poaceae. **Genetics**, v.167, p.1905-1914, 2004.
- MAGNAVACA, R. **Genetic variability and inheritance of aluminum tolerance in maize**. Tese (Philosophical Doctor). Lincoln, University of Nebraska, 135f., 1982.
- MATOS, M.; CAMACHO, M.V.; PÉREZ-FLORES, V.; PERNAUTE, B.; PINTO-CARNIDE, O.; BENITO, C. A new aluminum tolerance gene located on rye chromosome arm 7RS. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v.111, p.360-369, 2005.
- MATSUMOTO, H.; HIRASAWA, F.; TORIKAI, H.; TAKAHASHI, E. Localization of absorbed aluminium in pea root and its binding to nucleic acids. **Plant Cell Physiology**, Kyoto, v.17, p.627-631, 1976.
- MAURI, J.; ZONTA, E.; MATTIELLO, E.M.; PEREIRA, M.G.; MATIELLO, J.D.; MEIRELES, P.G. Avaliação do desenvolvimento de *Coffea canephora* e *Coffea arabica* cultivadas em solução nutritiva em diferentes doses de alumínio. **Revista**

- Universidade Rural: Série Ciências da Vida**, Seropédica, v.24, n.1, p.79-84, 2004.
- MAZZOCATO, A.C.; ROCHA, P.S.G.; SERENO, M.J.C.M.; BOHNEN, H.; GRONGO, V., BARBOSA NETO, J.F. Tolerância ao alumínio em plântulas de milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.1, p.19-24, 2002.
- MENOSSO, O.G.; COSTA, J.A.; ANGHINONI, I.; BOHNEN, H. Tolerância de genótipos de soja ao alumínio em solução. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.11, p.2157-2166, 2000.
- MENOSSO, O.G.; COSTA, J.A.; ANGHINONI, I.; BOHNEN, H. Crescimento radicular e produção de ácidos orgânicos em cultivares de soja com diferentes tolerâncias ao alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.11, p.1339-1345, 2001.
- MIFTAHUDIN; CHIKMAWATI, T.; ROSS, K.; SCOLES, G.J.; GUSTAFSON, J.P. Targeting the aluminum tolerance gene *Alt3* region in rye, using rice/rye micro-collinearity. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v.110, p. 906-913, 2005.
- MLLAN, P.A; RITTER, W.; DALL'AGNOL, M. Seleção de leguminosas forrageiras tolerantes a alumínio e eficientes na utilização de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, n.1, p.119-124, 1991.
- MIRANDA, J.C.C.; MIRANDA, L.N. Micorriza arbuscular. In: VARGAS, M.A.T.; HUNGRIA, M. **Biologia dos solos dos cerrados**. EMBRAPA-CPAC, Planaltina, p.69-123, 1997.
- MISTRO, J.C.; CAMARGO, C.E.O.; PETTINELLI-JÚNIOR, A. Genética e melhoramento de plantas avaliação de genótipos de trigo, de diferentes origens, em relação à toxicidade de alumínio. **Bragantia**, Campinas, v.60, n.3, p.177-184, 2001.
- MIYASAKA, S.C.; BUTA, J.G.; HOWELL, R.K.; FOY, C.D. Mechanism of aluminum tolerance in snapbeans: root exudation of citric acid. **Plant Physiology**, Rockville, v.96, p.737-743, 1991.
- 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, 1976, Beltsville. **Proceedings...** Ithaca, Cornell University, p.287-295, 1976.
- MOUSTAKAS, M.; OUZOUNIDOU, G.; LANNOYE, R. Aluminum effects on photosynthesis and elemental uptake in an aluminum-tolerant and non-tolerant wheat cultivar. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.18, n.4, p.669-683, 1995.
- NAVA, I.C.; DELATORRE, C.A.; DUARTE, I.T.L.; PACHECO, M.T.; FEDERIZZI, L.C. Inheritance of aluminum tolerance and its effects on grain yield and grain quality in oats (*Avena sativa* L.). **Euphytica**, Wageningen, v.148, n.3, p.353-358, 2006.
- NGUYEN, B.D.; BRAR, D.S.; BUI, B.C.; NGUYEN, T.V.; PHAM, L.N.; NGUYEN, H.T. Identification and mapping of the QTL for aluminum tolerance introgressed from the new source, *Oryza rufipogon* Griff., into indica rice (*Oryza sativa* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v.106, p.583-593, 2003.
- NINAMANGO-CÁRDENAS, F.E.; GUIMARÃES, C.T.; MARTINS, P.R.; PARENTONI, S.N.; CARNEIRO, N.P.; LOPES, M.A.; MORO, J.R.; PAIVA, E. Mapping QTLs for aluminum tolerance in maize. **Euphytica**, Wageningen, v.130, p.223-232, 2003.
- NODARI, R.O.; CARVALHO, F.I.F.; FEDERIZZI, L.C. Bases genéticas da herança do caráter tolerância ao crestamento em genótipos de trigo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.17, n.2, p.269-280, 1982.
- OLIVEIRA, M.F.; FORTES, G.R.L.; SILVA, J.B.; ANDRADE, L.B.; FLORES, R.; CAMARGO, J.T. Organogênese de clones de macieira de diferentes meios com picloram e alumínio. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.5, n.1, p.31-34, 1999.
- OLIVEIRA, P.H. **Herança genética e mapeamento molecular da tolerância à toxicidade do alumínio em aveia**. Tese (Doutorado – Agronomia – Fitotecnia). Programa de Pós-graduação em Agronomia, UFRGS, Porto Alegre, 101f., 2002.
- OLMOS, J. I. L.; CAMARGO, M. N. Ocorrência de alumínio tóxico nos solos do Brasil, sua caracterização e distribuição. **Ciência Cultura**, São Paulo, v.21, n.2, p.171-180, 1976.
- PATERNIANI, M.E.A.G.; FURLANI, P.R. Tolerância à toxicidade de alumínio de linhagens e híbridos de milho em solução nutritiva. **Bragantia**, Campinas, v.61, n.1, p.11-16, 2002.

- PAIVA, O. Notas sobre fisiologia e seleção de trigo. **Revista Agronômica**, Porto Alegre, v.6, p.535-536, 1942.
- POLLE, E.; KONZAK, C.F.; KITTRICK, J.A. Visual detection of aluminum tolerance levels in wheat by hematoxylin staining of seedling roots. **Crop Science**, Madison, v.18, p.823-827, 1978.
- RENGEL, Z. Uptake of aluminium by plant cells. **New Phytologist**, v.134, n.3, p.389-406, 1996.
- RICHARDS, K.D.; SCHOTT, E.J.; SHARMA, Y.K.; DAVIS, K.R.; GARDNER, R.C. Aluminum induces oxidative stress genes in *Arabidopsis thaliana*. **Plant Physiology**, Rockville, v.116, p.409-418, 1998.
- RIEDE, C.R.; ANDERSON, J.A. Linkage of RFLP markers to an aluminum tolerance gene in wheat. **Crop Science**, Madison, v. 36, p.905-909, 1996.
- RING, S.M.; FISHER, R.P.; POILE, G.J.; HELYAR K.R.; KONYERS, M.K.; MORRIS, S.G. Screening species and cultivars for their tolerance to acidic soil conditions. **Plant Soil**, Netherlands, v.155/156, p.521-524, 1993.
- ROSA, O.S.; CAMARGO, C.E.O.; RAJARAM, S.; ZANATTA, A.C.A. Produtividade de trigo (*Triticum aestivum* (L.) Thell.) com tolerância ao alumínio tóxico no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.3, p.411-417, 1994.
- ROSSIELLO, R.O.P.; JACOB NETTO, J. Toxidez por alumínio em plantas: novos enfoques para um velho problema. In: FERNANDES, M.S. **Nutrição mineral de plantas**. Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, Viçosa, p.376-418, 2006.
- RYAN, P.R., DITOMASO, J.M., KOCHIAN, L.V. Aluminum toxicity in roots: an investigation of spatial sensitivity and the role of the root cap. **Journal Experimental Botany**, Oxford, v.44, p.437-446, 1993.
- SÁNCHEZ-CHACÓN, C.D.; FEDERIZZI, L.C.; MILACH, S.C.K.; PACHECO, M.T. Variabilidade genética e herança da tolerância à toxicidade do alumínio em aveia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.9, p.1798-1808, 2000.
- SASAKI, T.; YAMAMOTO, Y.; EZAKI, B.; KATSUHARA, M.; AHN, S.J.; RYAN, P.R.; DELHAIZE, E.; MATSUMOTO, H. A wheat gene encoding an aluminum-activated malate transporter. **Plant Journal**, Heslington, v. 37, p.645-653, 2004.

- SASAKI, M.; YAMAMOTO, Y.; MATSUMOTO, H. Lignin deposition induced by aluminum in wheat (*Triticum aestivum*) roots. **Physiologia Plantarum**, Oxford, v.96, n.2, p.193-198, 1996.
- SAWAZAKI, E.; FURLANI, P.R. Genética da tolerância ao alumínio em milho cateto. **Bragantia**, Campinas, v.46, n.2, p.269-278, 1987.
- SCHLINDWEIN, J.A.; NOLLA, A.; ANGHINONI, I.; MEURER, E. Redução da toxidez de alumínio em raízes de soja por cultivares antecessoras no sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.9, n.1, p.85-88, 2003.
- SCHULZE, E.D.; BECK, E.; MÜLLER-HOHENSTEIN, K. **Plant Ecology**, Berlin, p.195-206, 2005.
- SIBOV, S.T.; GASPAR, M.; SILVA, M.J.; OTTOBONI, L.M.M.; ARRUDA, P.; SOUZA, A.P. Two genes control aluminum tolerance in maize: genetic and molecular mapping analyses. **Genome**, p.1-8, v.42, 1999.
- SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.4, n.3, p.289-302, 1981.
- SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; SILVA, S.A.; MARCHIORO, V.S.; LORENCETTI, C.; BENIN, G.; SCHMIDT, D.M.; HARTWIG, I. Trigos di-haplóides com potencial para tolerância a toxicidade ao alumínio e a sensibilidade ao ácido giberélico em cultivo hidropônico. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.10, n.1, p.37-41, 2004.
- SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; COIMBRA, J.L.M.; BENIN, G.; OLIVEIRA, A.C.O.; VIEIRA, E.A.; FINATTO, T.; BERTAN, I.; SILVA, G.O.; GARCIA, S.M. Tolerância à toxicidade por alumínio em cultivares de aveia (*Avena sativa* L.) sob cultivo hidropônico. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.12, n.3, p.265-271, 2006.
- SILVA, S.V.; CARVALHO, F.I.F.; SILVA, J.A.G.; OLIVEIRA, A.C.; CRUZ, P.J.; CAETANO, V.R.; DIAMANTINO, M.S.A.S.; PASSOS, A.R.; VIEIRA, E.A.; SIMIONI, D. Toxicidade do alumínio e efeito do ácido giberélico em linhas quase isogênicas de trigo com o caráter permanência verde e maturação sincronizada. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, p.765-771, 2006.

- SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; COIMBRA, J.L.M.; VIEIRA, E.A.; BENIN, G.; OLIVEIRA, A.C.; FINATTO, T.; BERTAN, I.; SILVA, G.O.; CORREA, M.R. Tolerância ao alumínio em cultivares de aveia branca sob cultivo hidropônico. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.4, p.587-593, 2007.
- SOUZA, L.A.C. Reação de genótipos de soja ao alumínio em hidroponia e no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, n.36, n.10, p.1255-1260, 2001.
- SPEHAR, C.R.; SOUZA, L.A.C. Selection for aluminum tolerance in tropical soybeans. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.36, n.1, p.01-06, 2006.
- TANG, Y.; SORRELLS, M.E.; KOCHIAN, L.V.; GARVIN, D.F. Identification of RFLP markers linked to the barley aluminum tolerance gene *Alp*. **Crop Science**, Madison, v.40, p.778-782, 2000.
- TAYLOR, G.J. Overcoming barriers to understanding the cellular basis of aluminum resistance. **Plant and Soil**, Netherlands, v.171, p.89-103, 1995.
- TECCHIO, M.A.; PAIOLI-PIRES, E.J.; GRASSI FILHO, H.; BRIZOLA, R.M.O.; VIEIRA, C.R.Y.; TERRA, M.M. Avaliação de variáveis fisiológicas em porta-enxertos de videira cultivados em solução nutritiva com a adição de Al. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.29, n.2, p.274-283, 2005.
- TEDESCO, M.J.; BISSINI, C. A. Acidez do solo e seus efeitos nas plantas. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; CAMARGO, F.A.O. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Editora Gênese, Porto Alegre, p.153-165, 2004.
- VASCONCELOS, S.S.; ROSSIELLO, R.O.P.; JACOB-NETO, J. Parâmetros morfológicos para estabelecer tolerância diferencial à toxicidade de alumínio em cultivares de arroz. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.3, p.357-363, 2002.
- VICENTE, F.M.P.; ROSSIELLO, R.O.P.; PEREIRA, M.B. Características indicativas de sensibilidade ao alumínio em arroz. I. Crescimento em solução nutritiva. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.33, n.1, p.09-15, 1998.
- VOSS, M.; SOUZA, C.N.A.; BAIER, A.C.; NASCIMENTO JÚNIOR, A.; BOFF, T. **Método de avaliação de tolerância à toxidez de alumínio em trigo, em condições de hidroponia, na Embrapa Trigo**. Embrapa Trigo, Passo Fundo,

16p., 2006. Documentos Online 67. Disponível em: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do67.htm.

VOSS, M.; SOUSA, C.N.A.; MATTOS, D.F. **Avaliação de genótipos de trigo e de outros cereais de inverno ao crestamento, em solo com e sem aplicação de calcário**. Embrapa Trigo, Passo Fundo, 22p., 2007. Documentos Online 76. Disponível em: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do76.htm.

ZHANG, G., HODDINOTT, J.; TAYLOR, G.J. Characterization of 1,3- β -D-Glucan (callose) synthesis in roots of *Triticum aestivum* in response to aluminum toxicity. **Journal of Plant Physiology**, v.144, p.229-234, 1994.

ZHANG, G., ARCHAMBAULT, D.J.; SLASKI, J.J.; TAYLOR, G.J. Effects of protein synthesis inhibitors on uptake of aluminum in aluminum-resistant and aluminum-sensitive cultivars of wheat. **Journal of Plant Physiology**, v.147, n.3/4, p.457-462, 1995.

YERMIYAHU, U.; BRAUER, D.K.; KINRAIDE, T.B. Oxidative damage to membranes by a combination of aluminum and iron in suspension-cultured tobacco cells. **Plant and Cell Physiology**, v.38, n.12, p.1333-1339, 1997.

WAGNER, C.W.; MILACH, S.C.K.; FEDERIZZI, L.C. Genetic inheritance of aluminum tolerance in oat. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Viçosa, v.1, p.22-26, 2001.

WATANABE, T.; OKADA, K. Interactive effects of Al, Ca and other cations on root elongation of rice cultivars under low pH. **Annals of Botany**, v.95, n.2, p.379-385, 2005.

WIGHT, C.P.; KIBITE, S.; TINKER, N.A.; MOLNAR, S.J. Identification of molecular markers for aluminium tolerance in diploid oat through comparative mapping and QTL analysis. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v.112, p.222-231, 2006.

WU, P.; LIAO, C.Y.; HU, B.; YI, K.K.; JIN, W.Z.; NI, J.J.; HE, C. QTLs and epistasis for aluminum tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) at different seedling stages. **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v.100, p.1295-1303, 2000.

2. Ambientes diferenciados na manifestação fenotípica de genótipos de aveia branca quanto à tolerância ao alumínio

2.1 Introdução

Os programas de melhoramento genético da aveia branca (*Avena sativa* L.) estão cada vez mais voltados para o desenvolvimento de genótipos com excelente qualidade industrial, rendimento de grãos superior e altamente tolerantes a estresses bióticos e abióticos, proporcionando a adequação de constituições genéticas elite a diferentes sistemas e ambientes de cultivo. Neste sentido, a existência de variabilidade genética é de essencial interesse para o melhorista na obtenção de progressos no melhoramento de plantas através da seleção artificial, viabilizando o emprego de técnicas que possibilitem a identificação de genótipos superiores (HARTWIG et al., 2007a).

O caráter tolerância ao alumínio (Al) tem recebido grande atenção durante o processo de seleção de novas constituições genéticas de aveia branca em populações segregantes. Quando cultivada em solos ácidos com altos teores de Al livre na solução, esta espécie apresenta grande dificuldade para o adequado estabelecimento e desenvolvimento (FLOSS e BAIER, 1979; FLOSS et al., 1980; FLOSS et al., 1983), onde a toxidez por Al representa um dos principais agentes responsáveis pela baixa produtividade dos cereais no Brasil (DELHAIZE e RYAN, 1995; HARTWIG et al., 2007b).

Vários mecanismos de tolerância ao Al em plantas vêm sendo postulados, e podem ser classificados em dois grupos: i) mecanismos de exclusão ou apopláticos, com a imobilização ou neutralização do Al externamente à célula, sendo que as plantas tolerantes possuem a capacidade de impedir a entrada do Al para o interior das células; e ii) mecanismos simplásticos, decorrentes da imobilização ou neutralização do Al dentro da célula, sendo inativado por algumas enzimas ou isolado no interior do vacúolo (JO et al., 1997). Nos últimos anos, grande parte das

pesquisas estão focados na avaliação da inativação do Al com base nos mecanismos apoplásticos, pela exsudação de ácidos orgânicos pela rizosfera em decorrência da presença do Al no ápice das raízes, onde genótipos considerados tolerantes possuem maior capacidade em reconhecer a presença do íon tóxico no ambiente de cultivo, e iniciar a produção e liberação de compostos complexantes no meio (DELHAIZE e RYAN, 1995; KOCHIAN, 1995; ZHENG et al., 1998; LI et al.; 2000; SILVA et al, 2001; MA et al 2004). Segundo os pesquisadores Fleming e Foy (1968), a tolerância das plantas ao Al está relacionada à capacidade de continuidade da divisão e alongação celular sob condições de estresse, modificação do ambiente radicular pela complexação do íon metálico e consequentemente reduzindo a concentração de Al disponível, e da possibilidade de manter áreas meristemáticas viáveis para formação de novos tecidos.

O Al se faz presente predominantemente, na região radicular da planta, sendo o ápice das raízes seu sítio crítico de toxicidade (RYAN et al., 1993). De acordo com Machado (1997), quando este cátion tóxico é absorvido, ocorre a paralisação da divisão celular no meristema apical das raízes, resultando em drástica redução do seu crescimento, e consequentemente, o subdesenvolvimento da planta como um todo pela menor eficiência na absorção de nutrientes e maior sensibilidade à estresses hídricos. Desta forma, a restrição do crescimento radicular tem sido adotado como um caráter eficiente na avaliação da toxicidade de Al e expressão da variabilidade genética estimada entre e dentro de espécies (CAMARGO e OLIVEIRA, 1981; RYAN et al, 1993; CAMARGO, 1998; FERREIRA et al., 1999; MAZZOCATO et al., 2002; VOSS et al., 2006; FERREIRA et al, 2006).

Atualmente, a avaliação de genótipos quanto à tolerância ao Al vem sendo realizada através da adoção de diversas metodologias com o objetivo de elucidar os processos genéticos e fisiológicos da tolerância, além de buscar maior eficiência de seleção para este caráter. Avaliações a campo, apesar de terem a vantagem de representar com maior fidelidade as condições naturais de cultivo, são altamente dificultadas pela influência de vários fatores de ambiente de difícil controle e mensuração atuando sobre o desempenho das plantas, que apresentam manifestação fenotípica induzida ao erro (SILVA et al., 2006; FERREIRA et al., 2006; VOSS et al., 2006). Desta maneira, o cultivo hidropônico tem sido fortemente empregado em programas de melhoramento, pois evidencia elevada correlação com resultados obtidos em condições de campo (CAMARGO e OLIVEIRA, 1981; BAIER

et al., 1995; SOUZA, 2001; SPEHAR e SOUZA, 2006) e apresenta grande vantagem na avaliação de um grande número de genótipos em reduzido período de tempo e no estágio de plântula, proporcionando ganhos significativos para a eficiência de seleção.

Vários métodos baseados no uso de solução nutritiva em condições de hidroponia têm sido desenvolvidos para a avaliação da tolerância e sensibilidade ao Al em espécies anuais. Entre eles, o método proposto por Camargo e Oliveira (1981) tem sido altamente empregado, caracterizado pela combinação de uma série de componentes químicos essenciais à planta, formando uma solução nutritiva completa, e o emprego do sulfato de alumínio $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$ como fonte do íon metálico. Metodologias de avaliação de plantas que adotam soluções nutritivas mínimas também vêm sendo empregadas com grande eficiência na cultura do milho (*Zea mays* L.), do arroz (*Oryza sativa* L.), e da soja (*Glycine max* L. Merr.), as quais são formadas pela adição de concentrações de Al à uma solução contendo unicamente Ca diluído (MAZZOCATO et al., 2002; FREITAS et al., 2003; SPEHAR e SOUZA, 2006). O Ca é adicionado para evitar a desestabilização do pH, acelerar o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, aumentar a absorção de Al (GARLAND et al., 1990).

O desenvolvimento e a otimização de processos de avaliação de plantas em cultivo hidropônico para a tolerância e sensibilidade ao Al requer um entendimento mais aprimorado destas técnicas de seleção. Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo verificar o comportamento de genótipos de aveia branca padrões quanto à tolerância ao Al submetidos a diferentes protocolos e doses deste íon metálico pela mensuração do caráter comprimento de raiz, avaliado no estágio de plântula, em condições de hidroponia.

2.2 Material e métodos

O experimento foi realizado no Laboratório de Duplo-haplóides e Hidroponia pertencente ao Centro de Genômica e Fitomelhoramento (CGF), da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” (FAEM), Universidade Federal de Pelotas (UFPel). No trabalho foram avaliadas cinco cultivares de aveia branca recomendadas para cultivo no sul do Brasil pela Comissão Brasileira de Pesquisa da Aveia (XXVII CBPA, 2007),

representando genótipos padrões quanto a tolerância e sensibilidade ao Al, que foram: ALBASUL e UPF 18 - sensíveis, UPFA 22 - tolerância intermediária, e URS 20 e UFRGS 14 - tolerantes (FINATTO et al., 2007; SILVA et al., 2007a, b).

O delineamento experimental adotado foi o completamente casualizado com três repetições, sendo a unidade experimental constituída por dez plântulas. As sementes dos genótipos foram submetidas à germinação em caixas gerbox com papel germiteste, em câmara de crescimento à 25°C por 72 horas. Posteriormente, sementes uniformes germinadas com 5 mm de raiz foram transferidas para telas acondicionadas sobre recipientes plásticos contendo 1,5 litros de solução nutritiva padrão (ausência de Al). Entre os protocolos testados, dois se caracterizaram pela utilização de soluções completas (SC) através da adoção da técnica de avaliação estabelecida por Camargo e Oliveira (1981), com a solução nutritiva padrão formada pela seguinte concentração dos produtos em $\mu\text{Mol L}^{-1}$: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – 4000; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 2000; KNO_3 – 4000; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 435; KH_2PO_4 – 500; $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – 2; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 0,3; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 0,8; NaCl – 30; Fe-EDTA – 10; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 0,10; H_3BO_3 – 10. Ao completar 48 horas em solução nutritiva completa, as telas com as plântulas foram transferidas para os recipientes de mesmo volume contendo as soluções tratamento, formadas pela décima parte da solução padrão, omitindo o fósforo e adicionando ferro na forma FeCl_3 . Para a inclusão das doses de Al, foi empregado como fonte o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, na quantidade requerida para atingir as concentrações de 0, 8, 16 e 32 mg L^{-1} do elemento químico (equivalente a 0; 296; 592 e 1.185 $\mu\text{Mol L}^{-1}$ de Al, respectivamente). O segundo protocolo também foi constituído pela adoção de solução completa, tendo como modificação a fonte de Al, sendo empregado o $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, sendo adicionado as concentrações de 0, 8, 16 e 32 mg L^{-1} de Al nas soluções tratamento (equivalente a 0; 296; 592 e 1.185 $\mu\text{Mol L}^{-1}$ de Al). O terceiro protocolo foi caracterizado pela utilização da chamada solução mínima (SM), sendo a solução padrão composta por água destilada e 22 mg L^{-1} de Ca (equivalente a 540 μM de cálcio) fornecido na fonte $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, onde as plântulas permaneceram por 48 horas, sendo posteriormente transferidas para recipientes contendo as soluções tratamento, compostas pela décima parte da solução padrão e adição de 0, 1, 3 e 5 mg L^{-1} de Al, adotando a fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (equivalente a 0; 37; 111 e 185 $\mu\text{Mol L}^{-1}$ de Al, respectivamente).

As plântulas permaneceram por 48 horas nas soluções tratamento e após este período, retornam aos recipientes contendo solução nutritiva padrão, mantidas

por mais 72 horas. O pH das soluções foi corrigido diariamente para $4,0 \pm 0,3$ com adição de HCl e/ou NaOH 1 Mol L^{-1} , com os recipientes mantidos em “banho-maria” ($26 \pm 1^{\circ}\text{C}$) no tanque de hidroponia. Na condução do experimento, as plantas obtiveram aeração constante para oxigenação das raízes, e fotoperíodo constante, com intensidade luminosa de 1.700 lx .

Decorridos sete dias de condução do experimento, foi realizada a avaliação das plântulas por meio da mensuração, em centímetros, do caráter comprimento total da raiz principal (CR). Os dados foram submetidos à análise de variância com a finalidade de identificar os efeitos simples e da interação. Para a interpretação do comportamento dos genótipos com base no caráter comprimento total da raiz nos distintos protocolos e doses de Al foi efetuado o ajuste de regressão polinomial e comparação de médias pelo teste Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, e calculado a herdabilidade no sentido amplo (h_a^2) através do quadrado médio esperado $[E(EM)]$, de acordo com Carvalho et al. (2001). Posteriormente, foram estimados os coeficientes de correlação fenotípica de Pearson através do método proposto por Steel e Torrie (1980) entre as diferentes doses de Al de cada protocolo. Os procedimentos e análises foram realizados no programa computacional SAS LEARNING EDITION (2002), sendo o teste de comparação de médias por Skott-Knott efetuado através do programa computacional GENES (CRUZ, 2001).

2.3 Resultados e discussão

Na análise de variância (Tabela 2.1), mesmo com a ausência da tripla interação (Protocolo x Dose x Genótipo), foi possível detectar efeitos simples significativos entre os fatores de tratamento Protocolo x Dose, Protocolo x Genótipo, Dose x Genótipo, e dos fatores principais Protocolo (P), Dose (D) e Genótipo (G), exigindo a avaliação do desempenho dos distintos genótipos para os efeitos provocados com base no tipo de protocolo e doses de Al. O coeficiente de variação (CV) para a variável comprimento total da raiz revelou valor de reduzida magnitude (15,34%), refletindo o adequado controle das técnicas experimentais e número de indivíduos avaliados, proporcionando confiabilidade nos resultados obtidos.

Tabela 2.1 Resumo da análise de variância do caráter comprimento total de raiz (CR) de genótipos de aveia branca submetidos ao estresse por alumínio, disponibilizado em diferentes fontes. CGF - FAEM/UFPel, Pelotas-RS, 2008.

Fonte de Variação	GL	QM (CR)
Protocolo (P)	2	37,40 [*]
Dose (D)	3	8,79 [*]
Genótipo (G)	4	54,90 [*]
P x D	6	3,33 [*]
P x G	8	4,51 [*]
D x G	12	0,80 [*]
P x D x G	24	0,50 ^{ns}
Erro	120	0,41
Média Geral	-	4,17
R ²	-	0,90
CV%	-	15,34

* Significativo a 5% de probabilidade; ns = Não significativo; GL = Graus de liberdade; QM = Quadrado médio; R² = Coeficiente de determinação; CV% = Coeficiente de variação, em porcentagem; CR= Comprimento total de raiz, em cm.

Apesar da interação tripla não ter sido evidenciada, foi realizado o ajuste de regressão polinomial para explicar o comportamento dos genótipos nas distintas doses de Al considerando cada protocolo, pois as concentrações deste elemento tóxico adotadas na técnica de avaliação baseada na solução mínima diferem em relação às concentrações adotadas nos protocolos caracterizados por soluções completas. De acordo com trabalhos desenvolvidos na cultura do arroz (FREITAS; 2003), milho (MAZZOCATO et al., 2002), e da soja (SPEHAR e SOUZA, 2006), as concentrações de Al eficientes para a diferenciação entre genótipos sensíveis e tolerantes em soluções nutritivas mínimas estão compreendidas no intervalo de 2 à 6 mg L⁻¹ de Al, enquanto as doses 10 e 20 mg L⁻¹ de Al são citadas como eficientes na avaliação de genótipos de aveia branca em metodologias baseadas em soluções completas (SÁNCHEZ-CHÁCON et al., 2000; SILVA et al., 2006; FINATTO et al., 2007; SILVA et al., 2007a), o que justifica os intervalos de doses adotadas na presente avaliação. Além disto, o interesse principal do trabalho foi verificar o

comportamento individual de cada genótipo em relação ao conjunto de fontes de alumínio dentro de cada protocolo adotado.

Considerando o desempenho individual de cada constituição genética de acordo com a estimativa do modelo matemático apresentado para CR (equação da regressão) em relação ao protocolo baseado no uso de solução nutritiva completa (SC), com o Al fornecido na fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (Figura 2.1.a), o genótipo UFRGS 14, considerado tolerante, manifestou redução de 0,58 mm neste caráter a cada 1 mg L^{-1} de Al adicionado, expressando elevado CR na concentração mais elevada ($4,52 \text{ cm}$ na dose 32 mg L^{-1} de Al), como também na ausência do elemento tóxico na solução de cultivo ($6,38 \text{ cm}$) (Figura 2.1.a.2). Em relação a cultivar de aveia branca URS 20 (Figura 1.a.1), também tolerante, o comprimento mínimo da raiz foi expresso na concentração de $21,33 \text{ mg L}^{-1}$ de Al (CR na dose crítica y ; sendo $y = -b/2c$), com a diminuição de CR de $1,24 \text{ mm}$ a cada 1 mg L^{-1} de Al adicionado até atingir a dose crítica (diminuição de CR igual à X ; sendo $X = \text{CR}_{(\text{cm})}$ na dose crítica $Y / Y_{(\text{mg L}^{-1} \text{ de Al})}$). Para o genótipo UPFA 22 (Figura 2.1.a.3), de tolerância intermediária, este mesmo comportamento foi observado na dose $18,00 \text{ mg L}^{-1}$, enquanto que a cultivar UPF 18 (sensível), demonstrou CR mínimo na dose crítica de $20,59 \text{ mg L}^{-1}$ de Al (Figura 2.1.a.4), com a redução de CR de $0,66$ e $0,78 \text{ mm}$ respectivamente a cada 1 mg L^{-1} de Al adicionado até atingir a dose crítica.

Inferências até aqui efetuadas concordam com os valores médios apresentados na Tabela 2.2, pois na representação das regressões polinomiais é possível observar que a cultivar URS 20 apresentou os maiores comprimentos da raiz inicial e final (CR na dose crítica), seguido da UFRGS 14, UPFA 22 e UPF 18. A constituição genética ALBASUL, caracterizada como sensível ao Al, expressou reduzido desenvolvimento de raiz, tanto na dose zero quanto nas maiores concentrações do Al; contudo, não evidenciou mudança de comportamento em relação à presença do elemento tóxico nesta situação de cultivo (Figura 2.1.a.5).

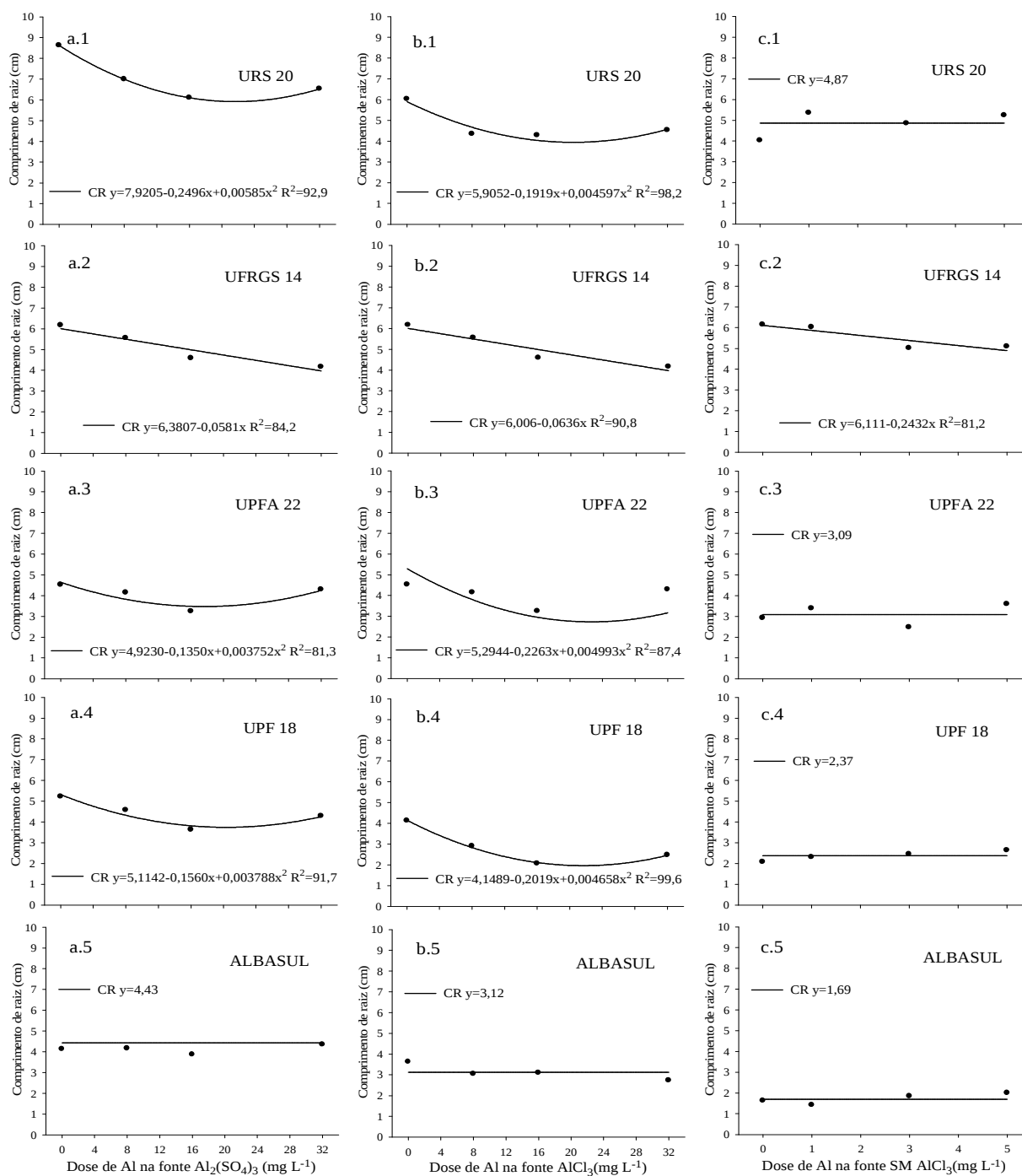


Figura 2.1 Representação das equações de regressão ajustadas geradas pelo comportamento apresentado pelos genótipos de aveia branca em relação ao caráter comprimento de raiz (CR) avaliados sob estresse por protocolos de avaliação e doses de alumínio em hidroponia (a - solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$; b - solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ de alumínio em solução nutritiva; c - solução nutritiva mínima, com Al fornecido na fonte $AlCl_3 \cdot 6H_2O$). CGF - FAEM/UFPel, Pelotas-RS, 2008.

Com base no protocolo caracterizado pelo uso de solução nutritiva completa (SC), com o Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Figura 2.1.b), a cultivar de aveia branca URS 20 (Figura 2.1.b.1), tolerante, evidenciou o comprimento mínimo da raiz na concentração de $20,87 \text{ mg L}^{-1}$ de Al, já o genótipo UPFA 22 (Figura 2.1.b.3), de tolerância intermediária, demonstrou tal comportamento na dose $22,66 \text{ mg L}^{-1}$, enquanto para a cultivar UPF 18 (Figura 2.1.b.4) o CR mínimo foi verificado na dose crítica de $21,67 \text{ mg L}^{-1}$, com a redução de CR de 0,96, 1,13 e 1,01 mm, respectivamente, a cada 1 mg L^{-1} de Al adicionado até atingir a dose crítica. O genótipo UFRGS 14 (Figura 2.1.b.2) manifestou a redução de 0,64 mm neste caráter a cada 1 mg L^{-1} de Al adicionado, expressando o maior CR na concentração mais elevada ($3,97 \text{ cm}$ na dose 32 mg L^{-1} de Al), como também na ausência do elemento tóxico na solução de cultivo ($6,01 \text{ cm}$). O maior comprimento médio de raiz inicial e final (dose crítica) foi verificado para a cultivar UFRGS 14, seguido dos genótipos URS 20, UPFA 22 e UPF 18 (Tabela 2.2). Da mesma maneira, a cultivar ALBASUL (Figura 2.1.b.5) expressou o menor comprimento de raiz na dose zero, não evidenciando mudança de desempenho neste caráter ao longo da adição do Al na solução nutritiva.

No terceiro protocolo, formado pela solução mínima (SM) e Al adicionado na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Figura 2.1.c), os genótipos de aveia branca se comportaram de forma diferenciada em relação aos dois protocolos anteriores, visto que apenas a cultivar UFRGS 14 (Figura 2.1.c.2) demonstrou resposta significativa à presença do elemento tóxico no meio de cultivo, com a diminuição do comprimento de raiz no decorrer da adição de Al na solução, enquanto que os demais genótipos não expressam sintomas de toxidez pela elevação da concentração de Al com base no CR. A cultivar UFRGS 14 evidenciou a redução de 0,38 mm neste caráter a cada 1 mg L^{-1} de Al adicionado, contudo, em relação às demais cultivares avaliadas, apresentou o maior CR na concentração mais elevada de Al ($4,90 \text{ cm}$ na dose 32 mg L^{-1} de Al), e também na ausência do elemento tóxico na solução de cultivo ($6,11 \text{ cm}$), seguido pelas cultivares URS 20, UPFA 22, UPF 18 e a ALBASUL, que novamente evidenciou o menor desempenho médio para o caráter (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 Análise de médias para o caráter comprimento total de raiz (CR) em genótipos de aveia branca submetidos ao estresse por alumínio proporcionado por diferentes protocolos e doses de alumínio em solução nutritiva. CGF - FAEM/UFPel, Pelotas-RS, 2008.

Dose de Al (mg L ⁻¹) *	Nível de tolerância	Genótipo	Protocolo		
			SC Al ₂ (SO ₄) ₃	SC AlCl ₃	SM AlCl ₃
0	Tolerante	URS 20	7,62 a	6,53 a	4,02 a
		UFRGS 14	6,69 b	6,17 a	6,14 b
	Intermediário	UPFA 22	4,82 c	5,49 a	2,92 c
		UPF 18	5,01 c	4,12 b	2,07 d
		ALBASUL	4,13 c	3,62 b	1,62 d
1	Tolerante	URS 20	6,99 a	4,35 b	5,35 a
		UFRGS 14	5,80 a	5,55 a	6,02 a
	Intermediário	UPFA 22	4,14 b	3,27 c	3,38 b
		UPF 18	4,56 b	2,90 c	2,30 c
		ALBASUL	4,16 b	3,04 c	1,42 c
2	Tolerante	URS 20	6,10 a	4,28 a	4,85 a
		UFRGS 14	5,02 a	4,58 a	5,00 a
	Intermediário	UPFA 22	3,25 b	3,35 b	2,47 b
		UPF 18	3,63 b	2,06 c	2,45 b
		ALBASUL	3,87 b	3,10 b	1,84 b
3	Tolerante	URS 20	6,53 a	4,53 a	5,24 a
		UFRGS 14	4,77 b	4,16 a	5,09 a
	Intermediário	UPFA 22	4,29 b	3,10 b	3,59 b
		UPF 18	4,29 b	2,47 b	2,64 b
		ALBASUL	4,35 b	2,73 b	1,89 b

* Dose 0= equivalente a 0 mg L⁻¹ de Al para os três protocolos de alumínio trabalhados; Dose 1= equivalente à 8,0 mg L⁻¹ de Al para os protocolos com solução nutritiva completa e que adotam o Al₂(SO₄)₃.18H₂O e o AlCl₃.6H₂O como fonte de Al, e equivalente à 1,0 mg L⁻¹ de Al no protocolo com solução mínima e que tem como fonte de Al o AlCl₃.6H₂O; Dose 2= equivalente à 16,0 mg L⁻¹ de Al para os protocolos com solução nutritiva completa e que adotam o Al₂(SO₄)₃.18H₂O e o AlCl₃.6H₂O como fonte de Al, e equivalente à 3,0 mg L⁻¹ de Al no protocolo com solução mínima e que tem como fonte de Al o AlCl₃.6H₂O; Dose 3= equivalente à 32,0 mg L⁻¹ de Al para os protocolos com solução nutritiva completa e que adotam o Al₂(SO₄)₃.18H₂O e o AlCl₃.6H₂O como fonte de Al, e equivalente à 5,0 mg L⁻¹ de Al no protocolo com solução mínima e que tem como fonte de Al o AlCl₃.6H₂O. Médias do caráter seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro.

Os genótipos de aveia branca padrões quanto à tolerância ao Al adotados nesta avaliação foram caracterizados com base no caráter retomada de crescimento da raiz, que segundo Silva et al. (2006) e Bertan et al. (2006), representa o critério

mais efetivo de caracterização de genótipos quanto a tolerância e sensibilidade ao Al, pois possibilita a distinção das constituições genéticas em um maior número de classes fenotípicas em comparação às avaliações efetuadas com base no caráter comprimento de raiz. Contudo, considerando conjuntamente os parâmetros variação do comprimento de raiz no intervalo compreendido entre a ausência de Al e a dose crítica para cada genótipo, e o desempenho médio dos genótipos para o caráter CR, é verificado a eficiência de classificação dos genótipos com base neste caráter nas metodologias baseadas no uso de soluções completas, tanto utilizando Al na fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ quanto na forma $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

A avaliação das plântulas quanto à tolerância ao Al com base no comprimento da raiz permite a análise do comportamento dos genótipos por meio da análise de regressão considerando, inclusive, o desempenho na ausência do elemento tóxico na solução de cultivo, o que não é possível quando se adota a retomada do crescimento da raiz, por não manifestar o caráter na ausência do elemento químico. Além disto, a retomada de crescimento da raiz não foi adotada nesta avaliação visto que não foi possível sua visualização quando as plântulas foram submetidas às doses de Al em solução mínima, o que inviabilizaria a análise conjunta dos três protocolos com base neste caráter.

A utilização de soluções mínimas nesta avaliação não proporcionou os mesmos resultados obtidos nos outros dois protocolos. Além disto, a presença do Al nesta condição de cultivo não foi eficiente em promover modificações nas plântulas ao ponto de interferir no comprimento das raízes, o que é confirmado pelo insucesso do ajuste de regressão polinomial para explicar o comportamento dos genótipos para esta variável, com exceção da cultivar UFRGS 14. Por outro lado, a utilização deste protocolo de avaliação merece atenção, por constituir uma técnica que permite economia de reagentes em relação às soluções completas e agilidade na confecção das soluções nutritivas. Portanto, ajustes nesta técnica para a avaliação de genótipos de aveia branca podem trazer ganhos efetivos quanto à qualidade de sua aplicação e efetividade na avaliação.

A ausência dos macro e micronutrientes essenciais na solução de cultivo pode estar comprometendo o crescimento das raízes nesta espécie, e não a presença do elemento tóxico no meio de cultivo. As reservas de nutrientes na semente são capazes de garantir a sobrevivência inicial das plântulas, mas no decorrer do avanço do processo germinativo ocorre sua redução pela formação dos

primeiros tecidos do vegetal (POPINIGS, 1985). Além disto, no cultivo em solução nutritiva em condições de hidroponia há a constante disponibilidade de água, temperatura elevada e aeração, onde o metabolismo das plântulas de aveia branca se mantém elevado, diminuindo rapidamente a concentração de nutrientes de reserva disponíveis. Além disto, considerando as 72 horas de germinação anteriores ao transporte das sementes até a solução nutritiva, grande parte das reservas foram metabolizadas e, portanto, necessitando de nutrientes exógenos para a continuação do desenvolvimento e crescimento das plântulas, inexistentes na solução mínima.

Outra possível explicação para o desempenho verificado no protocolo baseado no uso de solução mínima (Figura 2.1.c) está relacionada ao fato de nesta solução o Ca e o Al serem os únicos cátions presentes, e como a absorção de um elemento químico depende diretamente de sua concentração em torno da raiz, os dois cátions competem pelos sítios comuns de absorção nas raízes (ANGHINONI e MEURER, 2004). Enquanto a absorção do Ca promove a divisão celular e consequentemente o crescimento da raiz (TAIZ e ZEIGER, 2004), a absorção do Al pelas células radiculares desencadeia a redução da atividade mitótica, inibindo o crescimento da raiz (CAMARGO e OLIVEIRA, 1981; RYAN et al, 1993; CAMARGO, 1998; MAZZOCATO et al., 2002; FERREIRA et al, 2006); e desta forma, o Ca pode estar competindo vantajosamente em relação aos sítios radiculares, sendo predominantemente absorvido em detrimento do Al, inibindo seu efeito tóxico. A capacidade da planta em otimizar a utilização de alguns nutrientes em presença do Al, destacando a maior absorção de P e Ca, é citada por Ferreira et al. (2006) como um mecanismo de resistir à toxidez deste elemento, onde a absorção e utilização do Ca na presença de altas concentrações de Al levam à inexistência de sinais de deficiência de desenvolvimento. Avaliando genótipos de trigo quanto à tolerância ao Al em condições de hidroponia adotando diferentes doses de Ca e tempo de exposição das plântulas ao Al, Camargo (1985) verificou que os sintomas de toxicidade ao Al eram acentuados com a redução da concentração de Ca e/ou da concentração salina da solução nutritiva, e pelo aumento no período de permanência em contato com o elemento tóxico. Este fato sugere a necessidade de adoção de concentrações maiores de Al ou maior tempo de exposição ao elemento tóxico quando se avalia a tolerância ao Al em genótipos de aveia branca utilizando soluções nutritivas mínimas.

A cultivar ALBASUL expressou comportamento similar na presença e na ausência do elemento tóxico nos três protocolos testados, evidenciando estabilidade de desempenho do tipo estática em relação às diferentes situações de ambiente, não variando o CR ao longo do aumento das concentrações do Al na solução nutritiva. Segundo Destro e Montalván (1999), este tipo de estabilidade na prática é pouco explorada, pois, quando presente, geralmente está relacionada a genótipos de pobre desempenho e que não reagem na presença de melhores ambientes, entretanto, tem importância quando ligada a caracteres de resistência à moléstias e pragas, e tolerância a fatores abióticos. Em relação à ALBASUL, esta situação é também observada, visto que apesar do comportamento invariável em relação ao Al no ambiente de cultivo, esta cultivar expressa os menores comprimentos médios de raiz nos diferentes protocolos avaliados (Figura 2.1 e Tabela 2.2), confirmando sua inferioridade para este caráter quando comparada aos demais genótipos. Quando caracterizada com base na retomada do crescimento, esta cultivar apresenta reduzido crescimento após o período em contato com o Al tóxico na solução de cultivo (FINATTO et al., 2007; SILVA et al., 2007a, b). Avaliando conjuntamente os resultados obtidos em estudos anteriores e os observados nesta avaliação, se verifica que para a cultivar ALBASUL o menor comprimento radicular é decorrente da expressão de genes que governam o crescimento das raízes, e não devido propriamente ao efeito tóxico do Al nestes órgãos, pois com base no CR se mostra indiferente a este elemento tóxico, evidenciando grande tolerância ao Al. Desta forma, a avaliação baseada na retomada do crescimento da raiz, para a cultivar ALBASUL em particular, parece não representar de forma eficiente a tolerância ao Al, se fazendo necessária a execução de outros tipos de avaliações, como a condução desta cultivar em situação de campo com e sem a disponibilidade de Al tóxico na solução do solo, a fim de confirmar estes resultados observados.

Como o efeito tóxico do Al está diretamente relacionado aos danos provocados no sistema radicular e à capacidade das raízes em absorver água e nutrientes, o desempenho para o caráter comprimento total da raiz é diferencial na sobrevivência do genótipo frente à presença do Al no ambiente de cultivo. Neste sentido, apesar de evidenciar resposta variável à presença do Al nos três protocolos testados, a cultivar UFRGS 14 expressou elevado desempenho do comprimento de raiz, inclusive em condições adversas de cultivo, demonstrando sua grande capacidade de responder à melhoria das condições de ambiente. Desta maneira,

esta cultivar pode ser recomendada como genitor em blocos de cruzamentos realizados em programas de melhoramento genético de aveia branca, bem como, empregada no cultivo em regiões com solos ácidos com elevada disponibilidade de Al tóxico em solução.

A fim de desdobrar a interação Protocolo x Genótipo, foi testado o desempenho geral das cultivares em cada protocolo de estudo em relação ao caráter comprimento total de raiz, onde é possível visualizar a disposição dos genótipos comparativamente em cada condição de avaliação, assim como a herdabilidade no sentido amplo verificada em cada protocolo de avaliação, sendo estes resultados apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Análise de médias e herdabilidade no sentido amplo (h_a^2) para o caráter comprimento de raiz (CR) em genótipos de aveia branca submetidos ao estresse por alumínio proporcionado por diferentes protocolos de avaliação em hidroponia. CGF-FAEM/UFPEL, Pelotas-RS, 2008.

Nível de tolerância	Genótipo	Protocolo		
		SC $Al_2(SO_4)_3$	SC $AlCl_3$	SM $AlCl_3$
Tolerante	URS 20	a 7,06 A	b 4,21 A	b 4,87 B
	UFRGS 14	a 5,57 B	a 5,12 A	a 5,56 A
Intermediário	UPFA 22	a 4,13 C	a 3,80 B	b 3,09 C
Sensível	UPF 18	a 4,37 C	b 2,89 C	b 2,36 D
	ALBASUL	a 4,13 C	b 3,13 C	c 1,69 E
**Herdabilidade (h_a^2)		SC $Al_2(SO_4)_3$	95,81	
		SC $AlCl_3$	92,79	
		SM $AlCl_3$	41,43	

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na coluna, e médias seguidas de mesma letra minúscula na linha não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade de erro. SC $Al_2(SO_4)_3$ = Protocolo com solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$; SC $AlCl_3$ = Protocolo com solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte $AlCl_3 \cdot 6H_2O$; SM $AlCl_3$ = Protocolo com solução mínima, com Al fornecido na fonte $AlCl_3 \cdot 6H_2O$; ** Herdabilidade no sentido amplo (h_a^2) para o caráter comprimento da raiz apresentada em cada protocolo de avaliação adotado.

Nesta avaliação há a formação de três grupos distintos quando os genótipos são submetidos à toxidez por Al em solução completa, utilizando a fonte $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, onde as cultivares URS 20 e a UFRGS 14 constituem os dois grupos com desempenho superior, enquanto as cultivares UPFA 22, UF18 e

ALBASUL compõem o grupo com menores comprimentos de raiz. No protocolo caracterizado pelo uso de solução completa e Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, pode ser verificado a formação de três grupos, onde as cultivares URS 20 e UFRGS 14 apresentam novamente comprimento de raiz superior, a UPFA 22 com desempenho intermediário, e os genótipos UF18 e ALBASUL de reação inferior. Enquanto isso, no protocolo baseado no uso de solução mínima e Al disponibilizado na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, há a formação de cinco classes fenotípicas, cada uma composta por um genótipo, onde a cultivar UFRGS 14 confirma o maior comprimento total de raiz, seguido dos genótipos URS 20, UPFA 22, UPF 18 e ALBASUL.

De forma geral, comparando o desempenho médio de cada cultivar nas diferentes metodologias de avaliação, é possível verificar que o protocolo baseado no uso de solução completa, tendo a Al fornecido na fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4) \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, proporciona o maior crescimento médio de raiz para todas as cultivares testadas. Já no protocolo com mesma composição da solução padrão, mas Al fornecido com o sal $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, se verifica a diminuição do desempenho médio das cultivares URS 20, UPF 18 e ALBASUL, sugerindo que esta segunda fonte de Al é mais nociva ao desenvolvimento do sistema radicular em relação à primeira. Contudo, no protocolo baseado na adoção de solução mínima e Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, os genótipos apresentaram os menores comprimentos médios de raiz, com exceção da cultivar UFRGS 14, que evidenciou desempenho médio constante nas três metodologias adotadas, confirmado pelas curvas de regressão apresentadas na Figura 2.1.

Observando a herdabilidade no sentido amplo (h_a^2) apresentada em cada protocolo de avaliação (Tabela 2.3), é possível verificar que o protocolo que utilizava solução nutritiva completa e Al disponibilizado na fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4) \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ apresenta o maior valor de h_a^2 (95,81) entre as três condições de cultivo adotadas, seguido pelo protocolo SC $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (92,79), e finalmente pela SM $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (41,43). Estes resultados demonstram que os protocolos baseados em soluções completas, nas condições de cultivos adotadas, evidenciam menor interferência do ambiente na expressão fenotípica das cultivares de aveia branca avaliadas, sugerindo que estes sejam os protocolos mais adequados a serem adotados na caracterização de genótipos de aveia branca em condições de hidroponia por proporcionar menores possibilidades de erro no momento da seleção.

Tabela 2.4 Coeficientes de correlação fenotípica entre diferentes protocolos e doses de alumínio estimados para o caráter comprimento de raiz (CR) em genótipos de aveia branca testados em cultivo hidropônico. CGF - FAEM/UFPel, Pelotas-RS, 2008.

Fonte	Dose de Al (mg L ⁻¹) **	Correlações			
		SC AlCl ₃	SC AlCl ₃	SC AlCl ₃	SC AlCl ₃
		0	8	16	32
SC Al ₂ (SO ₄) ₃	0	0,63*	0,60*	0,57*	0,68*
SC Al ₂ (SO ₄) ₃	8	0,54*	0,57*	0,59*	0,78*
SC Al ₂ (SO ₄) ₃	16	0,50 ^{ns}	0,59*	0,63*	0,50 ^{ns}
SC Al ₂ (SO ₄) ₃	32	0,36 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,52*	0,74*
SM AlCl ₃	0	0,72*	0,90*	0,75*	0,66*
SM AlCl ₃	1	0,65*	0,79*	0,73*	0,79*
SM AlCl ₃	3	0,82*	0,87*	0,74*	0,81*
SM AlCl ₃	5	0,72*	0,75*	0,70*	0,67*

Fonte	Dose de Al (mg L ⁻¹) **	Correlações			
		SM AlCl ₃	SM AlCl ₃	SM AlCl ₃	SM AlCl ₃
		0	1	3	5
SC Al ₂ (SO ₄) ₃	0	0,63*	0,74*	0,83*	0,70*
SC Al ₂ (SO ₄) ₃	8	0,63*	0,69*	0,78*	0,57*
SC Al ₂ (SO ₄) ₃	16	0,50 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,74*	0,66*
SC Al ₂ (SO ₄) ₃	32	0,37 ^{ns}	0,61*	0,58*	0,49 ^{ns}

** Concentração de alumínio adicionada na solução de cultivo. * Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; ns = não significativo (GL=n-2≈13); SC Al₂(SO₄)₃= Protocolo com solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte Al₂(SO₄)₃.18H₂O; SC AlCl₃= Protocolo com solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte AlCl₃.6H₂O; SM AlCl₃= Protocolo com solução mínima, com Al fornecido na fonte AlCl₃.6H₂O.

Analisando as correlações em relação ao caráter CR entre os diferentes protocolos e doses de Al adotadas (Tabela 2.4), foi detectado que entre os protocolos baseados no uso de solução completa (SC) e Al disponibilizado na fonte Al₂(SO₄)₃.18H₂O e AlCl₃.6H₂O e nas respectivas doses de Al, existem correlações significativas na grande maioria das comparações, de magnitude intermediária à elevada, segundo classificação de Carvalho et al. (2004), com valores variando de 0,52 à 0,78. Os maiores valores observados nas correlações entre as doses 32 mg L⁻¹ de Al no protocolo SC AlCl₃.6H₂O com as concentrações 8 e 32 mg L⁻¹ de Al no protocolo SC Al₂(SO₄)₃.18H₂O. Comportamento similar é observado nas

comparações entre os protocolos SM $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e SC $\text{Al}_2(\text{SO}_4) \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, com coeficientes de correlação variando de 0,57 à 0,83. Nestes, as maiores correlações foram verificadas entre a dose 3 mg L^{-1} de Al no protocolo SM $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ com as concentrações 0, 8 e 16 mg L^{-1} para SC $\text{Al}_2(\text{SO}_4) \cdot 18\text{H}_2\text{O}$. Já as correlações fenotípicas entre os protocolos SM $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e SC $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ foram todas significativas e com elevado grau, demonstrando a grande semelhança de desempenho médio para comprimento de raiz em relação ao comportamento geral dos genótipos quando submetidos a toxidez por Al utilizando estas situações de cultivo. Entretanto, a existência de elevada correlação para o caráter comprimento de raiz entre as doses de Al em cada protocolo não assegura a eficiência da metodologia e as ideais concentrações do elemento tóxico a serem adotadas, pois considerando o desempenho de cada cultivar representada pelas equações de regressão em cada protocolo (Figura 2.1), a metodologia baseada no uso de soluções mínimas não revelou eficiência em representar a variabilidade entre os genótipos de aveia branca quanto à tolerância ao Al nesta avaliação.

Considerando a expressão do comprimento de raiz nas cultivares testadas sob estresse por Al nos diferentes protocolos adotados, e tendo como parâmetro a variação neste caráter no intervalo compreendido entre a ausência de Al e a dose crítica, o comportamento geral de cada cultivar para o caráter, os coeficientes de determinação (R^2) e a herdabilidade (h_a^2) em cada protocolo, assim como as correlações fenotípicas observadas entre as doses de Al adotadas em cada protocolo, é possível verificar que o método caracterizado pelo uso de solução completa e Al fornecido na fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4) \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ evidenciou elevada eficiência em discriminar os genótipos de aveia branca em sensíveis e tolerantes ao Al em solução nutritiva, fato também confirmado com a utilização do protocolo de solução completa e Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

2.4 Conclusões

O caráter comprimento da raiz total permite a diferenciação entre genótipos de aveia branca sensíveis e tolerantes à presença do Al no ambiente de cultivo. Além disto, o aumento gradativo da concentração de Al na solução causa drástico efeito de redução do crescimento da raiz.

Os protocolos caracterizados pela adoção Al à solução nutritiva completa por meio de distintas fontes $[Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O]$ e $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ são altamente eficientes na identificação de genótipos de aveia branca tolerantes e sensíveis ao Al tóxico em condições de hidroponia.

As constituições genéticas de aveia branca expressam variabilidade para o caráter tolerância ao Al, onde a cultivar ALBASUL manifesta indiferença à presença do Al, enquanto a cultivar UFRGS 14 evidencia elevado desempenho médio para comprimento de raiz total e capacidade de responder a melhoria das condições de ambiente.

2.5 Referências bibliográficas

- ANGHINONI, I.; MEURER, E.J. Suprimento de nutrientes pelo solo e sua absorção pelas plantas. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; CAMARGO, F.A.O. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Gênese, Porto Alegre, p.21-42, 2004.
- BAIER, A. C.; SOMMERS, D. J.; GUSTAFSON, J. P. Aluminium tolerance in wheat: correlating hydroponic evaluations with field and soil performances. **Plant Breeding**, Berlin, v. 114, p.291-296, 1995.
- BERTAN, I.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; SILVA, A.J.G.; BENIN, G.; VIEIRA, E.A.; SILVA, G.O.; HARTWIG, I.; VALÉRIO, I.P.; FINATTO, T. Dissimilaridade genética entre genótipos de trigo avaliados em cultivo hidropônico sob estresse por alumínio. **Bragantia**, Campinas, v.65, n.1, p.55-63, 2006.
- CAMARGO, C.E.O.; OLIVEIRA, O.F. Tolerância de cultivares de trigo a diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva e no solo. **Bragantia**, Campinas, v.40, n.3, p.21-31, 1981.
- CAMARGO, C.E.O. Efeitos de níveis de cálcio combinados com diferentes concentrações de sais na tolerância de trigo à toxicidade de alumínio, em solução nutritiva. **Bragantia**, Campinas, v.44, n.2, p.659-668, 1985.
- CAMARGO, C.E.O. Controle genético da tolerância do trigo à toxicidade de alumínio em soluções nutritivas. **Bragantia**, Campinas, v.57, n.2, p.215-225, 1998.

- CARVALHO, F.I.F.; SILVA, S.A.; KUREK, A.J.; MARCHIORO, V.S. **Estimativas e implicações da herdabilidade como estratégia de seleção**. Editora Universitária da UFPel, Pelotas, 99p., 2001.
- CARVALHO, F.I.F.; LORENCETTI, C.; BENIN, G. **Estimativas e implicações da correlação no melhoramento vegetal**. Editora Universitária da UFPel, Pelotas, 142p., 2004.
- CRUZ, CD. **Programa Genes – versão Windows 2001.0.0**. Editora UFV, Viçosa, 648p., 2001.
- DELHAIZE, E.; RYAN P.R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, Rockville, v.107, n.2, p.315-321, 1995.
- DESTRO, D.; MONTALVÁN, R. **Melhoramento genético de plantas**. UEL, Londrina, 820p., 1999.
- FERREIRA, R.P.; CRUZ, C.D.; SEDIYAMA, C.S.; PINHEIRO, B.S. Herança da tolerância à toxidez de alumínio em arroz com base em análise dialélica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.4, p.615-621, 1999.
- FERREIRA, R.P.; MOREIRA, A.; RASSINI, J.B. **Toxidez de alumínio em culturas anuais**. Documentos, 63. Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, 35p., 2006.
- FINATTO, T.; SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; VALÉRIO, I.P.; REIS, C.E.S.; RIBEIRO, G.; SILVEIRA, G.; FONSECA, D.A.R. Reação de tolerância de genótipos de aveia branca a concentrações de alumínio em solução nutritiva. **Magistra**, Cruz das Almas, v.19, n.1, p.07-15, 2007.
- FLEMING, A.L.; FOY, C.D. Root structure reflects differential aluminum tolerance in wheat varieties. **Agronomy Journal**, Madison, v.60, p.172-176, 1968.
- FLOSS, E.L.; BAIER, A.C. Breeding oats at the University of Passo Fundo. **Oat Newsletter**, Winnipeg, v.29, p.35-37, 1979.
- FLOSS, E.L.; MOREIRA, J.C.; SOUZA, F.C. Ensaio regional de rendimento de grãos de aveia em 1979. In: REUNIÃO NACIONAL DE PESQUISA EM TRIGO, 11. 1980, Porto Alegre, **Resumos...** EMBRAPA- CNPT, Passo Fundo, p.42-56, 1980.
- FLOSS, E.L.; BAIER, A.C.; EICHLER, L. Oat production and breeding in South Brasil. **Oat Newsletter**, Winnipeg, v.33, p.11-13, 1983.

- FREITAS, F.A. **Dissimilaridade genética em arroz (*Oryza sativa* L.) quanto à toxicidade ao alumínio**. Dissertação (Mestrado - Ciência e Tecnologia de Sementes). Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 69f., 2003.
- GARLAND, M.L.; CAMPBELL, K.A.; CARTER JUNIOR, T.E. Aluminum tolerance in soybean: genotypic correlation and repeatability of solution culture and greenhouse screening methods. **Crop Science**, Madison, v.30, p.1049-1054, 1990.
- HARTWIG, I.; SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; BERTAN, I.; VALÉRIO, I.P.; SILVA, G.O.; RIBEIRO, G.; FINATTO, T.,; SILVEIRA, G. Variabilidade fenotípica de caracteres adaptativos da aveia branca (*Avena sativa* L.) em cruzamentos dialélicos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.2, p.337-345, 2007a.
- HARTWIG, I.; OLIVEIRA, A.C.; CARVALHO, F.I.F.; BERTAN, I.; SILVA, J.A.G.; SCHMIDT, D.A.M.; VALÉRIO, I.P.; MAIA, L.C.; FONSECA, D.N.R.; REIS, C.E.S. Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. **Semina Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 2, p.219-228, 2007b.
- JO, J.; JANG, Y.; KIM, K.; KIM, M.; KIM, K.; CHUNG, W. Isolation of *ALU1-P* gene encoding a protein with aluminum tolerance activity from *arthrobacter viscosus*. **Biochemical and Biophysical Research Communications**, Korea, v.239, n.3, p.835-839, 1997.
- KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v.46, p.237-260, 1995.
- LI, X.F.; MA, J.F.; MATSUMOTO, H. Pattern of aluminum-induced secretion of organic acids differs between rye and wheat. **Plant Physiology**, Rockville, v.123, n.4, p.1537-1544, 2000.
- MA, J.F.; NAGAO, K.; SATO, K.; ITO, H.; FURUKAWA, J.; TAKEDA, K. Molecular mapping of a gene responsible for Al-activated secretion of citrate in barley. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v.55, n.401, p.1335-1341, 2004.
- MACHADO, P.L.O.A. **Considerações gerais sobre a toxicidade do alumínio nas plantas**. Documentos, 2. EMBRAPA-CNPS, Rio de Janeiro, 22p., 1997.

- MAZZOCATO, A.C.; ROCHA, P.S.G.; SERENO, M.J.C.M.; BOHNEN, H.; GRONGO, V., BARBOSA NETO, J.F. Tolerância ao alumínio em plântulas de milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.1, p.19-24, 2002.
- POPINIGS, F. **Fisiologia de sementes**. Agriplan, Brasília, 285 p., 1985.
- RYAN, P.R.; JOSEP, M.D.; KOCHIAN, L.V. Aluminium toxicity in roots: investigation of spacial sensitivity and the role of root cap. **Journal of Experimental Botany**, v.44, n.259, p.437-446, 1993.
- SAS LEARNING EDITION. **Program SAS - Getting started with the SAS Learning Edition**. Cary SAS Publishing, North Carolina, 200p., 2002.
- SÁNCHEZ-CHACÓN, C.D.; FEDERIZZI, L.C.; MILACH, S.C.K. PACHECO, M.T. Variabilidade genética e herança da tolerância à toxicidade do alumínio em aveia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.9, p.1798-1808, 2000.
- SILVA, I. R; SMYTH, T. J.; RAPER, C. D.; CARTER, T. E.; RUFTY, T. W. Differential aluminum tolerance in soybean: An evaluation of the role of organic acids. **Physiologia Plantarum**, Oxford, v.112, n.2, p.200-210, 2001.
- SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; COIMBRA, J.L.M.; BENIN, G.; OLIVEIRA, A.C.O.; VIEIRA, E.A.; FINATTO, T.; BERTAN, I.; SILVA, G.O.; GARCIA, S.M. Tolerância à toxicidade por alumínio em cultivares de aveia (*Avena sativa* L.) sob cultivo hidropônico. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.12, n.3, p.265-271, 2006.
- SILVA, G.O.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; SILVA, A.J.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**, Pelotas, v.12, n.4, p.401-404, 2006.
- SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; COIMBRA, J.L.M.; VIEIRA, E.A.; BENIN, G.; OLIVEIRA, A.C.; FINATTO, T.; BERTAN, I.; SILVA, G.O.; CORREA, M.R. Tolerância ao alumínio em cultivares de aveia branca sob cultivo hidropônico. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.4, p.587-593, 2007a.
- SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; REIS, C.S.; BERTAN, I.; HARTWIG, I.; MAIA, L.C.; CRESTANI, M.; MARINI, N.; FONSECA, D.A.R.; NORNBERG, R.; LUCHE, H.S.; MOLITERNO, E. Reação de cultivares de aveia (*Avena sativa* L.) ao estresse

- por alumínio em condições de hidroponia. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DA AVEIA, 27. 2007, Passo Fundo. **Resultados experimentais**. Comissão Brasileira de Pesquisa da Aveia, Passo Fundo, v.1, p.57-60, 2007b.
- SOUZA, L.A.C. Reação de genótipos de soja ao alumínio em hidroponia e no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, n.36, n.10, p.1255-1260, 2001.
- SPEHAR, C.R.; SOUZA, L.A.C. Selection for aluminum tolerance in tropical soybeans. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.36, n.1, p.01-06, 2006.
- STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. **Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach**. 2 ed. McGraw-Hill Inc., New York, 631p., 1980.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Artmed, Porto Alegre, p.102-103, 2004.
- VOSS, M.; SOUZA, C.N.A.; BAIER, A.C.; NASCIMENTO JÚNIOR, A.; BOFF, T. **Método de avaliação de tolerância à toxidez de alumínio em trigo, em condições de hidroponia, na Embrapa Trigo**. Embrapa Trigo, Passo Fundo, 16p., 2006. Documentos Online 67. Disponível em: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do67.htm.
- ZHAO, Z.; MA, J. F.; SATO, K.; TAKEDA, K. Differential Al resistance and citrate secretion in barley (*Hordeum vulgare* L.). **Planta**, New York, v.217, n.5, p.794-800, 2003.
- ZHENG, S. J.; MA, J. F.; MATSUMOTO, H. Continuous secretion of organic acids in related to aluminum resistance during relatively long-term exposure to aluminum stress. **Physiologia Plantarum**, Oxford, v.103, n.2, p.209-214, 1998.
- XXVII RCBPA - REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DA AVEIA, 27. 2007, Passo Fundo. **Resultados experimentais**. Comissão Brasileira de Pesquisa da Aveia, Passo Fundo, v.1, 438p., 2007.

3. Caracteres relacionados e análise multivariada na avaliação da tolerância ao alumínio em aveia branca

3.1 Introdução

A cultura da aveia branca (*Avena sativa* L.) tem assumido importante papel como cultivo de estação fria no sistema de produção do sul do Brasil (FAOSTAT, 2008). Este fato se deve a sua ampla aplicação, sendo utilizada na alimentação humana e animal, sistema de rotação de culturas e utilização como cobertura do solo para o sistema de semeadura direta (HARTWIG et al., 2007a). No Brasil, muitas vezes a aveia branca é cultivada em áreas de solos não corrigidos e pouco férteis, apresentando desenvolvimento reduzido em relação ao seu potencial (FLOSS e BAIER, 1979; FLOSS et al., 1983). Além disto, solos com elevada acidez têm contribuído fortemente em favorecer os danos causados por elementos tóxicos, como o alumínio (Al) (BISSINI et al., 2006). De acordo com Silva et al. (2007a), a obtenção de elevado rendimento de grãos em aveia branca em solos com níveis considerados tóxicos deste íon metálico exige, sobretudo, a correção da acidez ou o emprego de genótipos tolerantes.

As espécies de plantas e cultivares diferem significativamente quanto à tolerância ao Al livre na solução do solo, ou mesmo em soluções nutritivas. De acordo com Gallego e Benito (1997), entre os cereais de estação fria, a aveia branca revela elevada tolerância à presença deste elemento tóxico no ambiente de cultivo, superior à cultura do trigo (*Triticum aestivum* L.) e da cevada (*Hordeum vulgare* L.), entretanto, inferior à observada na cultura do centeio (*Secale cereale* L.).

De maneira geral, poucos genes atuam no controle da herança da tolerância à toxidez por Al nos cereais de inverno. Na aveia branca, estudos indicam que a tolerância ao Al é controlada por um gene (OLIVEIRA, 2002; NAVA et al., 2006), ou por um ou dois genes dominantes (WAGNER et al., 2001), caracterizando um caráter qualitativo, controlado por pequeno número de genes e de grande efeito na

expressão do caráter. Portanto, a transferência de alelos que expressam a tolerância a este íon tóxico apresenta maior facilidade, permitindo forte pressão de seleção em gerações segregantes precoces (ALLARD, 1960).

O Al livre na solução do solo representa o principal fator causador do crestamento (BACKMANN, 1954; ARAÚJO, 1956; CAMARGO et al., 1995; VOSS et al., 2007), problema típico verificado nos cereais de inverno cultivados em regiões caracterizadas por solos ácidos não corrigidos. De maneira geral, as plantas com este aspecto apresentam o crescimento anormal, coloração púrpura nos colmos, limbo foliar e nas nervuras, além do enrolamento das folhas jovens, colapso do ápice da planta e também dos pecíolos (PAIVA, 1942; BACKMANN, 1954; FERREIRA, 2006). Contudo, os efeitos adversos do Al são nítidos e rapidamente verificados no sistema radicular das plantas, que apresentam raízes curtas, grossas e quebradiças, pouco ramificadas, e conseqüentemente, pouco eficientes na absorção de água e de nutrientes (FOY, 1978; KOCHIAN, 1995), podendo conduzir a planta à deficiência mineral e ao estresse hídrico (DEGENHARDT et al., 1998). Já a redução do crescimento e desenvolvimento de parte aérea ocorre num momento posterior (RYAN et al., 1993; JONES e KOCHIAN, 1995) por conseqüência, a priori, dos danos que ocorrem na raiz (MATSUMOTO et al., 1976).

A restrição ao crescimento radicular tem se tornado a base de diversos procedimentos de avaliação da tolerância e sensibilidade de genótipos de aveia branca à presença do Al em cultivo hidropônico, em virtude da raiz estar diretamente em contato com o elemento tóxico na solução e permitir fácil visualização dos danos em estádios iniciais de desenvolvimento da plântula (SANCHES-CHÁCON et al., 2000; NAVA et al., 2006; SILVA et al., 2006; FINATTO et al., 2007; SILVA et al. 2007a).

Vários métodos baseados no uso de solução nutritiva em condições de hidroponia têm sido desenvolvidos para a avaliação da tolerância ao Al. Entre eles, estão o método proposto por Camargo e Oliveira (1981), que combina uma série de componentes químicos essenciais à planta, formando uma solução nutritiva completa, com o emprego do Al na fonte sulfato de alumínio $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$; e protocolos baseados em solução mínima, caracterizados pela adição de concentrações de Al a uma solução constituída unicamente por cálcio diluído (MAZZOCATO et al., 2002; WATANABE e OKADA, 2005; SPEHAR e SOUZA, 2006).

A análise da expressão de outros caracteres quando em condição de toxidez por Al em hidroponia pode viabilizar a seleção indireta de genótipos de aveia branca tolerantes, desde que evidenciem forte associação com o padrão de tolerância e elevada herdabilidade na expressão do caráter; ou mesmo através da análise simultânea, envolvendo vários caracteres morfológicos observados em nível de plântula. Neste sentido, o objetivo do presente trabalho foi verificar a relação entre caracteres de plântula em genótipos de aveia branca submetidos a diferentes protocolos e concentrações de Al em condições de hidroponia, bem como avaliar o desempenho simultâneo destes caracteres na discriminação da tolerância ao Al pelo emprego de estatística multivariada.

3.2 Material e métodos

O experimento foi realizado no Laboratório de Duplo-haplóides e Hidroponia pertencente ao Centro de Genômica e Fitomelhoramento (CGF), da Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” (FAEM), Universidade Federal de Pelotas (UFPel). No trabalho foram avaliadas cinco cultivares de aveia branca recomendadas para cultivo no sul do Brasil pela Comissão Brasileira de Pesquisa da Aveia (XXVII RCBPA, 2007), representando genótipos padrões quanto a tolerância e sensibilidade ao Al, que foram: ALBASUL e UPF 18 – sensíveis, UPFA 22 – tolerância intermediária e, URS 20 e UFRGS 14 – tolerantes (FINATTO et al., 2007; SILVA et al., 2007a, b).

O delineamento experimental adotado foi o completamente casualizado com três repetições, sendo a unidade experimental constituída por dez plântulas. As sementes dos genótipos foram submetidas à germinação em caixas gerbox com papel germiteste, em câmara de crescimento à 25°C por 72 horas. Posteriormente, sementes uniformes germinadas com 5 mm de raiz foram transferidas para telas acondicionadas sobre recipientes plásticos contendo 1,5 litros de solução nutritiva padrão (ausência de Al). Entre os protocolos testados, dois se caracterizaram pela utilização de soluções completas (SC), através da adoção da técnica de avaliação estabelecida por Camargo e Oliveira (1981), que envolve os nutrientes fundamentais para o desenvolvimento da planta, apresentando a solução nutritiva padrão formada pela seguinte concentração dos produtos em $\mu\text{Mol L}^{-1}$: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – 4000; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 2000; KNO_3 – 4000; $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ – 435; KH_2PO_4 – 500; $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ – 2;

$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ - 0,3; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ - 0,8; NaCl - 30; Fe-EDTA - 10; $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ - 0,10; H_3BO_3 - 10. Ao completar 48 horas em solução nutritiva completa, as telas com as plântulas foram transferidas para os recipientes de mesmo volume contendo as soluções tratamento, formadas pela décima parte da solução padrão, omitindo o fósforo e adicionando ferro na forma FeCl_3 . Para a inclusão das doses de Al, foi empregado como fonte o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, na quantidade requerida para atingir as concentrações de 0, 8, 16 e 32 mg L^{-1} do elemento químico (equivalente a 0; 296; 592 e $1.185 \text{ } \mu\text{Mol L}^{-1}$ de Al). O segundo protocolo também foi constituído pela adoção de solução completa, tendo como modificação a fonte de Al, sendo empregado o $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, sendo adicionado as concentrações de 0, 8, 16 e 32 mg L^{-1} de Al nas soluções tratamento (equivalente a 0; 296; 592 e $1.185 \text{ } \mu\text{Mol L}^{-1}$ de Al). O terceiro protocolo foi caracterizado pela utilização da chamada solução mínima (SM), sendo a solução padrão composta por água destilada e 22 mg L^{-1} de Ca (equivalente a $540 \text{ } \mu\text{M}$ de cálcio) fornecido na fonte $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, onde as plântulas permaneceram por 48 horas, sendo posteriormente transferidas para recipientes contendo as soluções tratamento, compostas pela décima parte da solução padrão e adição de 0, 1, 3 e 5 mg L^{-1} de Al, adotando a fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (equivalente a 0; 37; 111 e $185 \text{ } \mu\text{Mol L}^{-1}$ de Al, respectivamente).

As plântulas permaneceram por 48 horas nas soluções tratamento, e após este período retornaram aos recipientes contendo solução nutritiva padrão, mantidas por mais 72 horas. O pH das soluções foi corrigido diariamente para $4,0 \pm 0,3$ com adição de HCl e/ou $\text{NaOH } 1 \text{ Mol L}^{-1}$, com os recipientes mantidos em “banho-maria” ($26 \pm 1^\circ\text{C}$) no tanque de hidroponia. Na condução do experimento, as plantas foram submetidas à aeração constante para oxigenação das raízes e fotoperíodo permanente, com intensidade luminosa de 1.700 lx .

Decorridos sete dias de condução do experimento foi realizada a avaliação das plântulas com a mensuração, em centímetros, dos caracteres comprimento da raiz principal (CR), comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da primeira folha (CPF), comprimento da segunda folha (CSF), comprimento do coleóptilo (CC), inserção da primeira folha (IPF), e em miligramas, matéria seca da raiz (MSR) e matéria seca da parte aérea (MSPA), após secagem do material vegetal em estufa a 60°C até atingir massa constante.

Os dados foram submetidos à análise de variância com a finalidade de identificar os efeitos simples e das interações. Foram estimados os coeficientes de

correlação fenotípica (r_P), genética (r_G) e de ambiente (r_E) considerando cada dose de AI em cada protocolo de avaliação, através do método proposto por Steel e Torrie (1980), para verificar a relação entre o CR com os demais caracteres avaliados nas plântulas de aveia (CPA, CPF, CSF, CC, IPF, MSR e MSPA). A fim de prever o desempenho do CR quando selecionado com base em um caráter correlacionado, considerando a magnitude da herdabilidade e da correção genética dos caracteres envolvidos na análise, foi calculada a resposta correlacionada predita (RC_{CR}). Para o cálculo da resposta correlacionada (RC_{CR}), foi seguido o modelo descrito por Falconer (1989): $RC_{CR(\%)} = i \cdot h_{(x)} \cdot h_{(CR)} \cdot r_G \cdot \sigma_{P(CR)}$, sendo: “h” correspondente à herdabilidade dos caracteres considerados; “x” equivalente ao caráter correlacionado com CR; “ σ ” o desvio padrão observado na variável CR; “ r_G ” correlação genética entre os caracteres e; “i” índice de seleção. Nesta ocasião, foi adotado o índice de seleção (i) de dez por cento, e os valores estimados de RC_{CR} foram expressos em porcentagem em relação à média do CR.

Através das médias dos caracteres avaliados foi estimada a distância generalizada de Mahalanobis (D^2) entre todos os pares de genótipos para o comportamento geral dos caracteres em cada concentração de AI tóxico adotada nas diferentes técnicas de avaliação, e empregado o método de agrupamento de Tocher buscando estabelecer de grupos de genótipos similares quanto à reação à toxidez ao AI. Além disso, foi realizada a identificação da importância relativa de cada caráter na formação dos respectivos grupos de genótipos de aveia branca, que segundo Singh (1981), considera a matriz de distância genética obtida a partir das médias gerais dos caracteres avaliados em cada concentração de AI para os diferentes protocolos. Todos os procedimentos e análises foram realizados no programa computacional GENES (CRUZ, 2001).

3.3 Resultados e discussão

Na Tabela 3.1 é apresentado o resumo da análise de variância para os caracteres mensurados em aveia branca no estágio de plântula, considerando genótipos padrões quanto a tolerância ao AI submetidos a diferentes metodologias de avaliação e doses deste elemento químico em hidroponia. A análise possibilitou identificar a interação tripla entre todos os fatores de tratamento (Protocolo x Dose x

Genótipo) para os caracteres MSR e MSPA. Além disto, interações simples foram detectadas para Dose x Genótipo (CR, CPA, CPF, MSR e MSPA), Protocolo x Genótipo (CR, CPA, CSF, IPF, MSR e MSPA) e Protocolo x Dose (CR, CSF, CC, IPF e MSR), indicando, num primeiro momento, que há modificações nos caracteres de plântula pela adição de Al na solução, e que as cultivares testadas expressam comportamento distinto considerando os diferentes protocolos e doses do elemento químico testado. É possível verificar que CR e MSR foram os caracteres que melhor representaram os efeitos simples e principais dos fatores de tratamento, onde a MSR se mostrou responsivo em todas as fontes de variação, enquanto que CR, apenas não evidenciou a interação tripla. Além disto, mesmo sinalizando forte responsividade para as fontes de variação, o caráter MSPA não proporcionou modificações para Dose e interação Protocolo x Dose, indicando possivelmente representar um caráter ineficiente quando adotado na seleção indireta para tolerância ao Al nesta espécie nas condições de cultivo adotadas, confirmado pelo desempenho similar evidenciado pelo CPA e CPF, que compõem em grande magnitude a matéria seca de parte aérea total.

Estes resultados iniciais corroboram com a literatura, evidenciando que a ação fitotóxica do Al é um fenômeno que afeta tanto o sistema radicular como os caracteres de parte aérea, porém, sua ação é mais visível e efetiva no desenvolvimento das raízes (HARTWIG et al., 2007b). Este comportamento é determinado por alterações nas membranas das células das raízes e inibição da síntese de DNA, levando à paralisação da divisão e alongamento das células, engrossamento e menor ramificação das raízes e desorganização dos meristemas, promovendo, por consequência, dificuldades no desenvolvimento dos tecidos aéreos do vegetal (MACHADO, 1997; TEDESCO e BISSANI, 2004).

O coeficiente de variação (CV) revelou valores de reduzida a intermediária magnitude, variando de 8,7% para CPA à 20,35% para CSF, o que sugere a necessidade de maior controle das técnicas experimentais e aumento da população de plantas amostradas para análise de caracteres como MSR e CSF.

Tabela 3.1 Resumo da análise de variância para os caracteres de plântula (CR, CPA, CPF, CSF, CC, IPF, MSR e MSPA) em genótipos de aveia branca submetidos ao estresse por diferentes protocolos e doses de alumínio. CGF - FAEM/UFPel, Pelotas-RS, 2008.

Fonte de Variação	GL	QM							
		CR	CPA	CPF	CSF	CC	IPF	MSR	MSPA
Protocolo (P)	2	37,40*	450,22*	266,81*	95,08*	0,61*	36,92*	12,29*	1,50*
Dose (D)	3	8,79*	1,70 ^{ns}	2,25 ^{ns}	1,60 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,94*	1,82 ^{ns}
Genotipo (G)	4	54,90*	309,73*	238,26*	109,13*	1,21*	10,85*	21,78*	277,84*
P x D	6	3,33*	1,72 ^{ns}	1,57 ^{ns}	3,44*	0,29*	1,12*	1,82*	3,13 ^{ns}
P x G	8	4,51*	4,17*	2,83 ^{ns}	7,78*	0,03 ^{ns}	1,06*	0,75*	5,41*
D x G	12	0,80*	9,58*	6,59*	1,38 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,43 ^{ns}	1,21*	4,82*
P x D x G	24	0,50 ^{ns}	2,72 ^{ns}	2,54 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,60*	4,33*
Erro	120	0,41	2,87	2,49	1,12	0,07	0,24	0,24	2,17
Média Geral	-	4,17	19,48	15,88	1,93	2,35	3,59	2,07	9,17
R ²	-	0,89	0,87	0,85	0,85	0,58	0,83	0,85	0,86
CV%	-	15,34	8,70	9,94	20,35	11,28	13,72	19,57	16,09

* Significativo a 5% de probabilidade; ns = Não significativo; GL = Graus de liberdade; QM = Quadrado médio; R² = Coeficiente de determinação; CV% = Coeficiente de variação, em porcentagem; CR= Comprimento de raiz (cm); CPA= Comprimento de parte aérea (cm); CPF= Comprimento de primeira folha (cm); CSF= Comprimento de segunda folha (cm); CC= Comprimento do coleóptilo (cm); IPF= Inserção da primeira folha (cm); MSR= Matéria seca de raiz (mg); MSPA= Matéria seca de parte aérea (mg).

Os coeficientes de correlações fenotípicas (rP), genotípicas (rG) e de ambiente (rE) obtidos neste trabalho revelaram que existem diferenças na ocorrência e na magnitude das correlações entre o comprimento de raiz (CR) e os demais caracteres de plântula avaliados nas doses testadas para os três protocolos adotados (Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4), o que implica na dificuldade de inferências sobre a correlação entre os caracteres de forma generalizada, desconsiderando doses e/ou protocolos. No entanto, todas as correlações significativas observadas foram positivas, indicando que modificações no desempenho do CR são acompanhadas, no mesmo sentido, pelo desempenho dos demais caracteres em nível de plântula.

Tabela 3.2 Estimativa de correlação entre o caráter comprimento de raiz (CR) e demais caracteres de plântula (CPA, CPF, CSF, CC, IPF, MSR e MSPA) em genótipos de aveia branca avaliados quanto a tolerância ao Al em solução completa, com Al fornecido na fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$. CGF - FAEM/UFPel, Pelotas-RS, 2008.

Dose de Al (mg L ⁻¹)	Caráter	SC $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ **						
		CPA	CPF	CSF	CC	IPF	MSR	MSPA
0	CR _(rP)	0,75*	0,68*	0,76*	0,58*	0,79*	0,89*	0,87*
	CR _(rG)	0,79*	0,74*	0,79*	0,73*	0,93*	0,92*	0,92*
	CR _(rE)	-0,33 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,59*	-0,19 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,11 ^{ns}
	RC _{CR} (%)	36,17	33,14	41,85	35,30	39,38	48,74	42,53
8	CR _(rP)	0,40 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,55*	0,26 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,96*	0,40 ^{ns}
	CR _(rG)	0,39 ^{ns}	0,41 ^{ns}	0,61*	0,17 ^{ns}	0,34 ^{ns}	1,00*	0,45 ^{ns}
	CR _(rE)	0,44 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,60*	0,41 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,12 ^{ns}
	RC _{CR} (%)	-	-	23,24	-	-	38,91	-
16	CR _(rP)	0,63*	0,37 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,59*	0,43 ^{ns}	0,73*	0,46 ^{ns}
	CR _(rG)	0,65*	0,32 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,84*	0,48 ^{ns}	0,78*	0,46 ^{ns}
	CR _(rE)	0,60*	0,58*	-0,06 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,49 ^{ns}
	RC _{CR} (%)	23,92	-	-	15,08	-	30,61	-
32	CR _(rP)	0,39 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,80*	0,55*	0,63*	0,66*	0,68*
	CR _(rG)	0,45 ^{ns}	0,28 ^{ns}	0,95*	0,99*	0,72*	0,65*	0,69*
	CR _(rE)	-0,25 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	0,30 ^{ns}	-0,33 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,75*	0,62*
	RC _{CR} (%)	-	-	25,84	22,15	22,26	20,77	22,05

CR= Comprimento de raiz (cm); CPA= Comprimento de parte aérea (cm); CPF= Comprimento de primeira folha (cm); CSF= Comprimento de segunda folha (cm); CC= Comprimento do coleótilo (cm); IPF= Inserção da primeira folha (cm); MSR= Matéria seca de raiz (mg); MSPA= Matéria seca de parte aérea (mg); rP= Correlação fenotípica; rG= Correlação genética; rE= Correlação de ambiente; RC_{CR(%)}= Resposta correlacionada para CR, em relação à média; *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; ns = Não significativo (GL = n – 2 ≈ 13); SC $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ** = Protocolo com solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$.

Tabela 3.3 Estimativa de correlação entre o caráter comprimento de raiz (CR) e demais caracteres de plântula (CPA, CPF, CSF, CC, IPF, MSR e MSPA) em genótipos de aveia branca avaliados quanto a tolerância ao Al em solução completa, com Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. CGF - FAEM/UFPel, Pelotas-RS, 2008.

Dose de Al (mg L ⁻¹)	Caráter	SC AlCl_3 **						
		CPA	CPF	CSF	CC	IPF	MSR	MSPA
0	CR (rP)	0,99*	0,97*	0,80*	0,81*	0,76*	0,75*	0,96*
	CR (rG)	0,99*	0,98*	0,86*	0,90*	0,92*	0,85*	0,99*
	CR (rE)	0,75*	0,75*	0,34 ^{ns}	0,56*	0,07 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,41 ^{ns}
	RC _{CR} (%)	32,57	32,05	30,11	27,39	29,71	29,60	34,66
8	CR (rP)	0,46 ^{ns}	0,47 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,23 ^{ns}	0,74*	0,59*
	CR (rG)	0,48 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,78*	0,61*
	CR (rE)	-0,15 ^{ns}	0,02 ^{ns}	-0,30 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,06 ^{ns}	-0,03 ^{ns}
	RC _{CR} (%)	-	-	-	-	-	38,58	30,49
16	CR (rP)	0,84*	0,85*	0,56*	0,11 ^{ns}	0,58*	0,88*	0,89*
	CR (rG)	0,94*	0,99*	0,61*	0,13 ^{ns}	0,65*	0,96*	0,94*
	CR (rE)	0,12 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,09 ^{ns}	0,64*	0,09 ^{ns}
	RC _{CR} (%)	42,16	41,92	28,49	-	29,50	41,20	44,86
32	CR (rP)	0,67*	0,67*	0,52*	0,33 ^{ns}	0,68*	0,85*	0,70*
	CR (rG)	0,79*	0,80*	0,51 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,78*	0,99*	0,80*
	CR (rE)	-0,36 ^{ns}	-0,48 ^{ns}	0,62*	0,18 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	-0,25 ^{ns}
	RC _{CR} (%)	32,86	33,45	-	-	31,18	37,18	33,81

CR= Comprimento de raiz (cm); CPA= Comprimento de parte aérea (cm); CPF= Comprimento de primeira folha (cm); CSF= Comprimento de segunda folha (cm); CC= Comprimento do coleótilo (cm); IPF= Inserção da primeira folha (cm); MSR= Matéria seca de raiz (mg); MSPA= Matéria seca de parte aérea (mg); rP= Correlação fenotípica; rG= Correlação genética; rE= Correlação de ambiente; RC_{CR}(%)= Resposta correlacionada para CR, em relação à média; *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; ns = Não significativo (GL= n - 2 ≈ 13); SC AlCl_3 **= Protocolo com solução nutritiva completa, com Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Tabela 3.4 Estimativa de correlação entre o caráter comprimento de raiz (CR) e demais caracteres de plântula (CPA, CPF, CSF, CC, IPF, MSR e MSPA) de genótipos de aveia branca avaliados quanto a tolerância ao Al em solução mínima, com Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. CGF - FAEM/UFPel, Pelotas-RS, 2008.

Dose de Al (mg L ⁻¹)	Caráter	SM AlCl_3 **						
		CPA	CPF	CSF	CC	IPF	MSR	MSPA
0	CR _(rP)	0,74*	0,74*	0,15 ^{ns}	0,32 ^{ns}	0,75*	0,44 ^{ns}	0,64*
	CR _(rG)	0,76*	0,76*	0,16 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,89*	0,48 ^{ns}	0,66*
	CR _(rE)	0,31 ^{ns}	0,29 ^{ns}	0,14 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,13 ^{ns}
	RC _{CR} (%)	68,54	68,90	-	-	30,98	-	60,15
1	CR _(rP)	0,88*	0,85*	0,56*	0,60*	0,98*	0,88*	0,88*
	CR _(rG)	0,89*	0,87*	0,60*	0,75*	0,99*	0,98*	0,95*
	CR _(rE)	0,65*	0,60*	0,01 ^{ns}	0,65*	0,34 ^{ns}	0,69*	-0,33 ^{ns}
	RC _{CR} (%)	80,81	78,99	50,15	46,62	71,66	85,58	84,26
3	CR _(rP)	0,72*	0,84*	0,78*	-0,17 ^{ns}	0,52*	0,23 ^{ns}	0,41 ^{ns}
	CR _(rG)	0,51 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,89*	0,25 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,45 ^{ns}
	CR _(rE)	0,98*	0,98*	-0,05 ^{ns}	0,88*	0,95*	0,72*	0,96*
	RC _{CR} (%)	-	-	39,40	-	-	-	-
5	CR _(rP)	0,84*	0,85*	0,59*	0,37 ^{ns}	0,76*	0,82*	0,90*
	CR _(rG)	0,84*	0,86*	0,51 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,95*	0,91*	0,95*
	CR _(rE)	0,87*	0,76*	-0,06 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,19 ^{ns}	0,14 ^{ns}
	RC _{CR} (%)	55,47	56,79	-	-	55,07	58,18	62,07

CR= Comprimento de raiz (cm); CPA= Comprimento de parte aérea (cm); CPF= Comprimento de primeira folha (cm); CSF= Comprimento de segunda folha (cm); CC= Comprimento do coleótilo (cm); IPF= Inserção da primeira folha (cm); MSR= Matéria seca de raiz (mg); MSPA= Matéria seca de parte aérea (mg); rP= Correlação fenotípica; rG= Correlação genética; rE= Correlação de ambiente; RC_{CR(%)}= Resposta correlacionada para CR, em relação à média; *Significativo a 5% de probabilidade pelo teste t; ns = Não significativo (GL= n - 2 ≈ 13); SM AlCl_3 **= Protocolo com solução mínima, com Al fornecido na fonte $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Sob condições normais de cultivo (ausência de Al), o crescimento de raiz e o desenvolvimento de parte aérea se dão simultaneamente, confirmado pelas associações verificadas entre CR com os demais caracteres mensurados em plântula, principalmente quando os genótipos são cultivados em solução nutritiva

completa. Por outro lado, com a adição do íon metálico na solução, alterações foram observadas, o que interferiu nestas relações, podendo comprometer o desenvolvimento normal da planta.

No cultivo em solução nutritiva completa com Al disponibilizado na fonte $\text{Al}_2(\text{SO}_4) \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, associações estáveis e de média a elevada magnitude foram observadas nas diferentes concentrações do elemento químico testadas entre CR e MSR, indicando que existe uma relação direta entre o desempenho destes caracteres, e que a MSR pode representar um possível caráter a ser adotado na seleção indireta de plantas tolerantes ao Al quando a seleção é efetuada nas condições de cultivo consideradas (Tabela 3.2). Enquanto isso, quando as plantas são cultivadas em solução completa com Al fornecido no sal $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Tabela 3.3), são verificadas correlações estáveis frente as doses tanto entre CR e MSR quanto entre CR e MSPA, demonstrando que esta fonte de Al desencadeia modificações no crescimento da raiz que são refletidas de forma significativa na formação de tecidos da parte aérea e no próprio desenvolvimento do sistema radicular, proporcionando maior relação entre o comprimento da raiz com os demais caracteres de parte aérea.

Quando as plântulas são cultivadas em solução mínima (Tabela 3.4), na ausência do Al tóxico não foram observadas correlações significativas entre o CR e os caracteres MSR, CSF e CC, indicando reduzida relação da elongação radicular com o desempenho destes caracteres nesta condição. Contudo, com a adição do íon metálico na solução, grande número de correlações com média à elevada magnitude são constatadas, demonstrando a ocorrência de mudança da expressão dos caracteres de plântula, evidenciando desempenho diretamente relacionado com a elongação da raiz. As correlações fenotípicas entre o CR e os caracteres CPA, CPF e IPF foram constantes, tanto na ausência do elemento tóxico quanto nas diferentes doses de Al adotadas, indicando que em solução mínima os caracteres responsáveis pela estatura da planta se desenvolvem concomitantemente com o crescimento da raiz. Apesar de CPA, CPF e IPF evidenciarem associações elevadas com base no fenótipo, a correlação genética não significativa e a elevada magnitude das correlações de ambiente permitem detectar o grande efeito do ambiente que atua na relação entre os caracteres neste protocolo, principalmente na dose 3 mg L^{-1} de Al, não permitindo a manutenção das associações mesmo em ambiente controlado, inviabilizando a seleção nestas doses do elemento químico.

De forma geral, pode ser verificado que os protocolos baseados em solução completa proporcionaram a relação entre o crescimento da raiz e a formação e desenvolvimento dos tecidos radiculares e de parte aérea (Tabelas 3.2 e 3.3), enquanto que em solução mínima, o comprimento de raiz apresentou relação direta com o crescimento em estatura das plântulas (Tabela 3.4). Este fato pode ser vinculado à composição em nutrientes das soluções trabalhadas. As soluções completas são formadas por vários elementos químicos essenciais ao desenvolvimento da planta, e o crescimento da raiz está diretamente relacionado à sua capacidade em absorver nutrientes que estão disponíveis na solução de cultivo, os quais são aproveitados para a formação e desenvolvimento dos tecidos do vegetal. Enquanto isso, a solução mínima é constituída unicamente pelo cálcio diluído, que quando absorvido promove a divisão celular e crescimento dos tecidos, visto que atua na síntese de novas paredes celulares e na formação do fuso mitótico (TAIZ e ZEIGER, 2004), e desta maneira, a relação da elongação das raízes com o crescimento dos órgãos da planta é mais pronunciada.

Nos três protocolos de avaliação, em grande parte das associações observadas, a magnitude das correlações genéticas foram superiores em relação às fenotípicas. De acordo com Gonçalves et al. (1996), essa superioridade pode ser justificada pelo resultado dos efeitos modificadores do ambiente na associação entre os caracteres, sendo a expressão fenotípica destes caracteres reduzida diante das influências do ambiente. Os caracteres com elevada magnitude de correlação (fenotípica e genotípica) podem ser considerados nas estratégias de seleção, contudo, somente as correlações genéticas envolvem uma associação de natureza herdável, podendo, por conseguinte, efetivamente contribuir com a orientação dos programas de melhoramento (CRUZ et al., 2004).

As correlações de ambiente significativas observadas nos três protocolos foram sempre positivas, indicando que os dois caracteres associados são beneficiados ou prejudicados pelas mesmas causas de variações de ambiente (FALCONER, 1989). No entanto, o cultivo em solução mínima proporcionou maior número de correlações de ambiente significativas entre o CR e os demais caracteres de plântula em relação às soluções completas, principalmente nas concentrações de 1 mg L^{-1} e 3 mg L^{-1} de Al (Tabela 3.4). Desta maneira, é possível inferir que o cultivo em solução mínima proporcionou efeitos de ambiente acentuados, acarretando na grande interferência nas possíveis associações entre caracteres, o que pode

comprometer a decisão do melhorista no momento da eleição de um possível caráter a ser adotado na seleção indireta, bem como, o uso deste protocolo para a seleção de plantas tolerantes ao Al.

Quando são analisados os valores de resposta correlacionada predita ($RC_{CR(\%)}$) observados com o cultivo das plântulas de aveia branca em solução completa (Tabelas 3.2 e 3.3), é possível verificar que maiores ganhos no comprimento da raiz são obtidos quando o Al é fornecido na fonte $AlCl_3 \cdot 6H_2O$, destacando as concentrações 16 e 32 mg L⁻¹ de Al, onde o maior número de correlações genéticas são proporcionadas, refletindo em respostas correlacionadas de elevada magnitude, principalmente nas seleções efetuadas com base nos caracteres CPA, CPF, MSR e MSPA. Já, na comparação conjunta dos três protocolos de avaliação, as maiores magnitudes de resposta correlacionada preditas foram verificadas quando os genótipos foram submetidos ao estresse por Al em solução nutritiva mínima (Tabela 3.4), sendo os maiores ganhos preditos em CR observados com a seleção de plântulas na dose 1 mg L⁻¹ de Al, destacando novamente os caracteres CPA, CPF, MSR e MSPA. No entanto, como anteriormente mencionado, nesta situação de cultivo é observada elevada interferência do ambiente no desempenho dos caracteres, conduzindo o melhorista a erros no momento da tomada de decisão.

A relação entre CR e os caracteres CPA, CPF, MSR e MSPA são as mais pronunciadas quando se considera a resposta predita correlacionada ($RC_{CR(\%)}$), estabelecendo que estas variáveis são as mais expressivas na seleção indireta de plântulas tolerantes ao Al, e/ou constituem os caracteres que indiretamente são mais afetados pelo efeito tóxico direto do Al no comprimento da raiz. Contudo, além da adoção de caracteres eficientes em expressar a tolerância ou sensibilidade ao Al, a seleção de genótipos tolerantes em condições de hidroponia exige o emprego de caracteres facilmente mensuráveis e acima de tudo não destrutivos, como o CR, CPA e CPF, permitindo o posterior transplante e cultivo das plântulas selecionadas, impossibilitando a adoção de caracteres destrutivos como MSR e MSPA (SPEHAR e MAKITA, 1994; VOSS et al, 2006).

Considerando a caracterização padrão das cultivares quanto à tolerância ao Al (URS 20 e UFRGS 14 – tolerante, UPFA 22 – tolerância intermediária, e ALBASUL e UPF 18 – sensíveis), foi empregado o método de agrupamento de Tocher a fim de identificar o protocolo de avaliação e a concentração de Al que

permite a classificação das cultivares pela análise conjunta de todas as variáveis em nível de plântula, tendo como base o nível de tolerância correspondente a cada cultivar (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 Agrupamento de genótipos de aveia branca submetidos ao estresse por diferentes protocolos e doses de alumínio em hidroponia, utilizando o método de agrupamento de Tocher, com base na distância generalizada de Mahalanobis (D^2). CGF - FAEM/UFPel, Pelotas-RS, 2008.

Protocolo	Doses de Al (mg L^{-1})	Grupos	Genótipos
SC $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3^*$	0	I	UPFA 22, UPF 18, UFRGS 14
		II	URS 20, ALBASUL
	8	I	UPF 18, ALBASUL, UPFA 22, UFRGS 14
		II	URS 20
	16	I	URS 20, UPF 18, UPFA 22
		II	ALBASUL
		III	UFRGS 14
	32	I	UPF 18, UFRGS 14
		II	URS 20, UPFA 22
		III	ALBASUL
SC AlCl_3^{**}	0	I	UPFA 22, UPF 18
		II	URS 20, ALBASUL, UFRGS 14
	8	I	URS 20, UPFA 22
		II	UPF 18, ALBASUL
		III	UFRGS 14
	16	I	URS 20, UPFA 22, UFRGS 14, ALBASUL
		II	UPF 18
	32	I	URS 20, UFRGS 14, UPFA 22
		II	UPF 18, ALBASUL
SM AlCl_3^{***}	0	I	URS 20, UFRGS 14, UPF 18, ALBASUL
		II	UPFA 22
	1	I	UPF 18, ALBASUL
		II	URS 20, UPFA 22
		III	UFRGS 14
	3	I	UPFA 22, ALBASUL
		II	URS 20, UFRGS 14
		III	UPF 18
	5	I	URS 20, UFRGS 14, UPF 18, ALBASUL
		II	UPFA 22

*Concentração de alumínio adicionada em solução de cultivo completa, tendo como fonte o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$; **Concentração de alumínio adicionada em solução de cultivo completa, tendo como fonte o $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; ***Concentração de alumínio adicionada em solução de cultivo mínima, tendo como fonte o $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Considerando o comportamento de cada constituição genética de acordo com o desempenho conjunto dos caracteres de plântula em relação aos protocolos baseados no uso de solução nutritiva completa (SC) com o Al fornecido nas fontes $\text{Al}_2(\text{SO}_4) \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ e $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, se verifica que na ausência do Al tóxico na solução se observa a formação de dois agrupamentos distintos, onde o genótipo UFRGS 14 no primeiro protocolo constitui o primeiro grupo de genótipos, juntamente com as cultivares UPF 18 e UPFA 22, e no segundo protocolo, sendo constituído pelas cultivares URS 20 e ALBASUL. Este comportamento pode ser decorrente da heterogeneidade natural das amostras utilizadas para o estudo em cada situação de cultivo, hipótese favorecida pelos resultados obtidos na análise de correlação nestas doses de Al (Tabelas 3.2 e 3.3) e também, pela contribuição relativa dos caracteres na formação dos agrupamentos (Tabela 3.6), onde nas duas situações de cultivo consideradas, os caracteres CR, CPA e CSF caracterizam as variáveis mais representativas, e contribuíram com diferentes magnitudes na formação dos agrupamentos.

Com a adição de crescentes concentrações de Al nas soluções de cultivo há a constante variação no número e composição dos agrupamentos formados em cada protocolo de avaliação, no entanto, nenhuma das situações de cultivo adotadas proporcionou a disposição dos genótipos em grupos distintos quanto à tolerância padrão ao Al (Tabela 3.5), estabelecida em estudos anteriores empregando os genótipos URS 20 e UFRGS 14 (tolerantes), UPFA 22 (tolerância intermediária) e, ALBASUL e UPF 18 (sensíveis).

Analizando a contribuição relativa geral dos caracteres para o estudo de diversidade entre genótipos em cada protocolo de avaliação adotado (Tabela 3.6), o CR apresentou contribuição considerável na formação dos agrupamentos, entretanto, os caracteres de parte aérea CPA, CPF, CSF e IPF também se destacaram, interferindo de forma expressiva na disposição dos genótipos nos diferentes grupos formados. A variação na importância dos caracteres foi ainda maior quando considerado as distintas doses de Al em cada metodologia, indicando também, grande influência do caráter MSPA na formação dos grupos observados na dose 16 mg L^{-1} para o protocolo SC $\text{Al}_2(\text{SO}_4) \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, e nas doses 16 e 32 mg L^{-1} na SC $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Apesar do caráter MSPA evidenciar elevada correlação com CR (Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4) e forte contribuição relativa na formação dos agrupamentos

(Tabela 3.6), apresenta maior dificuldade de seleção indireta e requerendo maior tempo de avaliação, sendo sua adoção inviabilizada pela destrutividade da amostra.

Tabela 3.6 Importância dos caracteres de plântula na análise de diversidade entre genótipos de aveia branca submetidos ao estresse por alumínio em cultivo hidropônico, utilizando a distância generalizada de Mahalanobis (D^2). CGF - FAEM/UFPel, Pelotas-RS, 2008.

CARÁTER	Contribuição relativa para a diversidade entre genótipos (%)				
	Dose de Al (mg L^{-1}) * - $\text{SC Al}_2(\text{SO}_4)_3$				
	Geral	0	8	16	32
CR	15,22	9,90	5,30	1,55	7,07
CPA	26,54	48,23	5,08	10,50	34,81
CPF	15,11	2,62	2,16	18,43	8,83
CSF	28,14	17,65	4,77	4,40	7,72
CC	6,14	8,54	1,11	9,90	3,56
IPF	4,49	5,37	17,56	4,85	10,61
MSR	1,84	3,67	55,76	0,86	13,69
MSPA	2,51	5,02	8,26	49,51	13,72

CARÁTER	Dose de Al (mg L^{-1}) ** - SC AlCl_3				
	Geral	0	8	16	32
CR	14,24	7,07	8,38	0,57	8,61
CPA	2,28	27,65	36,70	3,67	12,87
CPF	22,80	1,16	25,10	9,96	6,49
CSF	36,30	46,01	6,95	11,34	5,98
CC	0,91	5,39	4,13	5,12	1,79
IPF	19,41	5,90	5,06	9,49	6,78
MSR	2,99	3,02	3,12	2,74	4,49
MSPA	1,07	4,80	10,54	57,10	53,04

CARÁTER	Dose de Al (mg L^{-1}) *** - SM AlCl_3				
	Geral	0	1	3	5
CR	27,08	0,57	0,88	54,56	2,30
CPA	21,92	22,13	20,33	10,49	45,98
CPF	40,38	36,01	42,39	11,13	19,20
CSF	6,62	2,94	2,06	3,52	0,16
CC	2,15	0,25	4,07	1,90	7,10
IPF	0,66	1,78	2,66	11,18	6,06
MSR	0,40	0,01	7,66	5,28	0,50
MSPA	0,78	36,32	19,95	1,94	18,71

CR= Comprimento de raiz (cm); NR= Número de raízes (unidade); CPA= Comprimento de parte aérea (cm); CPF= Comprimento de primeira folha (cm); CSF= Comprimento de segunda folha (cm); IPF= Inserção de primeira folha (cm); CC= Comprimento de coleóptilo (cm); MSR= Matéria seca de raiz (mg); MSPA= Matéria seca de parte aérea (mg). *Concentração de alumínio adicionada em solução de cultivo completa, tendo como fonte o $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$; **Concentração de alumínio adicionada em solução de cultivo completa, tendo como fonte o $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$; ***Concentração de alumínio adicionada em solução de cultivo mínima, tendo como fonte o $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

O caráter CR representa a variável mais expressiva na distinção entre genótipos sensíveis e tolerantes ao Al tóxico, pois a raiz é o órgão mais afetado pelas propriedades nocivas deste elemento químico, uma vez que o Al está diretamente em contato com o sistema radicular (RYAN et al., 1993; HARTWIG et al., 2007). Contudo, o CR não revelou grande importância na determinação dos agrupamentos observados nas diferentes doses de Al em cada protocolo de avaliação (Tabela 3.6), o que indica a inconsistência dos grupos formados em relação à classificação padrão dos genótipos avaliados (Tabela 3.5).

Segundo Cruz et al. (2004), os caracteres dispensáveis em estudos de divergência genética são aqueles relativamente invariantes entre as cultivares estudadas e/ou, redundantes por estarem correlacionados com outros caracteres. Neste sentido, a ocorrência de correlações entre CR e os demais caracteres em nível de plântula nas diferentes doses de Al adotadas nos três protocolos de avaliação (Tabela 3.2, 3.3 e 3.4) auxiliam com a diminuição da contribuição deste caráter na formação dos agrupamentos. Este fato pode ser exemplificado com a observação dos agrupamentos formados na dose 3 mg L^{-1} de Al no protocolo SM AlCl_3 , sendo muito próximos da classificação padrão dos genótipos considerados (Tabela 3.5), e quando se avalia as correlações de CR com os demais caracteres de plântula nesta dose (Tabela 3.4) apenas a correlação entre CR e CSF é confirmada, sendo observada elevada contribuição de CR na formação dos grupos mais similares nesta mesma situação de cultivo (Tabela 3.5). Desta forma, a existência de correlação entre CR e os demais caracteres de plântula compromete a adoção da estatística multivariada como uma ferramenta eficiente na caracterização de genótipos de aveia branca quanto à tolerância ao Al em condições de hidroponia.

3.4 Conclusões

A composição da solução nutritiva e as fontes de Al que podem ser utilizadas na avaliação de constituições genéticas de aveia branca quanto à tolerância ao Al em hidroponia interferem na relação entre os caracteres mensurados em nível de plântula.

O estudo com base na análise conjunta dos caracteres em nível de plântula não permite a eficiente discriminação de genótipos de aveia branca quanto à

tolerância ao Al tóxico em cultivo hidropônico quando há relação de dependência entre as variáveis consideradas, portanto, o uso direto do caráter comprimento de raiz evidencia maior efetividade de seleção nesta espécie.

3.5 Referências bibliográficas

- ALLARD, R.W. **Principles of plant breeding**. John Wiley and Sons, New York, 485p, 1960.
- ARAÚJO, J.E.G. O alumínio trocável, possível causa do crestamento do trigo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 4., 1953, Belo Horizonte. **Anais...** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Rio de Janeiro, p.329-337, 1956.
- BECKMANN, I. Sobre o cultivo e melhoramento do trigo (*Triticum vulgare* Vill) no sul do Brasil. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.1, n.1, p.64-72, 1954.
- BISSINI, C.A.; MEURER, E.J.; BOHNEN, H. Solos ácidos e afetados por sais. In: MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. 3 ed. Editora Evangraf, Porto Alegre, p.181-205, 2006.
- CAMARGO, C.E.O.; OLIVEIRA, O.F. Tolerância de cultivares de trigo a diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva e no solo. **Bragantia**, Campinas, v.40, n.3, p.21-31, 1981a.
- CAMARGO, C.E.O.; FELÍCIO, J.C.; FERREIRA FILHO, A.W.P.; FREITAS, J.G.; RAMOS, V.J.; KANTHACK, R.A.D.; CASTRO, J.L. Melhoramento do trigo: XXX. Avaliação de linhagens com tolerância à toxicidade de alumínio, manganês e ferro em condições de campo. **Bragantia**, Campinas, v.54, n.1, p.81-93, 1995.
- CRUZ, C.D. **Programa Genes – versão Windows 2001.0.0**. Editora UFV, Viçosa, 648p., 2001.
- CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa, UFV, 408p., 2004.

- DEGENHARDT, J.; LARSEN, P.B.; HOWELL, S.H.; KOCHIAN, L.V. Aluminum resistance in the *Arabidopsis* mutant *alr-104* is caused by an aluminum-induced increase in rhizosphere pH. **Plant Physiology**, Rockville, v.117, p.19-27, 1998.
- FALCONER, D.S. **Introdution to quantitative genetics**. Longman, New York, 438p., 1989.
- FAOSTAT - **Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistical Database**, disponível em <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx>, acessado em 29 de julho de 2008.
- FERREIRA, R.P.; MOREIRA, A.; RASSINI, J.B. **Toxidez de alumínio em culturas anuais**. Documentos, 63. Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, 35p., 2006.
- FREITAS, F.A.; KOPP, M.M.; SOUSA, R.O.; ZIMMER, P.D.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C. Absorção de P, Mg, Ca e K e tolerância de genótipos de arroz submetidos a estresse por alumínio em sistemas hidropônicos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.1, p.72-79, 2006.
- FLOSS, E.L.; BAIER, A.C. Breeding oats at the University of Passo Fundo. **Oat Newsletter**, Winnipeg, v.29, p.35-37, 1979.
- FLOSS, E.L.; BAIER, A.C.; EICHLER, L. Oat production and breeding in South Brasil. **Oat Newsletter**, Winnipeg, v.33, p.11-13, 1983.
- FINATTO, T.; SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; VALÉRIO, I.P.; REIS, C.E.S.; RIBEIRO, G.; SILVEIRA, G.; FONSECA, D.A.R. Reação de tolerância de genótipos de aveia branca a concentrações de alumínio em solução nutritiva. **Magistra**, Cruz das Almas, v.19, n.1, p.07-15, 2007.
- FOY, C.D.; CHANEY, R.L.; WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v.29, p.511-566, 1978.
- GALLEGO, F.J.; BENITO, C. Genetic control of aluminium tolerance in rye (*Secale cereale* L.). **Theoretical and Applied Genetics**, Berlin, v.92, p.688-695, 1997.
- GONÇALVES, P.S.; MARTINS, A.L.M.; BORTOLLETO, N. Estimates of genetics parameters and correltions of juvenile caracteres based on open pallonated of Hevea. **Brazillian Journal of Genetics**, Ribeirão Preto, v.19, n.1, p.105-111, 1996.

- HARTWIG, I.; SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; BERTAN, I.; VALÉRIO, I.P.; SILVA, G.O.; RIBEIRO, G.; FINATTO, T.; SILVEIRA, G. Variabilidade fenotípica de caracteres adaptativos da aveia branca (*Avena sativa* L.) em cruzamentos dialélicos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.2, p.337-345, 2007a.
- HARTWIG, I.; OLIVEIRA, A.C.; CARVALHO, F.I.F.; BERTAN, I.; SILVA, J.A.G.; SCHMIDT, D.A.M.; VALÉRIO, I.P.; MAIA, L.C.; FONSECA, D.N.R.; REIS, C.E.S. Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. **Semina Ciências Agrárias**, Londrina, v.28, n.2, p.219-228, 2007b.
- JONES, D.L., KOCHIAN, L.V. Aluminum inhibition of the 1, 4, 5-triphosphate signal transduction pathway in wheat roots: a role in aluminum toxicity? **Plant Cell**, Baltimore, v.7, p.1913-1922, 1995.
- KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, Palo Alto, v.46, p.237-260, 1995.
- MATSUMOTO, H.; HIRASAWA, F.; TORIKAI, H.; TAKAHASHI, E. Localization of absorbed aluminium in pea root and its binding to nucleic acid. **Plant Cell Physiology**, Kyoto, v.17, p.627-631, 1976.
- MACHADO, P.L.O.A. **Considerações gerais sobre a toxicidade do alumínio nas plantas**. Documentos, 2. EMBRAPA-CNPS, Rio de Janeiro, 22p., 1997.
- MAZZOCATO, A.C.; ROCHA, P.S.G.; SERENO, M.J.C.M.; BOHNEN, H.; GRONGO, V., BARBOSA NETO, J.F. Tolerância ao alumínio em plântulas de milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.1, p.19-24, 2002.
- NAVA, I.C.; DELATORRE, C.A.; DUARTE, I.T.L.; PACHECO, M.T.; FEDERIZZI, L.C. Inheritance of aluminum tolerance and its effects on grain yield and grain quality in oats (*Avena sativa* L.). **Euphytica**, Wageningen, v.148, n.3, p.353-358, 2006.
- OLIVEIRA, P.H. **Herança genética e mapeamento molecular da tolerância à toxicidade do alumínio em aveia (*Avena sativa* L.)**. Porto alegre, Tese (Doutorado - Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, 102f., 2002.

- OLMOS, I.R.; CAMARGO, M.N. Ocorrência de alumínio tóxico nos solos do Brasil, sua caracterização e distribuição. **Ciência e Cultura**, Rio de Janeiro, v.28, n.2, p.171-180, 1976.
- PAIVA, O. Notas sobre fisiologia e seleção de trigo. **Revista Agronômica**, Porto Alegre, v. 6, p. 535-536, 1942.
- RYAN, P.R., DITOMASO, J.M., KOCHIAN, L.V. Aluminum toxicity in roots: an investigation of spatial sensitivity and the role of the root cap. **Journal Experimental Botany**, Oxford, v.44, p.437-446, 1993.
- SÁNCHEZ-CHACÓN, C.D.; FEDERIZZI, L.C.; MILACH, S.C.K. PACHECO, M.T. Variabilidade genética e herança da tolerância à toxicidade do alumínio em aveia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.9, p.1798-1808, 2000.
- SINGH, D. The relative importance of characters affecting genetic divergence. **Indian Journal of Genetics and Plant Breeding**, New Delhi, v. 41, n.2, p.237-245, 1981.
- SILVA, G.O.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; SILVA, A.J.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**, Pelotas, v.12, n.4, p.401-404, 2006.
- SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; COIMBRA, J.L.M.; VIEIRA, E.A.; BENIN, G.; OLIVEIRA, A.C.; FINATTO, T.; BERTAN, I.; SILVA, G.O.; CORREA, M.R. Tolerância ao alumínio em cultivares de aveia branca sob cultivo hidropônico. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.4, p.587-593, 2007a.
- SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; REIS, C.S.; BERTAN, I.; HARTWIG, I.; MAIA, L.C.; CRESTANI, M.; MARINI, N.; FONSECA, D.A.R.; NORBERG, R.; LUCHE, H.S.; MOLITERNO, E. Reação de cultivares de aveia (*Avena sativa* L.) ao estresse por alumínio em condições de hidroponia. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DA AVEIA, 27. 2007, Passo Fundo. **Resultados experimentais**. Comissão Brasileira de Pesquisa da Aveia, Passo Fundo, v.1, p.57-60, 2007b.

- SPEHAR, C.R.; MAKITA, M. Tolerância ao alumínio em plântulas de soja e sua utilização. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.8, p.1927-1932, 1994.
- SPEHAR, C.R.; SOUZA, L.A.C. Selection for aluminum tolerance in tropical soybeans. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.36, n.1, p.01-06, 2006.
- STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. **Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach**. 2 ed. McGraw-Hill Inc., New York, 631p., 1980.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Artmed, Porto Alegre, p.102-103, 2004.
- TEDESCO, M.J.; BISSANI, C.A. Acidez do solo e seus efeitos nas plantas. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; CAMARGO, F.A.O. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Gênese, Porto Alegre, p.75-92, 2004.
- VOSS, M.; SOUZA, C.N.A.; BAIER, A.C.; NASCIMENTO JÚNIOR, A.; BOFF, T. **Método de avaliação de tolerância à toxidez de alumínio em trigo, em condições de hidroponia, na Embrapa Trigo**. Embrapa Trigo, Passo Fundo, 16p., 2006. Documentos Online 67. Disponível em: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do67.htm.
- VOSS, M.; SOUSA, C.N.A.; MATTOS, D.F. **Avaliação de genótipos de trigo e de outros cereais de inverno ao crestamento, em solo com e sem aplicação de calcário**. Embrapa Trigo, Passo Fundo, 22p., 2007. Documentos Online 76. Disponível em: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do76.htm.
- XXVII RCBPA - REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DA AVEIA, 27. 2007, Passo Fundo. **Resultados experimentais**. Passo Fundo: Comissão Brasileira de Pesquisa da Aveia, v.1, 438p., 2007.
- WAGNER, C.W.; MILACH, S.C.K.; FEDERIZZI, L.C. Genetic inheritance of aluminum tolerance in oat. **Crop Breeding and Applied Biotechnonology**, Viçosa, v.1, p.22-26, 2001.
- WATANABE, T.; OKADA, K. Interactive effects of Al, Ca and other cations on root elongation of rice cultivars under low pH. **Annals of Botany**, v.95, n.2, p.379-385, 2005.

Discussão geral

O progresso genético depende necessariamente de um programa de melhoramento eficiente, que seja capaz de obter variabilidade, selecionar e disponibilizar constantemente genótipos superiores e ajustados às diferentes condições de ambiente. Em relação à aveia branca, o melhoramento genético tem contribuído de forma expressiva para o desenvolvimento desta cultura no Sul do Brasil e em outras regiões do país, disponibilizando variedades com melhor tipo agrônomo, que apresentam maior rendimento e qualidade de grãos, resistência a moléstias, bem como adaptação e estabilidade em diferentes ambientes de cultivo. Como consequência, o rendimento de grãos e o aproveitamento industrial deste cereal foram significativamente incrementados, viabilizando e impulsionando consideravelmente sua produção em escala comercial.

Entre os caracteres almejados, a tolerância ao AI vem sendo constantemente trabalhada em programas de melhoramento da aveia branca, onde esforços são depositados no intuito de compreender a atuação de genes envolvidos na expressão da tolerância a este elemento tóxico (SANCHES-CHÁCON et al., 2000; WAGNER et al., 2001; OLIVEIRA, 2002; NAVA et al.; 2006), e na seleção de plantas tolerantes (SILVA et al., 2006; FINATTO et al., 2007; SILVA et al., 2007a, b).

Neste trabalho foi buscado primeiramente relatar os principais aspectos relacionados à tolerância ao AI nas espécies cultivadas disponíveis na literatura, a fim de trazer contribuições importantes a serem consideradas no momento do desenvolvimento de trabalhos relacionados ao estudo deste caráter.

Em virtude do forte emprego da caracterização e seleção de constituições genéticas de aveia branca quanto à tolerância ao AI em condições de hidroponia, trabalhos futuros buscando a maior eficiência das soluções nutritivas adotadas podem trazer contribuições importantes para o melhoramento genético desta cultura

e de espécies relacionadas. Consequentemente, a maior eficiência na seleção de plantas tolerantes ao Al resultará em benefícios econômicos e sociais, pois auxiliará no desenvolvimento de novos genótipos mais produtivos e adaptados ao cultivo em ambientes restritivos.

Os resultados obtidos com a avaliação da manifestação fenotípica de genótipos de aveia branca quanto à tolerância ao Al quando submetidos a diferentes protocolos e doses do elemento tóxico em condições de hidroponia possibilitou verificar que o caráter comprimento da raiz principal permite a diferenciação entre genótipos sensíveis e tolerantes à presença do Al no ambiente de cultivo. A retomada do crescimento da raiz é apontado como o caráter mais efetivo de caracterização de constituições genéticas quanto à tolerância e sensibilidade ao Al (SILVA et al., 2006; BERTAN et al., 2006). Contudo, nesta avaliação, foi verificada grande eficiência na classificação dos genótipos de aveia branca com base no desempenho apresentado para o caráter comprimento da raiz principal nos protocolos baseadas no uso de soluções completas, permitindo a análise do comportamento dos genótipos por meio da análise de regressão considerando, inclusive, o desempenho na ausência do elemento tóxico na solução de cultivo.

Os protocolos caracterizados pela adoção Al à solução nutritiva completa por meio de distintas fontes $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}]$ e $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ revelaram elevada eficiência na identificação de genótipos de aveia branca tolerantes e sensíveis ao Al tóxico em condições de hidroponia, enquanto a utilização de soluções mínimas nesta avaliação não possibilitou modificações na expressão do comprimento das raízes das plântulas, com exceção da cultivar UFRGS 14. Este fato é possivelmente explicado pela ausência dos macro e micronutrientes essenciais ao desenvolvimento normal das plântulas na solução de cultivo, e/ou pela competição vantajosa do Ca pelos sítios radiculares, sendo predominantemente absorvido em detrimento do Al, inibindo seu efeito tóxico (FERREIRA et al., 2006; CAMARGO, 1985).

As constituições genéticas de aveia branca revelaram variabilidade para o caráter tolerância ao Al, onde a cultivar ALBASUL apresentou estabilidade de comportamento do tipo estática, por se manifestar indiferente à presença do Al na solução nutritiva. No entanto, a cultivar UFRGS 14 evidenciou elevado desempenho médio para comprimento de raiz total, respondendo fortemente à melhoria das condições de ambiente.

A análise da expressão dos caracteres de plântula em condição de toxidez por Al em hidroponia é importante no sentido de viabilizar a seleção indireta de genótipos tolerantes, desde que estes evidenciem forte associação com o padrão de tolerância e elevada herdabilidade; ou mesmo pela análise simultânea, envolvendo os vários caracteres morfológicos observados. Neste sentido, de acordo com a análise de correlações fenotípicas, genotípica e de ambiente, foi possível verificar que o desempenho dos caracteres de plântula é altamente relacionado com o comprimento de raiz em genótipos de aveia branca submetidos ao efeito tóxico do Al em condições de hidroponia. Estes resultados corroboram com a literatura, evidenciando que a ação fitotóxica do Al é mais visível e efetiva inicialmente no desenvolvimento das raízes (RYAN et al., 1993; HARTWIG et al., 2007b), porém, em um momento posterior afeta tanto o sistema radicular como o desenvolvimento dos tecidos aéreos do vegetal (MACHADO, 1997; TEDESCO e BISSANI, 2004).

De forma geral, os protocolos baseados em solução completa proporcionaram a relação entre o crescimento da raiz e a formação e desenvolvimento dos tecidos radiculares e de parte aérea, enquanto que em solução mínima, o comprimento de raiz apresentou relação direta com o crescimento em estatura das plântulas. Este fato pode estar vinculado à composição em nutrientes das soluções trabalhadas, que caracterizam diferentes condições de ambiente, e assim, inferem diretamente na relação entre os caracteres de plântula.

Segundo Cruz et al. (2004), os caracteres dispensáveis em estudos de divergência genética são aqueles relativamente invariantes entre as cultivares estudadas e/ou, redundantes por estarem correlacionados com outros caracteres. Desta forma, o estudo com base na análise conjunta dos caracteres em nível de plântula não permitiu a eficiente discriminação de genótipos de aveia branca quanto à tolerância ao Al tóxico em cultivo hidropônico, em virtude da relação de dependência entre o comprimento total da raiz e os demais caracteres avaliados.

Referências bibliográficas (Introdução e Discussão Geral)

- ALLARD, R.W. **Principles of plant breeding**. John Wiley and Sons, New York, 485p, 1960.
- BAIER, A. C.; SOMMERS, D. J.; GUSTAFSON, J. P. Aluminium tolerance in wheat: correlating hydroponic evaluations with field and soil performances. **Journal of Plant Breeding**, Berlin, v.114, p.291-296, 1995.
- BERTAN, I.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; SILVA, A.J.G.; BENIN, G.; VIEIRA, E.A.; SILVA, G.O.; HARTWIG, I.; VALÉRIO, I.P.; FINATTO, T. Dissimilaridade genética entre genótipos de trigo avaliados em cultivo hidropônico sob estresse por alumínio. **Bragantia**, Campinas, v.65, n.1, p.55-63, 2006.
- CAMARGO, C.E.O.; OLIVEIRA, O.F. Tolerância de cultivares de trigo a diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva e no solo. **Bragantia**, Campinas, v.40, n.3, p.21-31, 1981.
- CAMARGO, C.E.O. Efeitos de níveis de cálcio combinados com diferentes concentrações de sais na tolerância de trigo à toxicidade de alumínio, em solução nutritiva. **Bragantia**, Campinas, v.44, n.2, p.659-668, 1985.
- CANÇADO, G.M.A.; LOPES, M.A.; PAIVA, E. Genética e bioquímica da tolerância de plantas ao alumínio. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A.E.; CARVALHO, J.G. **Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**. SBSCS, Viçosa; UFLA/DCS, Lavras; 818p., 1999.
- CARVALHO, F.I.F.; BARBOSA, J.F.; FLOSS; FERREIRA FILHO, A.W.; FRANCO, F.A.; FEDERIZZI, L.C. Potencial genético da aveia como produtora de grãos no

- Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.22, n.1, p.71-82, 1987.
- COFFMAN, F.A. **Oats and oats improvement**. American Society of Agronomy, Madison, 650p., 1961.
- CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. UFV, Viçosa, 408p., 2004.
- DELHAIZE, E.; RYAN P.R. Aluminum toxicity and tolerance in plants. **Plant Physiology**, Rockville, v.107, n.2, p.315-321, 1995.
- DE SÁ, R. M.; DE FRANCISCO, A.; OGLIARI, P. J.; BERTOLDI, F. C. Variação no conteúdo de beta-glucanas em cultivares brasileiros de aveia. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.20, n.1, p.99-102, 2000.
- FAOSTAT - Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistical Database, disponível em <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx>, acessado em 29 de julho de 2008.
- FERREIRA, R.P.; MOREIRA, A.; RASSINI, J.B. **Toxidez de alumínio em culturas anuais**. Documentos, 63. Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, 35p., 2006.
- FINATTO, T.; SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; VALÉRIO, I.P.; REIS, C.E.S.; RIBEIRO, G.; SILVEIRA, G.; FONSECA, D.A.R. Reação de tolerância de genótipos de aveia branca a concentrações de alumínio em solução nutritiva. **Magistra**, Cruz das Almas, v.19, n.1, p.07-15, 2007.
- GARLAND, M.L.; CAMPBELL, K.A.; CARTER JUNIOR, T.E. Aluminum tolerance in soybean: genotypic correlation and repeatability of solution culture and greenhouse screening methods. **Crop Science**, Madison, v.30, p.1049-1054, 1990.
- HARTWIG, I.; SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; BERTAN, I.; VALÉRIO, I.P.; SILVA, G.O.; RIBEIRO, G.; FINATTO, T.; SILVEIRA, G. Variabilidade fenotípica de caracteres adaptativos da aveia branca (*Avena sativa* L.) em cruzamentos dialélicos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.2, p.337-345, 2007a.
- HARTWIG, I.; OLIVEIRA, A.C.; CARVALHO, F.I.F.; BERTAN, I.; SILVA, J.A.G.; SCHMIDT, D.A.M.; VALÉRIO, I.P.; MAIA, L.C.; FONSECA, D.N.R.; REIS, C.E.S.

- Mecanismos associados à tolerância ao alumínio em plantas. **Semina Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 2, p.219-228, 2007b.
- KOCHIAN, L.V.; HOEKENGA, O.A.; PIÑEROS, M.A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v.55, p. 459-493, 2004.
- MACHADO, P.L.O.A. **Considerações gerais sobre a toxicidade do alumínio nas plantas**. Documentos, 2. EMBRAPA-CNPS, Rio de Janeiro, 22p., 1997.
- NAVA, I.C.; DELATORRE, C.A.; DUARTE, I.T.L.; PACHECO, M.T.; FEDERIZZI, L.C. Inheritance of aluminum tolerance and its effects on grain yield and grain quality in oats (*Avena sativa* L.). **Euphytica**, Wageningen, v.148, n.3, p.353-358, 2006.
- OLIVEIRA, P.H. **Herança genética e mapeamento molecular da tolerância à toxicidade do alumínio em aveia (*Avena sativa* L.)**. Porto alegre, 2002, 102p. Tese (Doutorado - Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS.
- RYAN, P.R., DITOMASO, J.M., KOCHIAN, L.V. Aluminum toxicity in roots: an investigation of spatial sensitivity and the role of the root cap. **Journal Experimental Botany**, Oxford, v.44, p.437-446, 1993.
- SÁNCHEZ-CHACÓN, C.D.; FEDERIZZI, L.C.; MILACH, S.C.K. PACHECO, M.T. Variabilidade genética e herança da tolerância à toxicidade do alumínio em aveia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.9, p.1798-1808, 2000.
- SCHEFFER-BASSO, S. M.; FLOSS, E. L.; CECHETTI, D.; BARÉA, K.; BORTOLINI, F. Potencial de genótipos de aveia para duplo-propósito. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.7 n.1, p. 22-28, 2001.
- SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; COIMBRA, J.L.M.; BENIN, G.; OLIVEIRA, A.C.O.; VIEIRA, E.A.; FINATTO, T.; BERTAN, I.; SILVA, G.O.; GARCIA, S.M. Tolerância à toxicidade por alumínio em cultivares de aveia (*Avena sativa* L.) sob cultivo hidropônico. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v.12, n.3, p.265-271, 2006.
- SILVA, G.O.; CARVALHO, F.I.F.; OLIVEIRA, A.C.; SILVA, A.J.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**, Pelotas, v.12, n.4, p.401-404, 2006.
- SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; COIMBRA, J.L.M.; VIEIRA, E.A.; BENIN, G.; OLIVEIRA, A.C.; FINATTO, T.; BERTAN, I.; SILVA, G.O.; CORREA, M.R. Tolerância ao alumínio em cultivares de aveia branca sob cultivo hidropônico. **Bragantia**, Campinas, v.66, n.4, p.587-593, 2007a.
- SILVA, J.A.G.; CARVALHO, F.I.F.; REIS, C.S.; BERTAN, I.; HARTWIG, I.; MAIA, L.C.; CRESTANI, M.; MARINI, N.; FONSECA, D.A.R.; NORBERG, R.; LUCHE, H.S.; MOLITERNO, E. Reação de cultivares de aveia (*Avena sativa* L.) ao estresse por alumínio em condições de hidroponia. In: REUNIÃO DA COMISSÃO BRASILEIRA DE PESQUISA DA AVEIA, 27. 2007, Passo Fundo. **Resultados experimentais**. Comissão Brasileira de Pesquisa da Aveia, Passo Fundo, v.1, p.57-60, 2007b.
- SOUZA, L.A.C. Reação de genótipos de soja ao alumínio em hidroponia e no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, n.36, n.10, p.1255-1260, 2001.
- SPEHAR, C.R.; SOUZA, L.A.C. Selection for aluminum tolerance in tropical soybeans. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.36, n.1, p.01-06, 2006.
- TAVARES, M.J.C.M.S.; ZANETINI, M.H.B.; CARVALHO, F.I.F. Origem e evolução do gênero *Avena*: suas implicações no melhoramento genético. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.28, n.4, p.499-507, 1993.
- TEDESCO, M.J.; BISSANI, C.A. Acidez do solo e seus efeitos nas plantas. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; CAMARGO, F.A.O. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Gênese, Porto Alegre, p.75-92, 2004.
- WAGNER, C.W.; MILACH, S.C.K.; FEDERIZZI, L.C. Genetic inheritance of aluminum tolerance in oat. **Crop Breeding and Applied Biotechnonology**, Viçosa, v.1, p.22-26, 2001.

Vitae

Maraisa Crestani nasceu em 12 de janeiro de 1984, filha de Sérgio Crestani e Maria Clélia Lanius Crestani, natural de São Miguel do Oeste – SC. Em 2002, ingressou na Faculdade de Agronomia do Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), obtendo o título de Engenheira Agrônoma no ano de 2006. No período de agosto de 2003 à julho de 2006 foi Bolsista de Iniciação Científica Probic/UDESC. Durante o período de graduação realizou estágios extracurriculares na Cooperativa Regional Alfa (assessoria técnica e extensão rural) e na Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI (biologia molecular e cultura de tecidos). Em julho de 2006 iniciou sua trajetória no Centro de Genômica e Fitomelhoramento (CGF) na FAEM/UFPEL, ingressando como estagiária, sob a orientação do Professor Fernando Irajá Félix de Carvalho, e co-orientação do Professor José Antonio Gonzalez da Silva, cumprindo seu estágio curricular obrigatório até novembro do mesmo ano, requisito para a conclusão do Curso de Agronomia do Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina – CAV/UDESC. Em março de 2007 ingressou no mestrado na área de concentração Fitomelhoramento, pelo Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA/FAEM/UFPEL), sob orientação do Professor Fernando Irajá Félix de Carvalho. Em fevereiro de 2008, por cumprir os requisitos necessários, progrediu ao nível de doutorado.

