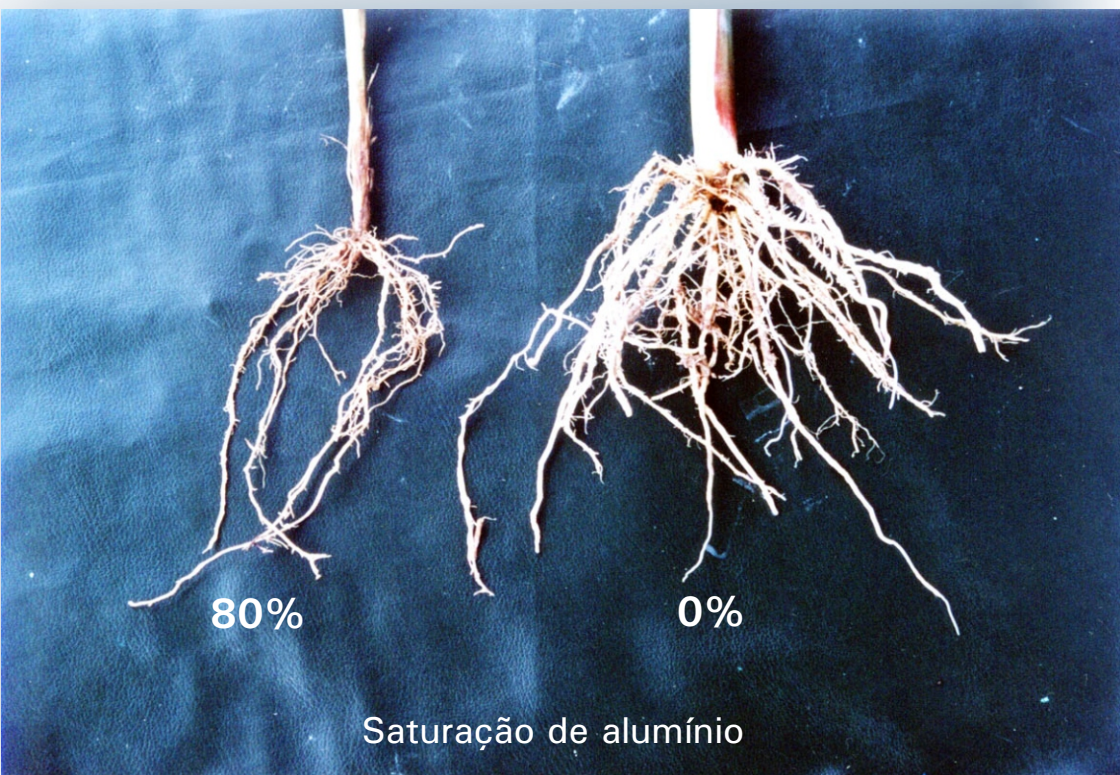


Toxidez de alumínio em culturas anuais



ISSN 1980-6841

Dezembro, 2006

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Pecuária Sudeste
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Documentos 63

Toxidez de alumínio em culturas anuais

Reinaldo de Paula Ferreira
Adônis Moreira
Joaquim Bartolomeu Rassini

São Carlos, SP
2006

Embrapa Pecuária Sudeste

Rodovia Washington Luiz, km 234

Caixa Postal 339

Fone: (16) 3361-5611

Fax: (16) 3361-5754

Home page: <http://www.cppse.embrapa.br>

Endereço eletrônico: sac@cppse.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Alberto C. de Campos Bernardi

Secretário-Executivo: Edison Beno Pott

Membros: Carlos Eduardo Silva Santos, Maria Cristina C. Brito,
Odo Primavesi, Sônia Borges de Alencar

Revisor de texto: Edison Beno Pott

Normalização bibliográfica: Sônia Borges de Alencar

Foto da capa: Adônis Moreira

Editoração eletrônica: Maria Cristina Campanelli Brito

1ª edição on-line 2006

Todos os direitos reservados.

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação - CIP
Embrapa Pecuária Sudeste**

Reinaldo de Paula Ferreira

Toxidez de alumínio em culturas anuais / Reinaldo de Paula Ferreira, Adônis Moreira, Joaquim Bartolomeu Rassiní. -- São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006.

35 p. ; 21 cm.— (Embrapa Pecuária Sudeste. Documentos, 63).

ISSN: 1980-6841

1. Toxidez - Alumínio - Culturas. I. Ferreira, Reinaldo de Paula. II. Moreira, Adônis. III. Rassiní, Joaquim Bartolomeu. IV. Título. V. Série.

CDD: 631.42

© Embrapa 2006

Autores

Reinaldo de Paula Ferreira

Engenheiro Agrônomo, Dr., Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, Rod. Washington Luiz, km 234, Caixa Postal 339, CEP: 13560-970, São Carlos, SP.
Endereço eletrônico: reinaldo@cnpse.embrapa.br

Adônis Moreira

Engenheiro Agrônomo, Dr., Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, Rod. Washington Luiz, km 234, Caixa Postal 339, CEP: 13560-970, São Carlos, SP.
Endereço eletrônico: adonis@cnpse.embrapa.br

Joaquim Bartolomeu Rassini

Engenheiro Agrônomo, Dr., Pesquisador da Embrapa Pecuária Sudeste, Rod. Washington Luiz, km 234, Caixa Postal 339, CEP: 13560-970, São Carlos, SP.
Endereço eletrônico: rassini@cnpse.embrapa.br

Sumário

1. Introdução	7
2. Fatores do solo que influenciam a toxidez de alumínio	9
3. Efeitos do alumínio sobre o crescimento da planta	10
4. Mecanismos de tolerância à toxidez de alumínio	13
5. Metodologias para avaliação de cultivares tolerantes à toxidez de alumínio	17
6. Controle genético da tolerância à toxidez de alumínio ...	23
7. Considerações finais	28
8. Referências bibliográficas	29

Toxidez de alumínio em culturas anuais

Reinaldo de Paula Ferreira

Adônis Moreira

Joaquim Bartolomeu Rassini

1. Introdução

A toxidez causada por alumínio é um fator limitante de grande importância à produção de grãos nas regiões do Brasil cobertas por vegetação de cerrado. Essas áreas ocupam quase um quarto do território nacional, concentrando-se nos Estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Tocantins e Piauí. Ali, predominam os Latossolos, caracteristicamente ácidos, com baixa capacidade de troca catiônica (CTC), alta saturação por alumínio trocável e teores muito baixos de fósforo disponível às plantas.

A adaptação de plantas a condições adversas tem crescido em importância. Isto se deve, principalmente, aos custos crescentes da produção de alimentos e, também, à exploração de áreas menos férteis. Dessa forma, tem-se dado enfoque tanto para a adaptação das plantas ao solo como do solo às plantas.

A redução da taxa de crescimento radicular de plantas sensíveis tem sido considerado o principal efeito de níveis tóxicos de alumínio, que afeta o alongamento e a divisão celular. Essa restrição diminui a capacidade da planta para obter água e nutrientes do subsolo, em virtude do enraizamento superficial, tornando-a, portanto, menos produtiva e mais susceptível à seca. Uma alternativa para reduzir esse efeito tóxico nesses solos é a incorporação profunda de corretivos e de fertilizantes. Entretanto, as técnicas atualmente disponíveis para este fim são consideradas impraticáveis, tanto por não se conhecer uma metodologia que permita controlar adequadamente o alumínio permutável na parte subsuperficial dos solos, quanto por causa dos custos dos corretivos e de sua aplicação e da grande extensão de áreas de solos que apresentam acidez nociva em grau considerável.

A opção que tem sido considerada mais promissora para contornar este problema é a exploração do potencial genético das plantas, uma vez que espécies, cultivares e variedades diferem amplamente quanto à tolerância ao excesso de alumínio no solo. A identificação e a seleção de genótipos tolerantes resultam em vantagens, independentemente do grau de tecnologia utilizado.

Em razão desses fatos, o objetivo deste trabalho é mostrar os efeitos tóxicos do alumínio em plantas anuais e a necessidade de estudos que identifiquem plantas tolerantes a solos com alto teor de Al trocável.

2. Fatores do solo que influenciam a toxidez de alumínio

A solubilidade do alumínio no solo e, conseqüentemente, sua toxidez são influenciadas por vários fatores, incluindo pH, tipo de argila predominante, concentração de sais na solução e teor de matéria orgânica do solo (Foy, 1974; Silva, 1997).

Em geral, a toxidez de alumínio é mais comum em solos com pH em água abaixo de 5,5, mas é particularmente severa em pH abaixo de 5, situação em que a solubilidade de alumínio aumenta acentuadamente (Magistad, 1925) e representa mais de 50% da CTC do solo (Evans & Kamprath, 1970).

Adams & Lund (1966) cultivaram algodão em três solos ácidos da Inglaterra. Nessas condições, observaram que, embora houvesse boa correlação entre penetração da raiz e pH nos diferentes subsolos estudados, o pH crítico do solo Norfolk foi de 5,5 e dos solos Dickson e Bladen, próximo a 5. Também houve grandes diferenças nos níveis críticos de alumínio trocável, que variou de $0,1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no Norfolk e $1 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no Dickson a $2,5 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ no Bladen. Os autores associaram essas diferenças ao tipo de argila predominante em cada solo, que no Norfolk foi caolinita ($\text{CTC} = 3,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), no Dickson, vermiculita ($\text{CTC} = 8,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e no Bladen, montmorilonita ($\text{CTC} = 17,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Entretanto, quando as concentrações de alumínio foram expressas em termos de atividade molar, foram encontrados valores críticos semelhantes nos três solos avaliados. O subsolo do Dickson, mesmo com baixo pH, causou menor toxidez de alumínio, em

virtude, principalmente, da alta concentração de sais, que reduziram, conseqüentemente, o coeficiente de atividade do alumínio.

Os solos orgânicos, comparativamente aos solos minerais, apresentam valores críticos de pH mais baixo. Isso ocorre, pelo menos em parte, em conseqüência da formação de complexos de baixa solubilidade entre a matéria orgânica e o alumínio (Evans & Kamprath, 1970).

3. Efeitos do alumínio sobre o crescimento da planta

3.1. Sintomas da toxidez de alumínio

Os sintomas da toxidez de alumínio nem sempre são facilmente identificáveis. Os sintomas foliares assemelham-se à deficiência de fósforo (folhas de crescimento anormal; coloração púrpura nos colmos, nas folhas e nas nervuras) ou à deficiência de cálcio (enrolamento das folhas jovens, colapso do ápice da planta e dos pecíolos). Entretanto, pode haver variações de sintomas entre espécies (Furlani, 1989).

As raízes danificadas por alumínio são caracteristicamente curtas, grossas e quebradiças, com poucas ramificações finas, e são, portanto, pouco eficientes na absorção de água e de nutrientes do subsolo (Foy, 1976; Kochian, 1995).

3.2. Efeitos benéficos do alumínio

Embora o alumínio não seja considerado elemento essencial para espécies vegetais, em baixas concentrações ele pode estimular o crescimento de algumas plantas. Salvador et

al. (2000) por exemplo, relataram que, em solução nutritiva, o alumínio em pequenas concentrações aumentou o crescimento da goiabeira. Foy (1974) também menciona que, em solução nutritiva, baixas concentrações de alumínio (0,25 a 0,30 mg L⁻¹) estimularam o crescimento de milho. Os mecanismos pelos quais pequenas quantidades de alumínio beneficiam o crescimento das plantas ainda não são bem claros, e pode ser diferente para cada cultivar e para cada meio de crescimento. Estas respostas não resultam, necessariamente, dos efeitos do alumínio *per se*.

Possíveis explicações para o efeito benéfico de pequenas quantidades de alumínio no crescimento de plantas incluem: aumento na solubilidade e na disponibilidade de ferro, resultante da acidez provocada pelo alumínio (Foy, 1974); correção ou prevenção da deficiência interna de ferro, pelo deslocamento deste elemento, pelo alumínio, de sítios em que ele é metabolicamente inativo (Grime & Hodgson, 1969); e bloqueio de cargas negativas da parede celular, promovendo maior absorção de fósforo (Mullette & Hannon, 1974).

3.3. Efeitos citológicos e morfológicos do alumínio

O alumínio pode causar severas anormalidades citológicas em plantas, redundando em menor crescimento radicular, possivelmente por afetar o alongamento e a divisão celular (Klimashevskii & Dedov, 1976). É comumente aceito que o alumínio afeta a divisão celular por aumentar a estabilidade da dupla hélice, dificultando, portanto, a replicação de DNA na

interfase (Morimura & Matsumoto, 1978) e o alongamento celular por reduzir a plasticidade e a elasticidade da parede celular (Klimashevskii & Dedov, 1976). Clarkson (1965) constatou que, em mudas de cebola, após 6 – 8 horas de tratamento com 10^{-4} mol L⁻¹ de sulfato de alumínio, o crescimento radicular foi completamente inibido, causando, concomitantemente, drásticas reduções no aparecimento de figuras mitóticas. Apesar desta redução, as figuras mitóticas não modificaram sua configuração em presença de alumínio, evidenciando, assim, nenhuma interferência direta deste elemento sobre os mecanismos responsáveis pela formação das diversas fases do ciclo mitótico, como, por exemplo, formação do fuso, ou da separação das cromátides.

Keser et al. (1977), trabalhando com beterraba açucareira, demonstraram a ocorrência de graves anomalias morfológicas nas zonas de crescimento radicular em variedades sensíveis ao alumínio. Observaram que células corticais, cultivadas em 8 a 12 mg L⁻¹ de alumínio, eram grandes, anormais e divididas irregularmente, e apresentavam desintegração na região da coifa e do córtex, tornando a região apical indistinguível. Havia precipitação de Al_3PO_4 nas regiões lesadas, principalmente no ápice, ocorrendo a paralisação da divisão celular.

3.4. Efeitos fisiológicos e bioquímicos do alumínio

Evidências bioquímicas indicam que o alumínio liga-se ao fósforo por reação de adsorção-precipitação na parede das células epidérmicas e corticais, e provavelmente os sítios desta

adsorção são os grupos carboxílicos livres dos ácidos poligalacturônicos da lamela média (Matsumoto et al., 1976).

Entretanto, parte do alumínio absorvido pelas raízes pode também penetrar nas células do tecido meristemático e interferir na divisão celular (Morimura & Matsumoto, 1978), no alongamento da raiz (Matsumoto et al., 1976), na respiração (Klimashevskii et al., 1972), na fosforilação dos açúcares (Clarkson, 1965), na atividade de ATPases (Klimashevskii et al., 1972) e de fosfatases ácidas (Clark & Brown, 1974), no teor de aminoácidos (Klimashevskii et al., 1970), na fotossíntese (Lemos Filho, 1982), na permeabilidade da membrana plasmática (Klimashevskii et al., 1972) e na absorção de água e de nutrientes (Lance & Pearson, 1969).

4. Mecanismos de tolerância à toxidez de alumínio

Os mecanismos fisiológicos responsáveis pela tolerância à toxidez de alumínio ainda não foram esclarecidos, e podem variar entre espécies e cultivares. É provável que esses mecanismos sejam controlados por diferentes genes, por meio de diferentes rotas bioquímicas. Obviamente, plantas tolerantes devem ser capazes de prevenir a absorção de alumínio, ou de complexá-lo após sua absorção (Parentoni et al., 2001).

Postulam-se os seguintes mecanismos de tolerância ao alumínio:

- **Capacidade das plantas de elevar o pH da rizosfera e conseqüentemente de reduzir a solubilidade do alumínio**

Foy et al. (1969) não encontraram, em soja, mudanças diferenciais de pH induzidas por alumínio. Entretanto, certas cultivares de trigo, de cevada, de arroz, de ervilha e de milho, tolerantes à toxidez de alumínio, aumentam o pH da solução nutritiva e conseqüentemente reduzem a solubilidade deste elemento (Klimashevskii & Dedov, 1976; Mugwira & Patel, 1977). Em contraste, cultivares sensíveis dessas mesmas espécies diminuem, ou não alteram o pH da solução nutritiva, e ficam, portanto, expostas a maior concentração de alumínio solúvel.

Segundo Wilkson (1970), as possíveis causas do abaixamento do pH na rizosfera são: liberação de H^+ resultante da maior absorção de cátions, em relação a ânions; produção e hidrólise de CO_2 pela respiração radicular; troca de H^+ associado a grupos carboxílicos (principalmente ácidos poligalacturônicos da parede celular) por outros cátions e excreção de H^+ por microrganismos associados à rizosfera.

Em trigo, a maior elevação do pH no meio de cultivo, pela variedade tolerante, parece estar associada à maior absorção de NO_3^- (Mugwira & Patel, 1977). Entretanto, Henning (1975) concluiu que as mudanças de pH em cultivares de trigo tolerantes e sensíveis à toxidez de alumínio resultaram na morte dos meristemas das raízes. Se as mudanças de pH são causas primárias da toxidez de alumínio, ou se resultam do crescimento diferencial das cultivares em presença deste elemento, ainda não se sabe. De qualquer modo, não importando a causa, não há dúvida de seu efeito na subseqüente solubilidade e toxidez de alumínio (Foy et al., 1978).

- Capacidade das plantas de possuir baixa CTC na raiz, portanto, maior afinidade por cátions monovalentes, de modo que acumulem, assim, menor concentração de alumínio em suas raízes

Esta é uma das explicações porque as gramíneas, que possuem menor CTC na raiz, são mais tolerantes do que as leguminosas (Foy, 1974). Parentoni et al. (2001) sugeriram que os altos valores de CTC na raiz podem ser devidos à liberação de H^+ associado a grupos carboxílicos, principalmente ácidos poligalacturônicos da parede celular.

- Capacidade das plantas de produzir elevados teores de ácidos orgânicos responsáveis pela complexação do alumínio

Algumas plantas produzem grande teor de ácidos orgânicos, que quelatam o alumínio, facilitando sua translocação (Jones, 1961). As folhas mais velhas da ervilha, por exemplo, podem apresentar mais de 10.000 mg L^{-1} de alumínio (Matsumoto et al., 1976). Galvani (1981) sugere a possibilidade de ácidos orgânicos, principalmente ácido transaconítico e ácido málico, estarem ligados ao mecanismo de tolerância de plantas de sorgo à toxidez de alumínio.

- Capacidade das plantas de secretar mucilagem em presença de alumínio

A alta capacidade de ligação do alumínio à mucilagem pode ser parcialmente explicada pelas reações de troca entre alumínio e as cargas negativas do ácido poliurônico, que é um dos principais constituintes da mucilagem (Wright & Northcote, 1974). Este material é sintetizado, principalmente, pelo

complexo de Golgi das células mais externas da coifa (Morré et al., 1967).

- Capacidade das plantas de utilizar os nutrientes em presença de alumínio, principalmente fósforo e cálcio

Plantas submetidas a níveis tóxicos de alumínio acumulam fósforo no sistema radicular (Sivaguru & Paliwal, 1993). Isto ocorre, possivelmente, em virtude de uma reação de adsorção-precipitação entre alumínio e fósforo nas raízes, sobretudo na parede das células epidérmicas e corticais (Matsumoto et al., 1976). Foy & Brown (1964), estudando tolerância diferencial à toxidez de alumínio em várias espécies de plantas em solução nutritiva e em solos ácidos, concluíram que esta característica está associada à habilidade das plantas para absorver e utilizar fósforo na presença de altos níveis de alumínio no meio do crescimento sem, contudo, mostrar sinais de deficiência.

Além da proeminente relação entre a toxidez de alumínio e a deficiência de fósforo na parte aérea, também o cálcio apresenta-se com teores reduzidos nos tecidos de certas plantas cultivadas sob níveis tóxicos de alumínio. Atribui-se, por exemplo, o sintoma de “quebra de pecíolo”, em soja, à deficiência de cálcio induzida por alumínio (Foy et al., 1969). A capacidade das plantas para absorver e utilizar cálcio na presença de altas concentrações de alumínio, sem sinal de deficiência, também tem sido usada como indicação de tolerância à toxidez de alumínio (Foy, 1974). O cálcio é um elemento indispensável à planta, o qual age como regulador da integridade e da seletividade da membrana celular (Malavolta, 2006).

5. Metodologias para avaliação de cultivares tolerantes à toxidez de alumínio

5.1. Avaliação sob condições de campo

Recomenda-se utilizar dois níveis de saturação de alumínio: 60% ou 80%, nível alto, e 15%, nível não-tóxico, para a maioria das culturas (Olmos & Camargo, 1976).

Para classificação das cultivares, adota-se o seguinte critério:

$$AI_t = \frac{\text{Produção com baixo nível de Al} - \text{Produção com alto nível de Al}}{\text{Diferença entre saturação de Al na ausência e na presença de calcário no período da floração.}}$$

A produção das diferentes cultivares no nível alto de alumínio e seu correspondente AI_t são representados nos eixos X e Y do sistema de coordenadas cartesianas, respectivamente. Calculam-se, também, a média de produção sob alta saturação de alumínio e a média de AI_t . O diagrama é, então, dividido em quatro quadrantes, o que permite, portanto, separar quatro grupos de cultivares:

- Cultivares tolerantes e não-responsivas: produzem bem em altos níveis de alumínio, mas não respondem bem aos níveis crescentes de calagem.

- Cultivares tolerantes e responsivas: produzem bem em altos níveis de alumínio e respondem bem aos níveis crescentes de calagem.

- Cultivares susceptíveis e responsivas: produzem pouco em altos níveis de alumínio, mas respondem aos níveis crescentes de calagem.

- Cultivares susceptíveis e não-responsivas: produzem pouco em altos níveis de alumínio e não respondem aos níveis crescentes de calagem.

Evidentemente, as cultivares que se enquadrarem nos dois últimos grupos são eliminadas, por refletirem, possivelmente, a sua má adaptação às condições locais. Ferreira et al. (1986) utilizou essa metodologia com o objetivo de selecionar cultivares de arroz quanto à tolerância à toxidez de alumínio. O delineamento utilizado foi o de blocos ao acaso, em parcelas subdivididas, com três repetições. O autor utilizou dois níveis de saturação de alumínio (77% e 18%) nas parcelas e 30 cultivares de arroz nas subparcelas. Na Tabela 1, encontra-se a classificação das cultivares por grupo. Das 30 cultivares testadas, 15 apresentaram-se como tolerantes e não responsivas, cinco como tolerantes e responsivas, oito como sensíveis e responsivas e duas como sensíveis e não responsivas. Evidentemente, as cultivares classificadas como tolerantes e responsivas serão de maior interesse em um programa de melhoramento, por manterem a produção em altos níveis de alumínio e responderem a níveis crescentes de calagem.

Tabela 1. Avaliação de cultivares de arroz quanto à tolerância a níveis de alumínio no solo.

Cultivar ou linhagem	Produção de grãos em solo com baixo nível de Al (kg ha ⁻¹)	Produção de grãos em solo com alto nível de Al (kg ha ⁻¹)	Resposta a calcário (kg/% de saturação de Al)	Classificação ⁽¹⁾
CNA 4146	4.191	4.407	-3,66	TNR
GA 4216	3.951	4.029	-1,32	TNR
CNA 4154	3.901	3.942	-0,71	TNR
CNA 4146	3.875	4.125	-4,24	TNR
Lageado	3.616	3.501	1,95	TNR
CNA 4120	3.559	3.302	4,36	TNR
IAC 114	3.517	3.468	0,84	TNR
IAC 136	2.383	3.617	-3,95	TNR
IRAT 112	3.368	3.316	0,89	TNR
IAC 47	3.201	3.525	-5,49	TNR
CNA 4235	2.906	3.283	-6,38	TNR
CNA 791048	2.875	3.176	-5,10	TNR
CNA 4119	2.519	3.521	-16,99	TNR
GA 3488	3.990	3.659	5,60	TNR
GA 4160	3.437	3.125	5,79	TNR
GA 4172	4.383	3.472	15,45	TR
GA 4098	4.117	3.436	11,54	TR
GA 4141	4110	3.076	17,54	TR
CNA 4115	3.741	3.203	9,12	TR
Lebonnet	3.589	3.233	6,03	TR
Lebonnet	3.589	3.233	6,03	TR
IAC 164	3.788	2.792	16,88	SR
BR 1	3.750	2.670	18,30	SR
Salumpikit	3.675	3.025	12,39	SR
GA 4835	3.158	2.427	11,02	SR
GA 4834	2.834	1.608	20,77	SR
Labelle	2.588	2.237	5,95	SR
GA 4833	2.564	1.160	23,81	SR
GA 4193	2.309	547	29,86	SR
CNA 4123	3.188	3.016	2,91	SNR
CNA 4135	2.525	2.292	3,95	SNR

⁽¹⁾ TNR = tolerante e não responsiva; TR = tolerante e responsiva; SR = susceptível e responsiva; SNR = susceptível e não responsiva.

Fonte: Ferreira (1995).

5.2. Avaliação em casa de vegetação, com solo como substrato

Uma das tecnologias utilizadas em casa de vegetação para a avaliação do grau de tolerância ou de susceptibilidade de genótipos vegetais ao alumínio pode ser assim descrita: cada vaso é constituído pela sobreposição de cinco anéis de PVC rígido, de 10 cm de diâmetro e 5 cm de altura, unidos por fita adesiva, com uma placa de isopor no fundo e um anel de 2 cm de altura no topo, destinado à retenção da água de irrigação no vaso. Metade dos vasos recebe amostras de solo, sem nenhum tratamento, até 20 cm de altura, e na outra metade o solo é corrigido até à mesma altura. Nos vasos dos dois tratamentos, é colocada a camada superficial de solo, correspondente a 5 cm de altura; posteriormente, são adicionados calcário e fertilizante, tomando como base para o cálculo das quantidades de nutrientes apenas o peso de solo desta camada. Com esta metodologia, Silva (1983) identificou cultivares de sorgo tolerantes ou sensíveis à toxidez de alumínio, com base no aprofundamento do sistema radicular.

5.3. Avaliação em casa de vegetação, com solução nutritiva como substrato

No caso de arroz, as sementes são colocadas para germinar em rolos de papel especial para germinação, umedecidas com água destilada, e permanecem no germinador durante 70 horas, à temperatura de 25°C e umidade relativa de 100%, até a radícula alcançar, aproximadamente, 3 cm.

Posteriormente, plântulas uniformes, após a medição do comprimento inicial da raiz, crescem coletivamente durante dez dias, em caixas que contêm solução nutritiva com 20 mg L^{-1} de alumínio, as quais são mantidas em câmara de crescimento. Avalia-se, então, o comprimento da raiz, o peso da matéria seca da raiz e da parte aérea, o peso total e a altura da planta. Durante o período de crescimento, corrige-se diariamente o pH da solução nutritiva para 4,0, com adição de HCl ou de NaOH $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ (Ferreira et al., 1995).

Ferreira et al. (1986) utilizaram esta metodologia e a técnica multivariada baseada na função discriminante proposta por Anderson (1958), para identificar cultivares de arroz tolerantes à toxidez de alumínio. Nesse estudo, as cultivares Guaporé, IAC 25 e Guarani foram utilizadas como padrões representativos de genótipos tolerantes à toxidez de alumínio e as cultivares IAC 899, CNA 5600 e CNA5615, como padrões de sensibilidade. Na Tabela 2, é apresentada a classificação dos genótipos quanto à tolerância à toxidez de alumínio com as respectivas estimativas das funções discriminantes, segundo o método de Anderson (1958). Constatou-se que, entre os materiais estudados, apenas os genótipos IAC 47, Araguaia e CNA 4193 foram tolerantes à toxidez de alumínio, enquanto os demais foram sensíveis.

Ressalta-se que os genótipos classificados como tolerantes à toxidez de alumínio pertencem ao sistema de cultivo de arroz de sequeiro, em que predominam os solos classificados como Latossolos, caracteristicamente ácidos e com alta saturação de alumínio. Portanto, presume-se que, ao selecionar genótipos

produtivos nesse sistema de cultivo, os melhoristas, indiretamente, selecionaram materiais tolerantes à toxidez de alumínio. Já os genótipos classificados como sensíveis à toxidez de alumínio pertencem ao sistema de cultivo de arroz irrigado, cultivados predominantemente em solos férteis, com baixa acidez.

5.4. Método da hematoxilina

O princípio desse método de avaliação baseia-se na oxidação da hematoxilina para hemateína (por NaIO_3 , ou outros agentes oxidantes), que, em presença de íons metálicos (Cr, Fe ou Al), tem a propriedade de corar ácidos nucléicos (Gill et al., 1974). A coloração das radículas será mais intensa nos genótipos susceptíveis, pois maior quantidade de alumínio estará no interior das células (Martines, 1977).

Inicialmente, as plântulas permanecem em solução de alumínio durante 18 horas e, posteriormente, são lavadas durante 20 minutos em bandeja, com água desmineralizada. Em seguida, são colocadas em solução aquosa de hematoxilina, onde permanecem por 15 minutos, efetuando-se nova lavagem das plântulas em água desmineralizada durante 20 minutos. Após este período, avalia-se a porção terminal (1,5 cm) da radícula de cada plântula, por meio de uma escala de notas que varia de um (maior tolerância) a seis (menor tolerância), conforme a intensidade e a localização da região colorida (Fonseca Júnior, 1982).

Tabela 2. Classificação de genótipos de arroz quanto à tolerância à toxidez de alumínio, com as respectivas estimativas das funções discriminantes (média de quatro repetições), segundo a metodologia de Anderson (1958), na concentração de 20 mg L⁻¹ de alumínio.

Genótipo	D _s (x) ¹	D _r (x) ²	Classificação ³
CNA 5600	35,0518	-88,6494	S
CNA 5615	34,5668	-87,9278	S
CNA 5595	52,3807	-42,7106	S
CNA 5588	70,4776	-19,8087	S
CNA 5868	59,1349	-42,9353	S
CNA 5891	47,6899	-50,1193	S
IR 36	50,1409	-53,6496	S
IAC 47	103,9203	158,6701	T
GUAPORÉ	98,6638	215,9512	T
GUARANI	104,4920	2059565	T
BR IRGA 410	58,7632	31,2362	T
CICA 8	75,6848	14,9721	T
METICA 1	52,3185	-50,6501	S
BR 1	67,3195	20,7256	S
IAC 25	108,7926	250,3303	T
ARAGUAIA	86,0123	91,5224	T
BR IRGA 409	118,3658	62,5128	S
CNA 4193	95,7752	161,4512	T
IR 22	35,3887	-68,7086	S
IAC 899	35,3887	-68,7085	S

¹ D_s(x) = Estimativa da função discriminante susceptível

² D_r(x) = Estimativa da função discriminante resistente

³ T = Tolerante à toxidez de alumínio; S = Sensível à toxidez de alumínio.

Fonte: Ferreira et al. (1986).

6. Controle genético da tolerância à toxidez de alumínio

Os mecanismos de herança da tolerância à toxidez de alumínio têm sido estudados, em diversas culturas, e seus resultados às vezes têm sido conflitantes. O bom entendimento

do controle genético da tolerância à toxidez de alumínio é necessário para estabelecer a estratégia de melhoramento, ou para melhorar a eficiência dos métodos de melhoramento empregados, visando à solução da baixa produtividade em solos ácidos.

De maneira geral, poucos genes controlam a herança da tolerância de plantas à toxidez de alumínio. Reid (1970), por exemplo, identificou em cevada um gene dominante, que condiciona tolerância à toxidez de alumínio. Kerridge & Kronstad (1968), cruzando variedades de trigo tolerante (Druchamp) e sensível à toxidez de alumínio (Brevor), obtiveram na geração F₂ a taxa de segregação de três genótipos tolerantes para um sensível, o que indica, portanto, que nesta espécie a herança da tolerância à toxidez de alumínio é monogênica. Entretanto, eles especularam que genes adicionais controlam a tolerância à toxidez de alumínio, já que outras cultivares, como a Atlas 66, foram consideravelmente mais tolerantes do que a Druchamp. Quando fizeram somente um pré-tratamento com alumínio durante 48 horas, Moore et al. (1976) observaram que as cultivares de trigo avaliadas exibiam quatro classes distintas de tolerância à toxidez de alumínio e, baseados nas proporções fenotípicas observadas, propuseram que três genes controlam a herança da tolerância à toxidez de alumínio nesta espécie. Conseqüentemente, o melhoramento nesta espécie seria relativamente simples, se não fossem certas ligações que precisam ser quebradas antes que a tolerância possa ser efetivamente incorporada por técnicas de retrocruzamento em

variedades comerciais. Em geral, tem-se caracterizado que cultivares de trigo semi-anãs e com baixo teor de proteína na semente são geralmente sensíveis à toxidez de alumínio (Rhue, 1979).

Houve preocupação por parte de alguns pesquisadores com a localização dos genes que controlam o caráter de tolerância à toxidez de alumínio. Prestes et al. (1975) localizaram no cromossomo 5D da variedade de trigo Atlas 66 um gene que controla a resposta ao alumínio. Entretanto, Polle et al. (1978) localizaram um gene no cromossoma 4D na cultivar Chinese Spring. Também Sloodmaker (1974) atribuiu ao genoma D a tolerância à toxidez de alumínio, salientando que as espécies de trigo hexaplóides foram as mais tolerantes do gênero *Triticum*. Esse autor observou que a tolerância em triticales é proveniente do genoma do centeio.

Rhue et al. (1978) mostraram que o milho, em solução nutritiva, exibe larga faixa de tolerância à toxidez de alumínio. Entretanto, os produtos da geração F₂ obtidos com base no cruzamento de linhas com diferentes graus de tolerância mostraram classes distintas de tolerância em proporções típicas de um gene (3:1). Estes resultados sugeriram que, nesta espécie, a tolerância à toxidez de alumínio pode ser controlada por um simples loco com uma série de alelos múltiplos. Esses pesquisadores também não encontraram efeito maternal nos híbridos recíprocos da geração F₁.

Silva (1979), usando linhagens brasileiras para análise genética de tolerância, concluiu que a tolerância em milho é

controlada por um único gene dominante, com possíveis alterações por modificadores. Galvão & Silva (1978) estimaram os componentes da variância genética da tolerância à toxidez de alumínio, em população de milho, e concluíram que a variância atribuída aos desvios da dominância foi o componente mais importante da variabilidade genética. Magnavaca (1982), avaliando a tolerância à toxidez de alumínio em gerações F_1 e F_2 e em plantas resultantes de retrocruzamentos, derivados de cruzamentos entre linhagens de milho tolerantes e não-tolerantes, observou que os efeitos genéticos aditivos explicaram melhor a variação genética do que os efeitos de dominância, embora estes tenham também sido estatisticamente significativos. Os efeitos de epistasia foram pequenos, quando comparados com outros efeitos genéticos. A distribuição de frequência das plantas da geração F_2 foi contínua, unimodal e típica de herança quantitativa, com a tendência geral de a sensibilidade ser dominante sobre a tolerância.

Em arroz, Cutrim (1979) observou que a tolerância à toxidez de alumínio comportou-se como caráter quantitativo. A soma de quadrados de genótipos foi decomposta em capacidade geral e capacidade específica de combinação e foi observado que a variância associada aos efeitos da capacidade específica é mais importante do que a associada aos efeitos da capacidade geral de combinação, evidenciando, assim, maior variabilidade genética não-aditiva.

Moda-Cirino (1987) utilizou 14 variedades de arroz de sequeiro para estudos da herança da tolerância à toxidez de alumínio. Os resultados obtidos não revelaram a presença de efeito citoplasmático na herança do caráter. A segregação observada nas populações F_2 , provenientes de cruzamentos entre variedades com diferentes reações à toxidez de alumínio, foi contínua e típica de caráter quantitativo, o que evidencia que um número relativamente elevado de genes deve estar envolvido no controle do caráter. Observou-se também predominância de genes dominantes para tolerância, em relação à susceptibilidade. As estimativas dos componentes de médias e de variâncias revelaram a presença de efeitos genéticos aditivos, de dominância e interações não-alélicas do tipo aditivo x aditivo, havendo predominância dos efeitos aditivos sobre os demais.

Ferreira et al. (1995), por meio de um sistema de cruzamentos dialélicos, estudou a herança da tolerância à toxidez de alumínio em arroz, em solução nutritiva. Para o caráter do comprimento da raiz, principal indicador da tolerância à toxidez de alumínio, os efeitos da capacidade geral de combinação foram mais importantes, o que evidencia maior variabilidade genética aditiva. A herança da tolerância à toxidez de alumínio foi oligogênica, e os alelos dominantes determinavam essa tolerância. Os genótipos classificados como tolerantes à toxidez de alumínio pertencem ao sistema de cultivo de arroz de sequeiro e, os sensíveis, ao de irrigado.

7. Considerações finais

Dentro do tópico de agricultura sustentável, um ponto que deverá se tornar cada vez mais importante é a seleção de genótipos capazes de maximizar a eficiência de utilização dos insumos e minimizar o risco imposto pela combinação de diversas características restritivas do ambiente. Isto sinaliza na direção de um aumento dos programas de seleção para adaptação a estresses, tais como toxidez de alumínio, e de eficiência das plantas na utilização de nutrientes mesmo em solo com altos teores de Al trocável. Neste aspecto, o desenvolvimento e a otimização de múltiplos processos de avaliação de fatores de toxidez (Al, Mn, entre outros) e de fatores de eficiência nutricional (P, N, Ca, Mg, K, entre outros) devem acelerar o progresso nesta área (Paretoni et al., 2001).

O grande avanço na área de biologia molecular deve também causar impacto no entendimento dos mecanismos ligados à tolerância à toxidez de alumínio e, ainda, na compreensão dos processos que levam a maior eficiência do uso de nutrientes. Espera-se também progresso significativo na área de identificação e de manipulação de genes que controlam estas características (Paretoni et al., 2001).

8. Referência bibliográficas

ADAMS, F.; LUND, F. Effect of chemical activity of soil solution of aluminum on cotton root penetration of acid subsoils. **Soil Science**, v. 101, p. 193-198, 1966.

ANDERSON, T.W. **An introduction to multivariate statistical analysis**. New York: John Wiley, 1958. 374 p.

CLARCK, R. B.; BROWN, J. C. Differential phosphorus uptake by phosphorus-stressed corn inbreds. **Crop Science**, v. 14, p. 505-508, 1974.

CLARKSON, D. T. The effect of aluminium and some other trivalent metal cations on cell division in the root apices of *Allium cepa*. **Annals of Botany**, v. 25, p. 309-315, 1965.

CUTRIM, V. A. **Herança da tolerância à toxidez causada pelo alumínio em arroz (*Oryza sativa* L.)**. 1979. 67 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1979.

EVANS, C. E.; KAMPRATH, E. J. Lime response as related to percent Al saturation, solution Al, and organic matter content. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 34, p. 893-896, 1970.

FERREIRA, R. P. **Análises biométricas da tolerância do arroz (*oryza sativa* L.) à toxidez de alumínio**. 1995. 123 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

FERREIRA, R. P.; CRUZ, C. D.; SEDIYAMA, C. S.; FAGERIA, N. K. Identificação de cultivares de arroz tolerantes à toxidez de alumínio por técnica multivariada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, p. 789-795, 1995.

FERREIRA, R. P.; SALGADO, L. T.; JORGE, H. D. Tolerância de cultivares de arroz ao alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 21, p. 1257-1260, 1986.

FONSECA JUNIOR, N. S. **Estudo da herança da tolerância ao alumínio em soja (*Glycine max* L.) Merrill), pelo método de hematoxilina.** 1982. 46 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1982.

FOY, C. D. Effects of aluminum on plant growth. In: CARSON, E. W. (Ed.). **The plant root and its environment.** Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. p. 601-642.

FOY, C. D. General principles involved in screening plants for aluminum and maganese tolerance. In: WRIGHT, M. (Ed.). **Plant adaptation to mineral stress in problem soils.** New York: Cornell University, 1976. p. 65-72.

FOY, C. D.; BROWN, J. C. Toxic factors in acid soils: II. Differential aluminum tolerance of plant species. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 28, p. 27-32, 1964.

FOY, C. D.; CHANEY, R. L.; WHITE, M. C. The physiology of metal toxicity in plants. **Annual Review of Plant Physiology**, v. 29, p. 511-566, 1978.

FOY, C. D.; FLEMING, A. L.; ARMIGER, W. H. Aluminum tolerance of soybean varieties in relation to calcium nutrition. **Agronomy Journal**, v. 61, p. 505-511, 1969.

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, 1989. p. 73-87.

GALVANI, F. R. **Produção de ácidos orgânicos, açúcares e aminoácidos em raízes de dois cultivares de sorgo (*Sorghun bicolor*, L. Moench), submetidos a diferentes níveis de alumínio.** 1981. 34 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1981.

GALVÃO, J. D.; SILVA, J. C. Herança da tolerância ao alumínio na variedade de milho Piranão. **Revista Ceres**, v. 25, p. 71-78, 1978.

GILL, G. W.; FROST, J. K.; MILLER, K. A. A new formula for half-oxidized hematoxylin solution that neither overstain nor requires differentiation. **Acta Cytologica**, v. 18, p. 300-311, 1974.

GRIME, J. P.; HODGSON, J. G. An investigation of the ecological significance of lime-chlorosis by means of large-scale comparative experiments. In: RORISON, I. H. (Ed.). **Ecological aspects for the mineral nutrition of plants**. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1969. p. 76-99.

HENNING, S. J. **Aluminium toxicity in the primary meristem of wheat roots**. 1975. 118 p. Tese (Doutorado) – Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA, 1975.

JONES, L. H. Aluminium uptake toxicity in plants. **Plant and Soil**, v. 13, p. 297-314, 1961.

KERRIDGE, P. C.; KRONSTAD, W. E. Evidence of genetic resistance to aluminum toxicity in wheat. **Agronomy Journal**, v. 60, p. 710-718, 1968.

KESER, M.; NEUBAUER, B. F.; HUTCHINSON, F. E.; VERRIL, D. B. Differential aluminum tolerance of sugarbeet cultivars, as evidenced by anatomical structure. **Agronomy Journal**, v. 69, p. 347-350, 1977.

KLIMASHEVSKII, E. L.; DEDOV, V. M. Localization of mechanism of growth inhibiting action of Al^{3+} in elongating cell walls. **Soviet Plant Physiology**, v. 28, p. 1060-1066, 1976.

KLIMASHEVSKII, E. L.; MARKOVA, Y. A.; BERNATZKAYA, M. L.; MALYSHEVA, A. S. Physiological responses to aluminium toxicity in root zone of pea varieties. **Agrochimica**, v. 26, p. 487-496, 1972.

KLIMASHEVSKII, E. L.; MARKOVA, Y. A.; SEREGINA, M. L.; GRODZINSKII, D. M.; KOZARENKO, T. D. Specifics of the physiological activity of pea plants in connection with unequal resistance of different varieties to mobile aluminum. **Soil and Plant Physiology**, v. 17, p. 372-378, 1970.

KOCHIAN, L. V. Cellular mechanism of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 46, p. 237-260, 1995.

LANCE, J. C.; PEARSON, R. W. Effect of low concentrations of aluminum on growth and water nutrient uptake by cotton roots. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 33, p. 5-98, 1969.

LEMOS FILHO, J. P. **Efeito do alumínio sobre os teores de alguns elementos minerais, sobre a fotossíntese e sobre a atividade de certas oxidases em sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench)**. 1982. 46 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1982.

MAGISTAD, O. C. The aluminum content of the soil solution and its relation to soil reaction and plant growth. **Soil Science**, v. 20, p 281-225, 1925.

MAGNAVACA, R. **Genetic variability and inheritance of aluminum tolerance in maize (*Zea mays* L.)**. 1982. 135 p. Tese (Doutorado) – University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, USA, 1982.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Editora Ceres, 2006. 631 p.

MARTINES, C. P. **Aluminum toxicity studies in rice**. 1977. 113 p. Tese (Doutorado) – Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA, 1977.

MATSUMOTO, H.; HIRASAWA, E.; TORIKAY, H.; TAKASHI, E. Localization of absorbed aluminium in pea root and its binding to nucleic acids. **Plant Cell Physiology**, v. 17, p. 127-137, 1976.

MODA-CIRINO, V. **Análise genética da tolerância à toxidez de alumínio em arroz (*Oryza sativa* L.) de sequeiro**. 1987. 150 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 1987.

MOORE, D. P.; KRONSTAD, W. E.; METZGER, R. J. Screening wheat for aluminum tolerance. In: WRIGHT, M. J. (Ed.). **Plant adaptation to mineral stress in problem soils**. Itcha: Cornell University, 1976. p. 287-285.

MORIMURA, S.; MATSUMOTO, H. Effect of aluminum on some properties and template activity of purified pea DNA. **Plant Cell Physiology**, v. 19, p. 429-436, 1978.

MORRÉ, D. J.; JONES, D. D.; MOLLENHAVER, H. H. Golgi apparatus mediated polysaccharide secretion by outer root cap cells of *Zea mays*. I. Kinetics and secretory pathways. **Planta**, v. 74, p. 286-301, 1967.

MUGWIRA, L. M.; PATEL, S. U. Root zone pH changes and ion uptake imbalances by triticale, wheat and rice. **Agronomy Journal**, v. 69, p. 719-722, 1977.

MULLETE, K. J.; HANNON, N. J. Insoluble phosphorus usage by eucalyptus. **Plant Soil**, v. 41, p. 199-205, 1974.

OADES, J. M. Mucilages at the root surface. **Journal Soil Science**, v. 29, p. 1-16, 1978.

OLMOS, J. I. L.; CAMARGO, M. N. Ocorrência de alumínio tóxico nos solos do Brasil, sua caracterização e distribuição. **Ciência Cultura**, v. 21, n. 2, p. 171-180, 1976.

PARENTONI, S. N.; ALVES, V. M. C.; MILACH, S. K.; CANÇADO, G. M. A.; BAHIA FILHO, A. F. C. B. Melhoramento para tolerância ao alumínio como fator de adaptação a solos ácidos. In: NASS, L. L.; VALOIS, A. C. C.; MELO, I. S.; VALADARES-INGLIS, M. C. (Eds.). **Recursos genéticos & melhoramento**. Rondonópolis: Fundação Mato Grosso, 2001. p. 783-851.

POLLE, E; KONZAK, C. F.; KITRICK, J. A. **Rapid screening of wheat for tolerance to Al in breeding varieties better adapted to acid soils, stain method**. Washington, D.C.: Agency for International Development, 1978. 21 p. (Technical series bulletin, 21).

- PRESTES, A. M.; KONZAK, C. F.; HENDRIX, J. W. An improved seedling culture method for screening wheat for tolerance to toxic levels of aluminum. **Agronomy Abstracts**, Madison, 1975. 60 p.
- REID, D. A. Genetic control of reaction to aluminium in winter barley. In: MILAN, R. A. (Ed.). **Barley genetics II**. Pullman: Washington State University Press, 1970. p. 405-413.
- RHUE, R. D. Differential aluminium tolerance in plant. In: MUSSEL, H. & STAPLES, R. **Stress physiology in crop plants**. New York: Cornell University, 1979, p. 61-80.
- RHUE, R. D.; GROGAN, C. D.; STOCKMEYER, E. W.; EVERETT, H. L. Genetic control of aluminum tolerance in corn. **Crop Science**, v. 18, p. 1063-1067, 1978.
- SALVADOR, J. O.; MOREIRA, A.; MALAVOLTA, E.; CABRAL, C. P. Influência do alumínio no crescimento e na acumulação de nutrientes em mudas de goiabeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, n. 4, p. 787-796, 2000.
- SILVA, J. B. C. **Seleção de genótipos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e de soja (*Glicine max* (L.) Merrill) tolerantes à toxidez de alumínio**. 1983. 55 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1983.
- SILVA, W. J. Seleção de milho tolerante ao alumínio. In: REUNIÃO DA SOCIEDADE DE GENÉTICA, 13., 1979, Jaboticabal. **Anais...** Jaboticabal:UNESP, 1979. p. 107-113.
- SILVA, A. A. **Toxicidade de alumínio em trinta genótipos de *Panicum maximum* Jacq. cultivados em solução nutritiva**. Piracicaba: ESALQ-USP, 1997. 149 p.
- SIVAGURU, M.; PALIWAL, K. Differential aluminum tolerance in some tropical rice cultivars. II. Mechanism of aluminum tolerance. **Journal of Plant Nutrition**, v. 16, p. 1717-1732, 1993.

SLOOTMAKER, L. A. J. Tolerance to high acidity in wheat related species, rye and triticale. **Euphytica**, v. 23, p. 505-513, 1974.

WILKSON, H. F. **Nutrient movement in the vicinity of plant roots**. 1970. 98 p. Tese (Doutorado) – University of West Australia, Pearth, Australia, 1970.

WRIGHT, K.; NORTHCOTE, D. H. The relationship of root cap slime to pectins. **Biochemistry Journal**, Madison, v. 139, p. 525-534, 1974.