



Considerações Gerais sobre a Toxicidade do Alumínio nas Plantas

República Federativa do Brasil

Presidente: Fernando Henrique Cardoso

Ministério da Agricultura e do Abastecimento

Ministro: Arlindo Porto Neto

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)

Presidente: Alberto Duque Portugal

Diretores: Elza Ângela Battaggia Brito da Cunha
José Roberto Rodrigues Peres
Dante Daniel Giacomelli Scolari

Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Embrapa Solos)

Chefe Geral: Antônio Ramalho Filho

Chefe-Adjunto de P&D: Humberto Gonçalves dos Santos

Chefe-Adjunto de Apoio Técnico/Administração: Sérgio R. Franco Fagundes

Considerações Gerais sobre a Toxicidade do Alumínio nas Plantas

Pedro Luiz Oliveira de Almeida Machado



***Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Centro Nacional de Pesquisa de Solos
Ministério da Agricultura e do Abastecimento***

Embrapa Solos. Documentos n° 2

Projeto gráfico e tratamento editorial

Cecília Maria Pinto MacDowell

Sueli Limp Gonçalves

Revisão final

Paulo Augusto da Eira

Tiragem: 300 exemplares

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1.024

22460-000 Rio de Janeiro, RJ

Tel: (021) 274-4999

Fax: (021) 274-5291

Telex: (021) 23824

E-mail: cnpsolos@cnps.embrapa.br

Site: <http://www.cnps.embrapa.br>

Catálogo-na-publicação (CIP)

Centro Nacional de Pesquisa de Solos da Embrapa

Machado, Pedro Luiz Oliveira de Almeida.

Considerações gerais sobre a toxicidade do alumínio nas plantas /
Pedro Luiz Oliveira de Almeida Machado – Rio de Janeiro : EMBRAPA-
CNPS, 1997.

22p. (EMBRAPA-CNPS. Documentos ; 2).

ISSN 1414-8153

1. Alumínio no solo. 2. Planta-Toxicidade. I. Título. II. Série.

CDD (21.ed.) 631.422

© Embrapa - 1997

SUMÁRIO

- 1 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO ALUMÍNIO • 1**
- 2 CONDIÇÕES PARA A OCORRÊNCIA DE TOXICIDADE DE ALUMÍNIO EM PLANTAS • 4**
- 3 MECANISMOS DA TOXICIDADE DE ALUMÍNIO EM PLANTAS • 5**
 - 3.1 Alterações na membrana das células da raiz • 8**
 - 3.2 Inibição da síntese de DNA e da divisão celular • 8**
 - 3.3 Inibição do alongamento celular • 10**
 - 3.4 Alterações na absorção de nutrientes e no balanço nutricional • 11**
 - 3.5 Efeito sobre a simbiose rizóbio/leguminosa • 13**
- 4 EFEITOS BENÉFICOS DO ALUMÍNIO PARA AS PLANTAS • 14**
- 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS • 15**

1 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO ALUMÍNIO

O alumínio (Al) é considerado como o terceiro elemento químico mais freqüente na crosta terrestre, onde compreende aproximadamente 7,1% (Lindsay, 1979). Os minerais de argila primários e secundários são, em grande parte, estruturalmente formados por Al_2O_3 , juntamente com SiO_2 .

Devido à sua baixa solubilidade, os teores de alumínio no lençol freático atingem geralmente alguns centésimos ou décimos de mg/l (Matthess, 1983). Entretanto, com o processo de acidificação dos solos, onde o pH (em H_2O) atinge valores inferiores a 5,0, há um aumento na dissolução de óxidos ou hidróxidos de Al (Scheffer & Schachtschabel, 1989). A crescente dissolução dos componentes contendo Al demanda uma atenção especial para o comportamento químico do $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$, ou simplesmente Al^{3+} . Tal estudo é, de certa forma, complicado e, por ser um cátion com configuração de gás nobre e alta densidade de carga positiva, o Al^{3+} em soluções aquosas exige flúor e oxigênio como átomos ligantes. Uma reação deste tipo com ligantes é entendida como substituta das moléculas de água do complexo aquoso (Dietze, 1985). A dificuldade reside no fato de que, juntamente com o equilíbrio de hidrólise, que proporciona a formação de cátions hidróxidos na fase solúvel (Nair, 1978), outros equilíbrios devem ser levados em consideração, dependendo do tipo do contra-íon. Isto é o que normalmente ocorre na solução do solo, pois, no sentido químico clássico, não se trata de um sistema simples com um ou dois tipos de íons, mas sim, de um sistema multivariado, no qual a apresentação dos possíveis equilíbrios entre os componentes iônicos e a constituição da solução do solo daí resultante pode ser bastante confusa (Dietze, 1985). Fluoreto, fosfato e sulfato são considerados importantes ânions inorgânicos que, dependendo de suas concentrações e dos valores de

pH, influenciam decisivamente na solubilidade e deslocamento do Al^{3+} . Segundo Lindsay (1978), os íons fluoreto podem formar fortes complexos com alumínio e, apesar das concentrações de F^- em solos não cultivados serem, em geral, baixas, com adubações freqüentes de superfosfato simples em lavouras, o F^- , que está presente neste adubo como impureza, pode ter participação significativa na complexação do Al. Complexos com sulfato podem ser bastante importantes em soluções ácidas contendo alto teor de SO_4^{2-} (Hem & Robertson, 1967). Por outro lado, a formação de complexos com íons nitrato e cloreto é insignificante.

Ritchie (1989) adverte para o fato de que muitos estudos de complexação de Al foram conduzidos em soluções aquosas puras e que a aplicação direta desses resultados para o ambiente solo deve ser bastante limitada pela complexa e intrincada composição da solução do solo. Como exemplo, em alguns estudos de solução (Hsu, 1968; Adams & Hajek, 1978; Singh, 1982) utilizaram-se concentrações muito altas de alumínio ($> 1.000 \mu\text{M}$). Dados de Kamprath (1978), Adams & Moore (1983) e Curtin & Smillie (1983) demonstram que a concentração total de alumínio na solução do solo está normalmente na faixa de 10-350 μM . Níveis acima de 1.000 μM podem ocorrer em algumas situações como em solos ácidos sulfatados.

A solubilidade e o deslocamento do Al também podem ser fortemente influenciados pela presença de complexantes orgânicos naturais do solo como ácido cítrico, ácido oxálico, ácidos húmicos (Tan & Binger, 1986; Miyazawa et al., 1992) e, principalmente, pelos ácidos fúlvicos (Schnitzer, 1969), por apresentarem, em relação aos ácidos húmicos, maior quantidade de grupos funcionais (por exemplo, COOH -) e maiores valores de constante de estabilidade (Stevenson, 1982). São freqüentes os casos de modelos de equilíbrio químico que predizem

concentrações excessivas de Al^{3+} , por não considerarem a presença de complexantes orgânicos. Alguns trabalhos de experimentação em modelos simuladores já demonstraram que materiais orgânicos dissolvidos na solução do solo têm participação no deslocamento geoquímico do Al (Huang & Keller, 1972; Lind & Hem, 1975; Tan, 1980). Bertsch et al. (1981) e Grigg & Morrison (1982) observaram, através de métodos colorimétricos, a formação de complexos orgânicos de Al em extratos do solo. Complexos orgânicos podem influenciar na toxicidade do Al para as plantas. Pavan (1981) correlacionou o crescimento radicular do cafeeiro com os teores de Al trocável extraído com uma solução de KCl 1 N de vários solos ácidos do Paraná. O valor crítico de Al trocável que afetou negativamente o cafeeiro variou de 0,19 meq/100 g para um Podzólico Vermelho Amarelo a 1,30 meq/100 g para um Latossolo Roxo distrófico. Para os solos orgânicos, o valor crítico do alumínio trocável que afetou o sistema radicular do cafeeiro foi 3,52 meq/100 g. Segundo o mesmo autor, o aumento no teor de matéria orgânica no solo tendeu a amenizar os efeitos tóxicos dos íons de Al.

2 CONDIÇÕES PARA A OCORRÊNCIA DE TOXICIDADE DE ALUMÍNIO EM PLANTAS

De maneira geral, valores de pH (em H₂O) do solo abaixo de 5,5 já podem condicionar graves problemas de toxicidade de alumínio para as plantas. Entretanto, dependendo do tipo de ligante inorgânico e orgânico, o alumínio pode ser mais ou menos tóxico (Kinraide, 1991). Kinraide (1991) observou que $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ não causava toxicidade em plântulas de trigo e trevo vermelho. Neste mesmo estudo, atribuiu-se a toxicidade ao Al_{13} ou $\text{AlO}_4\text{Al}_{12}(\text{OH})_{24}(\text{H}_2\text{O})_{12}^{7+}$, denominado *triskaidekaaluminium*. Kinraide & Parker (1987) constataram que AlSO_4^+ não era tóxico para aquelas plântulas anteriormente citadas, ou, no mínimo, dez vezes menos tóxico que Al^{3+} . As prováveis explicações sugeridas por Kinraide (1991) para este comportamento tóxico diferenciado das formas de Al seriam:

- formas policatiônicas de Al são tóxicas para as raízes e os ligantes diminuem a toxicidade pela redução de carga; e
- as diferentes toxicidades das formas de Al simplesmente refletem suas atividades nas superfícies celulares negativamente carregadas. O “efeito concentrador” de carga negativa, que pode tomar lugar tanto na parede celular como na membrana plasmática, é maior para cátions mais carregados, como o Al^{3+} .

Importante destacar que o comportamento químico variado do alumínio sob diferentes formas nos solos e a complexidade de suas reações na solução do solo, associados ao fato das espécies de plantas e variedades de plantas dentro das espécies poderem reagir com maior ou menor tolerância à presença do alumínio, tornam difícil o desenvolvimento de um método de análise capaz de medir o alumínio que efetivamente limita o crescimento das plantas (Ritchie, 1989).

3 MECANISMOS DA TOXICIDADE DE ALUMÍNIO EM PLANTAS

Um grande número de observações experimentais indica que a ação tóxica do alumínio é, por excelência, um fenômeno que ocorre no sistema radicular, que poderia ser sintetizado da seguinte maneira:

- as diminuições no alongamento radicular são os primeiros sintomas de toxicidade observáveis;
- a produção de biomassa radicular é normalmente mais sensível à toxicidade do Al que a produção de biomassa da parte aérea; e
- uma correlação entre o suprimento de Al e seu acúmulo na parte aérea não pode ser generalizada para todas as plantas afetadas pelo metal.

Apesar dos numerosos trabalhos, os mecanismos fisiológicos dos efeitos tóxicos do Al no crescimento da raiz não estão ainda totalmente elucidados.

As ações fisiológicas e bioquímicas do alumínio na planta têm sido observadas por vários autores (Wright, 1943; Rees & Sidrak, 1961; Naidoo et al., 1978; Zhao et al., 1987; Mcquattie & Schier, 1990) e os mecanismos pelos quais o alumínio afeta as funções celulares podem ser resumidos da seguinte maneira:

- alterações na membrana das células da raiz;
- inibição da síntese de DNA e da divisão celular;
- inibição do alongamento celular;
- alterações na absorção de nutrientes e no balanço nutricional;
- efeito sobre a simbiose rizóbio/leguminosa.

Para que se possa entender as ações tóxicas do alumínio nas plantas, é importante o entendimento do processo de absorção de íons pelas raízes.

Solutos de baixo peso molecular (por exemplo, íons, ácidos orgânicos e aminoácidos), que se movimentam por difusão ou fluxo de massa, podem não apenas alcançar a superfície externa das raízes (rizoderme), mas também as paredes celulares e os espaços intercelulares do córtex preenchidos por água, atingindo até a endoderme (Marschner, 1990).

O transporte no apoplasto se dá mais por difusão que por fluxo massal. Em relação ao solo, as possibilidades de difusão na região da parede celular (ou apoplasto) são mais reduzidas. Os íons, incluindo os nutrientes para as plantas, que, a partir da solução do solo, penetram nas raízes chegam primeiramente no apoplasto do córtex, sendo barrados pelo plasmalema do parênquima do córtex e pela endoderme do cilindro central. Esta barreira é bem caracterizada na endoderme, que possui paredes celulares com forte camada de resina lipídica denominadas Estrias de Caspary (Figura 1).

Ao contrário dos nutrientes minerais e dos solutos de baixo peso molecular, os solutos de alto peso molecular (por exemplo, quelatos metálicos e ácidos fúlvicos) ou vírus e outros patógenos dificilmente penetram no espaço livre das células das raízes devido ao diâmetro dos poros, que, para eles, é muito estreito.

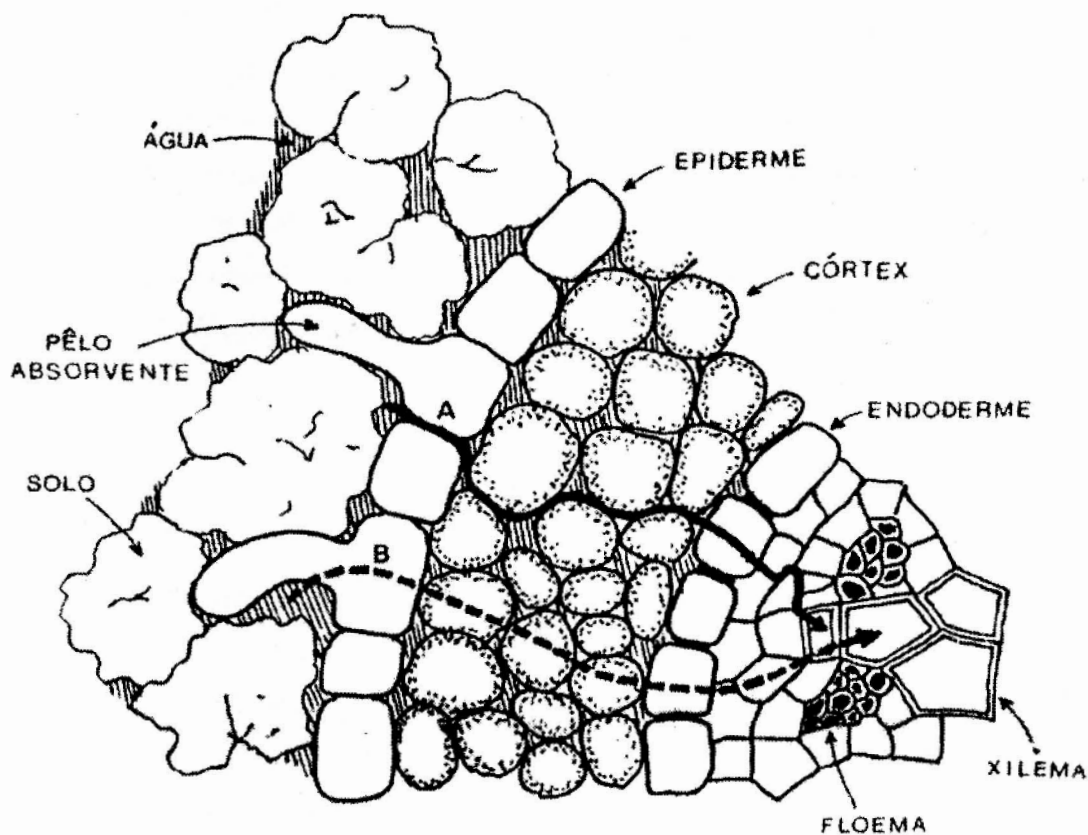


Figura 1. Esquema de corte de raiz, indicando o movimento de água do solo para o xilema. (A) através das paredes celulares (apoplasto); (B) através do protoplasma (simplasto). As bandas mais escuras entre as células da endoderme constituem as Estrias de Caspary (Ferri, 1979).

Uma proporção variável das pectinas é constituída por ácidos poligalacturônicos originados principalmente na lamela média. Assim, no Espaço Livre Aparente das raízes, os grupos carboxílicos ($R-COO^-$) atuam como trocadores de cátions. Cátions podem se acumular num processo não-metabólico no Espaço Livre, ao passo que os ânions são repelidos (Marschner, 1990). O Espaço Livre Aparente é constituído pelo Espaço Livre Aquoso, que é facilmente acessado por íons, e pelo Espaço Livre

de Donnan, onde a troca catiônica e a repulsão aniônica tomam lugar. Estes grupos carboxílicos ou ânions indifusíveis do apoplasto retêm Ca^{2+} e, em menor proporção, Mg^{2+} e H^+ . O alumínio também pode ser retido nestes grupos funcionais para, em seguida, ser transportado para o citoplasma. É exatamente neste local que se observa uma das ações fitotóxicas do alumínio, que é a inibição da absorção de Mg^{2+} por meio da competição por grupos funcionais na raiz. Entretanto, esta competição com o Al^{3+} não foi totalmente elucidada (Rengel & Elliot, 1992; Huang et al., 1992; Ryan et al., 1994).

3.1 Alterações na membrana das células da raiz

As membranas celulares da raiz são tidas como os locais onde ocorrem as lesões primárias de toxicidade por Al^{3+} . Segundo Zhao et al. (1987), o Al^{3+} pode alterar as propriedades da membrana plasmática e vacuolar resultando, assim, numa diminuição da permeabilidade para a água. Outros sintomas da ação tóxica do Al são a perda de camadas celulares periféricas e degeneração do citoplasma (McQuattie & Schier, 1990).

3.2 Inibição da síntese de DNA e da divisão celular

A ação tóxica do Al também pode se dar pela inibição direta da divisão celular (Naidoo et al., 1978; Wallace & Anderson, 1984), onde secções da dupla hélice de DNA são capturadas por polímeros de Al, através da forte ligação entre fosfato com carga negativa e a carga positiva do polímero (Figura 2). Horst et al. (1982) constataram que a divisão celular de radículas de feijão-de-porco é praticamente interrompida cinco horas após a presença do alumínio.

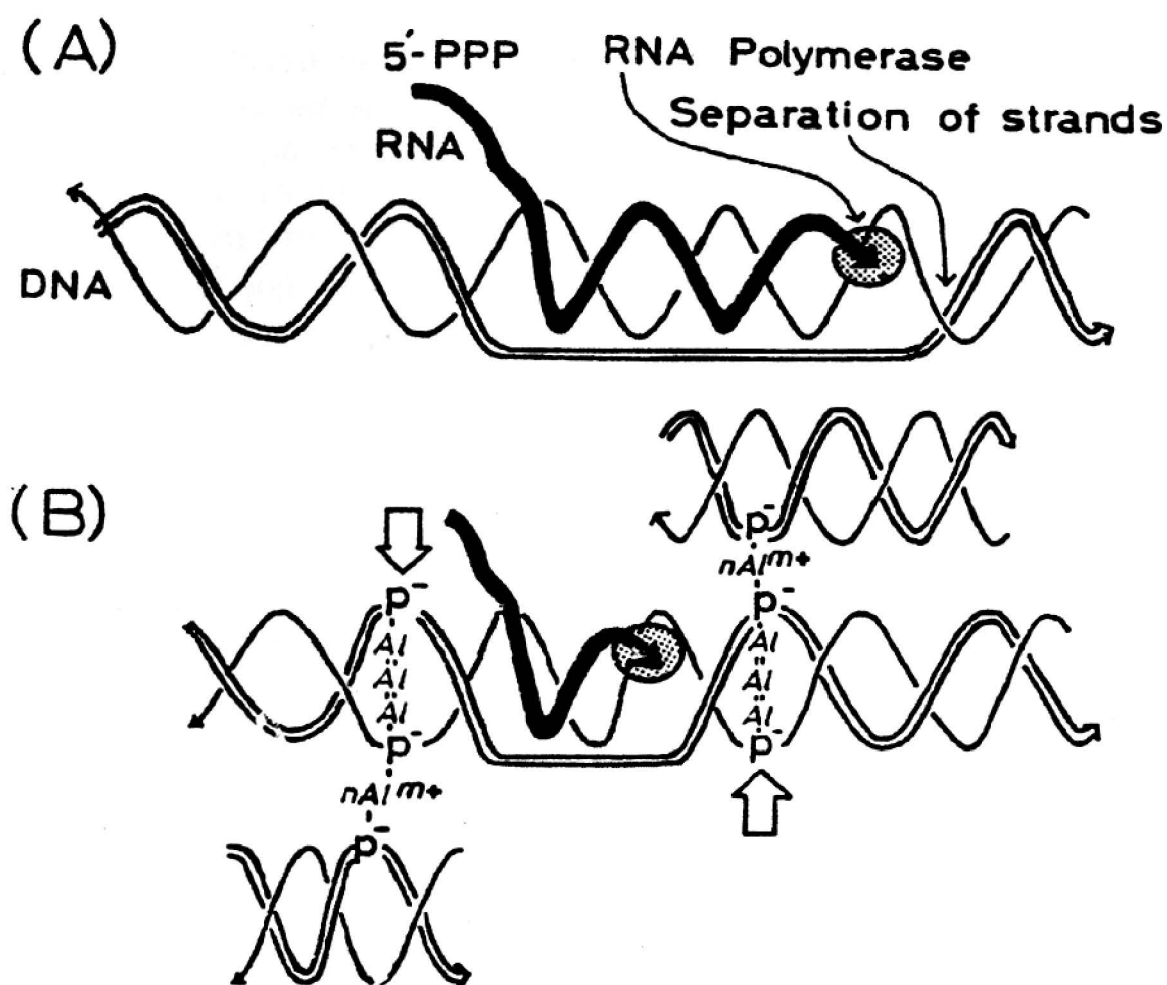


Figura 2. Provável mecanismo da inibição da transcrição do RNA pelo Al. (A) Transcrição normal do RNA numa hélice de seu DNA modelo. Uma pequena secção da dupla hélice deve abrir; assim, apenas a hélice ativa deve atuar como modelo. (B) A transcrição é inibida pela presença do alumínio. Secções da dupla hélice (indicadas por duas setas) são capturadas por polímeros variáveis de Al (indicados como "Al=Al=Al"), através da forte ligação entre fosfatos com carga negativa e a carga positiva dos polímeros de Al (Matsumoto & Morimura, 1980).

3.3 Inibição do alongamento celular

A inibição do alongamento celular pode ser devido ao resultado de, pelo menos em parte, alterações nas células da coifa, que agem como sensores do estresse ambiental (Marschner, 1991). Estas alterações são conseqüências do alto acúmulo de Al no núcleo das células, conforme foi observado por Naidoo et al. (1978) utilizando a técnica de microanálise por raios X. Há casos em que a redução no comprimento das raízes parece ser acompanhado por um aumento no diâmetro. Este fenômeno, entretanto, não compensa a diminuição da área superficial das raízes, que é funcionalmente mais importante que a massa radicular.

Sob concentrações baixas de Al, novas raízes podem surgir imediatamente antes da coifa, indicando interrupção da dominância apical, mas concentrações crescentes de Al podem tornar uma planta incapaz de desenvolver raízes laterais.

Rost-Siebert (1984) descreveu os seguintes estágios de alteração em raízes de faia (*Fagus sylvatica*) e abeto (*Picea abies*) expostas ao alumínio:

- **estágio 0** - desenvolvimento normal, sem presença de danos;
- **estágio 1** - raízes primárias da coifa apresentam-se alteradas ou mortas. Entretanto, as plantas são capazes de desenvolver novas raízes a partir de regiões com tecidos intactos, onde normalmente o surgimento de raízes laterais é suprimido pela dominância apical;
- **estágio 2** - raízes da coifa apresentam-se necróticas e inchadas. A rizoderme se desintegra e o córtex pode ser facilmente removido do cilindro central. Um grande número de raízes laterais curtas pode eventualmente surgir;
- **estágio 3** - as raízes já estão mortas. Apresentam-se necróticas e com coloração parda. Nenhuma raiz lateral surge.

3.4 Alterações na absorção de nutrientes e no balanço nutricional

Num trabalho de revisão, Foy (1974) afirmou que muitos pesquisadores associavam a toxicidade do Al com a diminuição na absorção de vários nutrientes, especialmente Ca e P. Entretanto, não se sabia exatamente se estes efeitos estavam intimamente associados ao mecanismo da toxicidade propriamente dita ou se eram meras conseqüências de um distúrbio anterior ocorrido ao nível celular. Segundo Taylor (1989), a hipótese de que os efeitos tóxicos do Al sejam um resultado de deficiências nutricionais induzidas tem sido muito criticada, pois a toxicidade do metal é diminuída de modo não específico pelo fosfato, Ca, Mg ou simplesmente pela força iônica. Além disto, tais deficiências não explicam efeitos tóxicos rápidos do Al. As deficiências minerais induzidas pelo alumínio não são injúrias diretas, mas antes, o resultado secundário de outro dano, ocorrido na membrana plasmática.

Os efeitos do alumínio na nutrição mineral de plantas dependem, além das condições experimentais, da cultura e do nutriente envolvidos no estudo.

O Al pode afetar a absorção de fósforo diretamente pela precipitação de fosfato de Al na superfície da raiz (Gerzabek & Edelbauer, 1986) ou no Espaço Livre Aparente (Wright, 1943; Foy, 1974; Calbo & Cambraia, 1980), impedindo-o de participar de processos de transferência de energia. Gerzabek & Edelbauer (1986) encontraram precipitados de $AlPO_4$ na superfície das raízes de milho sob forma de mucilagem.

Entretanto, Horst & Goeppel (1986), em estudos com tremço, cevada, feijão, fava e centeio, e Tan & Keltjens (1990a, 1990b), em sorgo, não constataram nenhum efeito do Al na absorção de fósforo. Aliás, a presença de Al chegou a favorecer um aumento na absorção desse nutriente pela cultura do sorgo (Duncan et al., 1980). Conseqüentemente, os efeitos do Al na absorção de fósforo são ainda bastante variáveis.

Devido à competição catiônica por sítios de troca na raiz, a presença do alumínio pode inibir a absorção de cálcio e magnésio, onde

as relações molares entre Ca:Mg e Mg:Al no solo são consideradas como parâmetros mais adequados para predizer a deficiência de Ca ou Mg induzida pelo Al do que a concentração individual do elemento químico (Wright et al., 1987; Marschner, 1991). Marschner (1991), numa revisão sobre mecanismos de adaptação de plantas a solos ácidos, descreve um exemplo que ilustra a situação anterior, onde se tem deficiência de Mg em soja induzida pela presença de Al. O autor considera que, embora concentrações crescentes de Al causassem diminuição nas concentrações de Mg nas raízes e na parte aérea, o efeito do alumínio na diminuição do crescimento foi evitado sob altos níveis de Mg^{2+} , pois os teores de magnésio nas raízes e na parte aérea permaneceram acima do nível crítico de deficiência. Por outro lado, segundo o mesmo autor, o cálcio é mais fortemente adsorvido no apoplasto e, assim, mais difícil de ser deslocado pelo Al^{n+} do que o Mg^{2+} . Além disto, o caminho preferencial do Ca^{2+} no transporte radial é via apoplasto nas regiões radiculares apicais e basais, onde as raízes laterais atingem o córtex. Sabendo-se que a via apoplasto também propicia sítios preferenciais para a absorção de água, então a inibição causada pelo Al^{n+} na absorção e transporte de Ca^{2+} e água para a parte aérea depende, em parte, dos efeitos do Al^{n+} no crescimento e morfologia da raiz. A inibição do acúmulo de Ca^{2+} no apoplasto pode ser compensada pela formação de raízes laterais, que é induzida pelo Al, ou seja, mais sítios de adsorção de Ca^{2+} e transporte radial para a parte aérea. Entretanto, como já foi discutido anteriormente no item 3.3, concentrações crescentes de Al tornam uma planta incapaz de desenvolver raízes laterais.

Quanto ao potássio, há uma indefinição quanto ao efeito do Al na absorção de K^+ pelas plantas. Enquanto alguns autores observaram uma diminuição na concentração de potássio em arroz (Fageria & Carvalho, 1982) e trigo (Ohki, 1985), outros constataram aumento em sorgo (Duncan et al., 1980) e *Trifolium repens* (Lee & Pritchard, 1984) ou nenhum efeito definido em milho (Machado & Gerzabek, 1991). Entretanto, segundo Rengel & Robinson (1989), o uso de valores de concentração de nutrientes pode não ser adequado porque teores elevados de K podem ser devido à menor diluição no tecido vegetal causado pelos efeitos deletérios do Al no crescimento da planta. Assim, o uso de Valores de Influxo Líquido (do inglês: "net influx") de K, como

uma medida dos efeitos do Al na absorção de potássio pela planta, parece ser mais apropriado.

3.5 Efeito sobre a simbiose rizóbio/leguminosa

Face aos processos industriais caros e exigentes em energia envolvidos na produção de fertilizantes minerais nitrogenados (Felippe Junior et al., 1984), houve aumento no interesse científico e econômico na fixação biológica de nitrogênio (Siqueira & Franco, 1988; Cardoso et al., 1992). Neste contexto e considerando-se a grande concentração de alumínio em solos altamente intemperizados como os Latossolos, associada aos conhecidos efeitos fitotóxicos deste metal, não causa surpresa constatar a existência de número significativo de trabalhos sobre o efeito do Al na simbiose rizóbio/leguminosa. O alumínio pode diminuir a fixação biológica de nitrogênio através de danos diretos na planta hospedeira do rizóbio ou pela interferência nos vários estágios do processo de nodulação e fixação (Carvalho et al., 1982; Franco & Neves, 1992). Franco & Munns (1982) observaram a diminuição na nodulação de dois cultivares de feijoeiro em virtude do aumento da concentração de Al em solução nutritiva. O processo de infecção (Lie, 1969), assim como a necessária curvatura dos pêlos radiculares para a formação dos nódulos (Munns, 1968), é reduzido pela presença do Al. Entretanto, não há ainda observações de mecanismos mais específicos referentes à ação do Al na inibição destes processos. Acredita-se que, devido ao importante papel do cálcio na formação dos nódulos (Munns, 1970), a deficiência deste macronutriente condicionada pela presença do Al (ver item 3.4) pode ser a causa do distúrbio na formação de nódulos (Banath et al., 1966).

Num estudo conduzido com caupi (*Vigna unguiculata*) inoculado com *Bradyrhizobium*, os valores críticos de atividade de alumínio que causaram 10% de redução no número e peso de nódulos foram de 0,29 μM e 0,54 μM , respectivamente (Alva et al., 1990).

4 EFEITOS BENÉFICOS DO ALUMÍNIO PARA AS PLANTAS

Embora o alumínio seja normalmente considerado como um elemento tóxico para as plantas cultivadas, existem vários trabalhos que demonstram sua essencialidade para algumas plantas. Num experimento em vasos com a cultura do chá (*Camellia sinensis* L.), Chenery (1955) indicou a possibilidade do Al atuar como estimulante do crescimento de raízes. Segundo o mesmo autor, o chá absorve alumínio ao longo de seu ciclo e a concentração de Al nas folhas aumenta com a idade, onde as folhas mais velhas normalmente contêm 5.000 ppm de Al. Konishi (1990) constatou que, quando o alumínio foi aplicado na solução nutritiva contendo P, o crescimento do chá foi bastante estimulado pela melhor absorção e utilização do fósforo pela planta. Num experimento em solução nutritiva, Hacket (1962) constatou que sob baixa concentração de Al na solução (5 ppm) houve estímulo do crescimento da raiz de ervas e gramíneas, tais como: *Deschampsia flexuosa*, *Alocopercus pratensis*, *Festuca pratensis* e *Lolium perenne*.

Segundo Marschner (1990), sob certas condições e para espécies de plantas com alta tolerância ao alumínio, baixos níveis deste metal podem causar efeitos benéficos ao crescimento de plantas superiores. Entretanto, estes efeitos são considerados como exceção, onde a regra é o efeito negativo do alumínio no crescimento de plantas em solos de baixo pH.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, F.; HAJEK, B.F. Effects of solution sulfate, hydroxide and potassium concentrations on the crystalization of alunite, basaluminite and gibbsite from dilute aluminium solutions. **Soil Science**, Baltimore, v.126, n.3, p.169-173, Sept. 1978.
- ADAMS, F.; MOORE, B.L. Chemical factors affecting root growth in subsoil horizons of coastal plain soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.47, n.1, p.99-102, Jan./Feb. 1983.
- ALVA, A.K.; ASHER, C.J.; EDWARDS, D.J. Effects of solution pH, external calcium concentration, and aluminium activity on nodulation and early growth of cowpea. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v.41, p.359-365, 1990.
- BANATH, C.L.; GREENWOOD, E.A.N.; LONERAGAN, J.F. Effects of calcium deficiency on symbiotic nitrogen fixation. **Plant Physiology**, Rockville, v.41, p.760-763, 1966.
- BERTSCH, P.M.; ALLEY, M.M.; ELLMORE, T.L. Automated aluminum analysis with the aluminum method. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.45, n.3, p.666, May/June 1981.
- CALBO, A.G.; CAMBRAIA, J. Efeito do alumínio sobre a composição mineral de dois cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Revista Ceres**, Viçosa, v.27, n.152, p.369-378, jul./ago. 1980.
- CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. **Microbiologia do solo**. Campinas : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. 360p.
- CARVALHO, M.M. de; EDWARDS, D.G.; ASHER, C.J. Effects of aluminium on nodulation of two stylosanthes species grown in nutrient solution. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.64, n.2, p.141-152, 1982.
- CHENERY, E.M. A preliminary study of aluminium and the tea bush. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.6, p.174-200, 1955.

- CURTIN, D.; SMILLIE, G.W. Soil solution composition as affected by liming and incubation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.47, n.4, p.701-707, July/Aug. 1983.
- DIETZE, G. **Bindungsformen und Gleichgewichte von Aluminium im Sickerwasser saurer Boeden**. Goettingen : Georg-August Universitaet Goettingen, 1985. 118p. Ph.D. Thesis.
- DUNCAN, R.R.; DOBSON JR., J.W.; FISHER, C.D. Leaf elemental concentrations and grain yield of sorghum grown on an acid soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.11, n.7, p.699-708, 1980.
- FAGERIA, N.K.; CARVALHO, J.R.P. Influence of aluminum in nutrient solutions on chemical composition in upland rice cultivars. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.69, n.1, p.31-44, 1982.
- FELIPPE JUNIOR, G. de; SOCOLOWSKI, J.C.; FANTI, O.D.J. Considerações sobre as tecnologias e a evolução da indústria de fertilizantes nitrogenados. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1., 1984, Brasília. **Anais**. Brasília: EMBRAPA-DEP, 1984. p.21-72.
- FERRI, M.G. (Coord.). **Fisiologia vegetal**. São Paulo : EPU-EDUSP, 1979. v.1.
- 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.
- FRANCO, A.A.; MUNNS, D.N. Acidity and aluminum restraints on nodulation, nitrogen fixation, and growth of *Phaseolus vulgaris* in solution culture. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, n.2, p.296-301, Mar./Apr. 1982.

- FRANCO, A.A.; NEVES, M.C.P. Fatores limitantes à fixação biológica de nitrogênio. In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. (Coord.). **Microbiologia do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p.219-230.
- GERZABEK, M.H.; EDELBAUER, A. Aluminium-Toxizität bei Mais (*Zea mays*, L.). Einfluss des Aluminiums auf Substanzbildung und Nährstoffgehalt. **Die Bodenkultur**, Viena, v.37, p.309-319, 1986.
- GRIGG, J.L.; MORRISON, J.D. An automatic colorimetric determination aluminum in soil extracts using catechol violet. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.13, n.5, p.351-361, 1982.
- HACKET, C. Stimulative effects of aluminum on plant growth. **Nature**, London, v.195, n.4840, p.471-472, Aug. 1962.
- HEM, J.D.; ROBERTSON, C.E. **Form and stability of aluminum hydroxide complexes in dilute solution**. Washington : United States Geological Survey, 1967. (Water Supply Paper, 1827-A).
- HORST, W.J.; GOEPPEL, H. Aluminium Toleranz von Ackerbohne (*Vicia faba*), Lupine (*Lupinus luteus*), Gerste (*Hordeum vulgare*) und Roggen (*Secale cereale*): II. Mineralstoffgehalte in Spross und Wurzeln in Abhängigkeit vom Aluminium-Angebot. **Zeitschrift fuer Pflanzenernaehrung und Bodenkunde**, Weinheim, v.149, p.94-109, 1986.
- HORST, W.J.; WAGNER, A.; MARSCHNER, H. Mucilage protects root meristems from aluminum injury. **Zeitschrift fuer Pflanzenphysiologie**, Stuttgart, v.105, p.435-444, 1982.
- HSU, P.H. **Interaction between aluminum and phosphate in aqueous solution: trace inorganics in water**. Washington : American Chemical Society, 1968. (Advances in Chemistry Series, 73).

- HUANG, J.W.; SHAFF, J.E.; GRUNES, D.L.; KOCHIAN, L.V. Aluminium effects on calcium fluxes at the root apex of aluminum-tolerant and aluminum-sensitive wheat cultivars. **Plant Physiology**, Rockville, v.98, p.230-237, 1992.
- HUANG, W.H.; KELLER, W.D. Geochemical mechanics for the dissolution, transport, and deposition of aluminum in the zone of weathering. **Clays and Clay Minerals**, Evergreen, v.20, n.1, p.69-74, 1972.
- KAMPRATH, E.J. Lime in relation to Al toxicity in tropical soils. In: ANDREW, C.S.; KAMPRATH, E.J. (Eds.). **Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils**. Melbourne : CSIRO, 1978. p.233-245.
- KINRAIDE, T.B. Identity of rhizotoxic aluminium species. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.134, n.1, p.167-178, July 1991.
- KINRAIDE, T.B.; PARKER, D.R. Non-phytotoxicity of aluminum sulfate ion, $AlSO_4^+$. **Physiologia Plantarum**, Copenhagen, v.71, p.207-212, 1987.
- KONISHI, S. Stimulatory effects of aluminium on tea plant growth. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 14., 1990, Kyoto. **Transactions**. Kyoto: ISSS, 1990. v.4, p.164-169. Trabalho apresentado na seção "New Aspects of Essential and Beneficial Elements in Plant Nutrition".
- LEE, J.; PRITCHARD, M.W. Aluminium toxicity expression on nutrient uptake, growth and root morphology of *Trifolium repens*, L. cv. "Grasslands Huia". **Plant and Soil**, Dordrecht, v.82, n.1, p.101-116, 1984.
- LIE, T.A. Effects of low pH on different phases of nodule formation in pea plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.31, p.391-406, 1969.

- LIND, C.J.; HEM, J.D. **Effects of organic solutes on chemical reactions of aluminum**. Washington : Unites States Geological Survey, 1975. (Water Supply Paper, 1827-G).
- LINDSAY, W.L. **Chemical equilibria in soils**. New York : Wiley-Interscience, 1979. 499p.
- LINDSAY, W.L. Chemical reactions affecting the availability of micro-nutrients in soils. In: ANDREW, C.S.; KAMPRATH, E.J. (Ed.). **Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils**. Melbourne : CSIRO, 1978. p.153-167.
- MACHADO, P.L.O. de A.; GERZABEK, M.H. Ueber den Einfluss der organischen Substanz auf die Aluminiumtoxizitaet bei Mais (*Zea mays*, L.). **Die Bodenkultur**, Viena, v.42, p.307-317, 1991.
- McQUATTIE, C.J.; SCHIER, G.A. Response of red spruce seedlings to aluminum toxicity in nutrient solution: alterations in root anatomy. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.20, p.1001-1011, 1990.
- MARSCHNER, H. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.134, n.1, p.1-20, July 1991.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London : Academic, 1990. 674p.
- MATSUMOTO, H.; MORIMURA, S. Repressed template activity of chromatin of pea roots treated by aluminium. **Plant and Cell Physiology**, Kyoto, v.21, p.951-959, 1980.
- MATTHESS, G. **Lehrbuch der Hydrogeologie**: Die Beschaffenheit des Grundwassers. Berlin : Gebr. Borntraeger, 1983. v.2.
- MIYAZAWA, M.; CHIERICE, G.O.; PAVAN, M.A. Amenização da toxicidade de alumínio às raízes do trigo pela complexação com ácidos orgânicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, n.2, p.209-215, maio/ago. 1992.

- MUNNS, D.N. Nodulation of *Mendicago sativa* in solution culture: I. Acid-sensitive steps. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.28, p.129-146, Feb. 1968.
- MUNNS, D.N. Nodulation of *Mendicago sativa* in solution culture: V. Calcium and pH requirements during infection. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.32, p.90-102, 1970.
- NAIDOO, G.; STEWART, J. McD.; LEWIS, R.J. Accumulation sites of Al in snapbean and cotton roots. **Agronomy Journal**, Madison, v.70, n.3, p.489-492, May/June 1978.
- NAIR, V.D.P. Aluminium species in soil solutions. **Goettingen Bodenkundliche Bericht**, Goettingen, v.52, p.1-123, 1978.
- OHKI, K. Aluminum toxicity effects on growth and nutrient composition in wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v.77, n.6, p.951-956, Nov./Dec. 1985.
- PAVAN, M.A. Toxicity of Al(III) to coffee (*Coffea arabica*, L.) in nutrient solution culture and in oxisols and ultisols ammended with CaCO_3 , MgCO_3 and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Riverside : University of California, 1981. 214p. Ph.D. Thesis.
- REES, W.J.; SIDRAK, G.J. Inter-relationship of aluminum and manganese toxicities towards plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.14, p.101-117, 1961.
- RENGEL, Z.; ELLIOT, D.C. Mechanisms of aluminum inhibition of net 45Ca^{2+} uptake by *Amaranthus* protoplasts. **Plant Physiology**, Rockville, v.98, p.632-638, 1992.
- RENGEL, Z.; ROBINSON, D.L. Aluminum effects on growth and macronutrient uptake by annual ryegrass. **Agronomy Journal**, Madison, v.81, n.2, p.208-215, Mar./Apr. 1989.

- RITCHIE, G.S.P. The chemical behaviour of aluminium, hydrogen and manganese in acid soils. In: ROBSON, A.D. (Ed.). **Soil acidity and plant growth**. Marrickville : Academic, 1989. p.1-60.
- ROST-SIEBERT, K. **Aluminium toxicity in seedlings of norway spruce (*Picea abies*, Karst.) and beech (*Fagus sylvatica*, L.)**. Uppsala, 1984. 13p. Contribuição a Workshop on Aluminium Toxicity to Trees, Uppsala, 1984. Mimeografado.
- RYAN, P.R.; KINRAIDE, T.B.; KOCHIAN, L.V. Al^{3+} - Ca^{2+} interaction in aluminium rhizotoxicity: I. Inhibition of root growth is not caused by reduction of calcium uptake. **Planta**, Berlin, v.192, p.98-103, 1994.
- SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P. **Lehrbuch der Bodenkunde**. 12.Aufl. Stuttgart : F. Enke, 1989. 491p.
- SCHNITZER, M. Reactions between fulvic acid, a soil humic compound and inorganic soil constituents. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.33, n.1, p.75-81, Jan./Feb. 1969.
- SINGH, S.S. The formation and coexistence of gibbsite, boehemite, alumina and alunite at room temperature. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.62, n.2, p.327-332, May 1982.
- SIQUEIRA, J.O.; FRANCO, A.A. **Biotechnologia do solo: fundamentos e perspectivas**. Brasília : MEC / ABEAS / ESAL / FAEPE, 1988. 236p.
- STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. New York : J. Wiley, 1982. 443p.
- TAN, K.; KELTJENS, W.G. Interaction between aluminium and phosphorus in sorghum plants: I. Studies with the aluminium sensitive sorghum genotype TAM428. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.124, n.1, p.15-23, May 1990a.

- TAN, K.; KELTJENS, W.G. Interaction between aluminium and phosphorus in sorghum plants: II. Studies with the aluminium tolerant sorghum genotype SC0283. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.124, n.1, p.25-32, May 1990b.
- TAN, K.H. The release of silicon, aluminum, and potassium during decomposition of soil minerals by humic acid. **Soil Science**, Baltimore, v.129, n.1, p.5-11, Jan. 1980.
- TAN, K.H.; BINGER, A. Effect of humic acid on aluminum toxicity in corn plants. **Soil Science**, Baltimore, v.141, n.1, p.20-25, Jan. 1986.
- TAYLOR, G.J. Aluminum toxicity and tolerance in plants. In: ADRIANO, D.C.; JOHNSON, A.H. (Eds.). **Acidic precipitation: biological and ecological effects**. New York : Springer, 1989. v.2. p.327-361.
- WALLACE, S.U.; ANDERSON, I.C. Aluminum toxicity and DNA synthesis in wheat roots. **Agronomy Journal**, Madison, v.76, n.1, p.5-8, Jan./Feb. 1984.
- WRIGHT, K.E. Internal precipitation of phosphorus in relation to aluminum toxicity. **Plant Physiology**, Rockville, v.18, p.708-712, 1943.
- WRIGHT, R.J.; BALIGAR, V.C.; WRIGHT, S.F. The influence of acid soil factors on the growth of snapbeans in major Appalachian soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.18, n.11, p.1235-1352, 1987.
- ZHAO, X.-J.; SUCOFF, E.; STADELMANN, E.J. Al^{3+} and Ca^{2+} alteration of membrane permeability of *Quercus rubra* root cortex cells. **Plant Physiology**, Rockville, v.83, p.159-162, 1987.