



**Universidade Federal de São Carlos**  
**Centro de Ciências Agrárias**  
**Engenharia Agrônoma**



**ANA CLÁUDIA DA CUNHA**

**SENSIBILIDADE DE VARIEDADES DE FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) AO  
ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO**

**ARARAS – 2013**

**Universidade Federal de São Carlos**  
**Centro de Ciências Agrárias**  
**Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental**

**ANA CLÁUDIA DA CUNHA**

**SENSIBILIDADE DE VARIEDADES DE FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.) AO  
ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de  
Engenharia Agrônômica – CCA – UFSCar  
para a obtenção do título de Engenheira  
Agrônoma

Orientador: Prof. Dr. Luiz Carlos Ferreira da Silva

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcio Roberto Soares

**Araras-SP**  
**2013**

## DEDICATÓRIA

**Dedico este trabalho à minha família, às minhas amigas irmãs da República Gaia, e ao meu namorado Lucas.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Doutor Luiz Carlos Ferreira da Silva, pelas oportunidades e aprendizado durante minha graduação.

Ao Professor Doutor Márcio Roberto Soares, que sem seu auxílio não seria possível conduzir este trabalho.

Ao Professor Doutor Caetano Brugnaro pela sua ajuda e cooperação.

À minha grande amiga Engenheira Agrônoma Jacqueline Malvestiti que colaborou para realização deste trabalho.

*“O conhecimento nos faz responsáveis”*

Che Guevara

## RESUMO

Uma das principais causas de prejuízos na produtividade agrícola se deve às altas concentrações de alumínio (Al) na solução do solo, característica de solos ácidos intemperizados da zona tropical úmida. O Al afeta a morfologia e a fisiologia do sistema radicular, limitando o aprofundamento das raízes no solo e a absorção de água e de nutrientes. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de diferentes concentrações de Al (0,0; 1,5; 3,0 mg L<sup>-1</sup>) no desenvolvimento radicular das variedades de feijão Formoso, Alvorada, Harmonia e Diplomata, por meio da avaliação de alterações morfológicas nas raízes das plântulas, visíveis por microscopia óptica, e da taxa de alongamento radicular. O experimento foi conduzido em condições de laboratório, em delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Os resultados de taxa de crescimento radicular (mm dia<sup>-1</sup>) foram submetidos à análise de variância e comparados pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de significância. O aumento da concentração de Al em solução causou diminuição da taxa de alongamento radicular (mm dia<sup>-1</sup>) nas quatro variedades. As plântulas da variedade Harmonia foram mais tolerantes à presença do Al quanto a taxa de alongação radicular. O período de 4 dias de exposição das raízes ao Al causou danos visíveis morfológicos apenas na variedade Formoso. A concentração crítica de Al em solução, a partir da qual houve decréscimo na taxa de alongamento radicular, foi de 1,5 mg L<sup>-1</sup> de Al. A biometria de raízes indicou a seguinte sequência das variedades de feijão quanto a tolerância ao Al em solução: Harmonia > Formoso = Alvorada = Diplomata.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- FIGURA 1 - Disponibilidade de nutrientes vegetais em relação ao pH do solo.....18
- FIGURA 2 - Aspectos morfológicos de raízes de plântulas de trigo afetadas pelo Al do solo.....18
- FIGURA 3 - Parte aérea e sistema radicular de plantas de milho (Híbrido 30F53) cultivadas em solução nutritiva na ausência e presença de alumínio, respectivamente.....19
- FIGURA 4 - Sementes de variedades de feijão envolvidas por papel germiteste, em fase de pré-germinação no interior da câmara de germinação.....22
- FIGURA 5 - Plântulas de feijão fixadas e identificadas em placa de EVA. Fase de aclimação com sistema radicular imerso em tanque contendo solução nutritiva, sistema de arejamento e iluminação artificial.....25
- FIGURA 6 - Aspecto do sistema radicular de plântulas de feijão após período de aclimação em solução nutritiva. Medição de raízes após período de aclimação em solução nutritiva.....25
- FIGURA 7 - Plântulas de feijão com sistema radicular imerso em recipientes de PVC, contendo solução nutritiva adicionada de concentrações crescentes de Al (0, 1,5 e 3,0 mg L<sup>-1</sup>).....26
- FIGURA 8 - Ápices radiculares da variedade BRS Valiosa sob microscópio óptico (ampliação 10 x) após exposição a concentrações crescentes de Al em solução....29
- FIGURA 9 - Ápices radiculares de variedades de feijão sob microscópio óptico (ampliação 10 x) após exposição a concentrações crescentes de Al em solução....31
- FIGURA 10 - Comparação das taxas de alongamento radicular de plântulas de

variedades de feijão submetidas a concentrações crescentes de Al em solução.....32



## LISTA DE TABELAS

**TABELA 1** - Teores foliares de macro e de micronutrientes considerados adequados para a cultura do feijão.....23

**TABELA 2** - Fontes e concentrações de macronutrientes utilizadas na composição da solução nutritiva para cultivo de plântulas de feijão.....24

**TABELA 3** - Fontes e concentrações de micronutrientes utilizadas na composição da solução nutritiva para cultivo de plântulas de feijão.....24

**TABELA 4** - Resumo da análise de variância (ANOVA) de taxa de alongamento radicular de plântulas de variedades de feijão submetidas à concentrações crescentes de Al em solução.....32

**TABELA 5** - Média geral da taxa de alongamento radicular de plântulas de cada variedade de feijão, submetidas ao Al em solução.....33

## SUMÁRIO

RESUMO.....	5
1. INTRODUÇÃO.....	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 - FATORES EDAFOCLIMÁTICOS QUE INTERFEREM NA PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO.....	13
2.2 - TOXIDEZ POR ALUMÍNIO.....	15
2.3 - EFEITOS DO ALUMÍNIO SOBRE O SISTEMA RADICULAR.....	16
2.4 - AVALIAÇÃO DA TOLERÂNCIA DAS PLANTAS AO ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO.....	20
3. OBJETIVOS.....	21
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
4.1 - PRÉ-GERMINAÇÃO DE SEMENTES.....	22
4.2 - SOLUÇÃO NUTRITIVA E TEMPO DE CULTIVO DAS PLÂNTULAS DE FEIJÃO.....	23
4.3 - FAIXA DE CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA.....	26
4.4 - TEMPO DE EXPOSIÇÃO DAS RAÍZES À SOLUÇÃO CONTENDO ALUMÍNIO.....	27
4.5 - ESTIMATIVAS DAS TAXAS DE ALONGAMENTO RADICULAR (ROSSIELO & JACOB NETO, 2006).....	27
4.6 - FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
5.1 - MICROSCOPIA ÓPTICA DE ÁPICES RADICULARES DE PLÂNTULAS DE FEIJÃO SUBMETIDOS AO ESTRESSE POR Al.....	29
5.2 - TAXAS DE ALONGAMENTO RADICULAR.....	32

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
7. CONCLUSÕES.....	36
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37

# 1 – INTRODUÇÃO

O Brasil, atualmente, é o maior produtor mundial da cultura do feijoeiro, com área ocupada em torno de 3,27 milhões de hectares, produtividade média de 853 kg/ha e, produção de 957 mil toneladas, safra 2012/13 (CONAB, 2013).

Uma das principais limitações dos cultivos agrícolas nos trópicos e, por consequência, do incremento da produção de alimentos nesta região, está relacionada à ocorrência de solos ácidos, que ocupam cerca de 3 bilhões de hectares da superfície terrestre. Na região tropical da América do Sul, esses solos cobrem 85% da área total e aproximadamente 850 milhões de hectares são subutilizados para a produção agrícola. Desse total, 75% possuem pH abaixo de 5,3 no subsolo e 44% têm saturação por Al maior do que 70% (FAGERIA et al., 1999). Aproximadamente 70% do território brasileiro são cobertos por solos ácidos e, em 40%, a produtividade das culturas está reduzida à metade (QUAGGIO 2000). O estudo de Abreu Jr. et al. (2003) mostrou que 75% dos valores de pH da camada superficial de solos de 26 regiões brasileiras estiveram entre 3,78 e 5,52 e que o  $Al^{3+}$  foi o cátion trocável predominante em mais de 30% dos solos com pH inferior a 5,6. No Brasil, a ocorrência de solos com potencial para atividade agrícola afetados por problemas de toxidez por Al é da ordem de 60% (ABREU Jr. et al., 2003). Aumentos na produção de soja com a calagem tem sido demonstrados por seu efeito no aumento do pH (RAIJ et al., 1977), na redução de Al e Mn tóxicos (MASCARENHAS et al., 1976) e no aumento da absorção de Ca, Mg, N, P, K e S (QUAGGIO et al., 1993). Estes efeitos são desejáveis, já que a acidez do solo é um dos principais fatores que limitam a produtividade da soja, sobretudo em solos tropicais na região do Cerrado, que segundo Borgonovi et. al. (1987) ocupam 20% do território nacional, onde esta leguminosa tem ampliado sua fronteira de expansão no Brasil.

A redução da taxa de crescimento radicular de plantas sensíveis tem sido considerado o principal efeito de níveis tóxicos de Al, 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 e outros estresses. Duas maneiras são propostas para contornar o problema de excesso de Al no solo. Uma delas consiste em neutralizar a acidez do solo (QUAGGIO, 2000). A incorporação superficial do

calcário é uma prática empregada na agricultura tropical como forma de elevar o pH do solo e a saturação por bases, além de promover a detoxificação do Al, mediante a sua precipitação química na forma de hidróxido. Quaggio (2000) estimou que o consumo médio de calcário no Brasil é de 0,3 t ha<sup>-1</sup>, bem abaixo do que seria recomendado aplicar (1 t ha<sup>-1</sup>) para as principais culturas. A dificuldade da neutralização da acidez subsuperficial tem sido atribuída à lenta solubilidade do calcário, confinando o sistema radicular no horizonte superficial, o que traz consequências restritivas para o crescimento da parte aérea. Essa limitação adquire maior relevância durante períodos de deficiência hídrica, quando a aquisição de água e de nutrientes das camadas mais profundas pode ser decisiva para a sobrevivência das plantas (FIDALSKI & TORMENA, 2005). Ainda que existam práticas alternativas, como a incorporação profunda do calcário ou o uso de sais mais solúveis, como o gesso agrícola, tais opções sofrem restrições de ordem técnica ou econômica, que podem inviabilizar sua utilização. Outra 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 (FIDALSKI & TORMENA, 2005).

Há dificuldade para a definição de um valor crítico para o Al do solo que provoca toxidez às plantas, pois não existe consistência entre os resultados experimentais, em razão das diferenças genéticas entre as espécies testadas, os solos e as condições experimentais (QUAGGIO, 2000). A identificação de variedades tolerantes ou sensíveis pode contribuir para sistemas sustentáveis de produção, já que a seleção de genótipos tolerantes à condições restritivas de fertilidade do solo, com ênfase aos atributos de subsuperfície limitantes à expansão do sistema radicular, pode maximizar a eficiência de utilização dos insumos e minimizar o risco imposto pela combinação de diversas características restritivas do ambiente que impedem a máxima expressão genética das variedades.

## **2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

## 2.1 – FATORES EDAFOCLIMÁTICOS QUE INTERFEREM NA PRODUTIVIDADE DO FEIJOEIRO

Apesar da sua ampla adaptação geográfica, o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) é muito pouco tolerante a fatores extremos do ambiente, sendo uma cultura relativamente exigente no que diz respeito a maioria das condições edafoclimáticas (BORÉM et al., 2011).

A temperatura média ótima durante o ciclo cultural é de 18 a 24 °C, sendo 21 °C a ideal (VIEIRA, 1967). De acordo com Mariot (1989), a temperatura média durante o ciclo da cultura, na América Latina, varia entre 17,5 °C e 25 °C e, normalmente, a época de semeadura busca a coincidência da floração com a temperatura de  $21 \pm 2$  °C, considerada ótima para esta etapa de desenvolvimento, desde que associada com adequada disponibilidade de água no solo. Fanceli & Dourado Neto (1999), por sua vez, consideraram aptas para a cultura regiões com temperaturas médias entre 15 e 29 °C.

A ocorrência de temperatura acima ou abaixo da temperatura ótima, dependendo da frequência e da duração, pode ocasionar sérios prejuízos ao estabelecimento, crescimento e desenvolvimento da cultura, resultando em baixo rendimento de grãos.

A água constitui outro fator limitante do rendimento da cultura, pois interfere diretamente nos processos básicos da planta, como absorção e translocação de nutrientes, fotossíntese e translocação de assimilados, transpiração, respiração e, em última análise, no crescimento e na produção de grãos (GUIMARÃES, 1988).

Por este motivo, a cultura do feijão requer boa disponibilidade de água no solo durante o ciclo, principalmente nas etapas mais críticas como germinação/emergência, floração e enchimento de grãos (BORÉM et al., 2011).

Quando o déficit hídrico instala-se no período compreendido entre semeadura e emissão da quarta folha trifoliolada, há prejuízo na germinação, na emergência e na sobrevivência de plantas, resultando em baixo estande, o que irá se traduzir em redução no rendimento de grãos. Macedo Junior et al. (1994), submetendo o feijoeiro a diferentes tensões matriciais de água no solo a partir dos primeiros 20 dias, verificam reduções de 16 a 42% na produção de grãos em comparação com a produtividade obtida com o solo na capacidade de campo.

Deve-se considerar também, condições de encharcamento do solo, muitas vezes, causadas por irrigações excessivas, condições estas não suportadas pelo feijoeiro, devido à deficiência de oxigênio (BORÉM, 2011).

As etapas de florescimento e frutificação são as mais sensíveis à má aeração do solo. A inundação no período de florescimento por dois, quatro ou seis dias pode ocasionar reduções de produções de ordem de 48%, 57% ou 68%, respectivamente (SILVA, 1982).

O feijoeiro pode ser cultivado em solos com textura que pode variar de arenosa leve a argilosa pesada (WALLACE, 1980), incluindo solos turfosos (PURSEGLOVE, 1986; ANDRADE et al., 1993). Porém, os solos argilosos e mal drenados deverão ser evitados nas semeaduras de outubro e novembro, assim como as baixadas úmidas ou sujeitas à inundação ou ao encharcamento. Nesses meses, devem ser preferidos para semeadura os terrenos mais altos e com bom arejamento, evitando-se excesso de água no solo.

Não havendo limitações climáticas, nem impedimentos físicos para o desenvolvimento das raízes, o crescimento e a produção do feijoeiro dependem das características químicas do solo, sobretudo da sua capacidade em suprir os nutrientes nas quantidades adequadas para o crescimento normal das plantas, o que é fortemente condicionado pelo pH (MORAES, 1988).

De acordo com a maioria dos resultados disponíveis, o feijoeiro apresenta máxima produtividade numa faixa de pH de 5,5 a 6,5 (VIEIRA, 1967; MORAES, 1988; FAGERIA et al., 1996; ROSOLEM, 1996). Quanto menor o pH do solo, maior o efeito de íons tóxicos ( $Al^{+3}$ ,  $Mn^{+2}$ ,  $H^{+}$ ) que limitam o crescimento radicular, o desenvolvimento da parte aérea e a produção. Dessa forma, menores serão a disponibilidade de nutrientes para as plantas e a fixação simbiótica de nitrogênio (ROSOLEM, 1996), resultando em menos crescimento e rendimento de grãos. Há variabilidade quanto a suscetibilidade do feijoeiro às condições de acidez dos solos, sendo possível abordar o problema por meio do melhoramento genético (SANTOS et al., 1993).

A ocorrência de alumínio (Al) no solo, em níveis tóxicos, tem sido considerada importante por limitar o crescimento e a produtividade das culturas em regiões com elevada acidez do solo. Embora a prática da calagem permita corrigir ou atenuar os efeitos do Al, a eficiência da correção limita-se à camada de incorporação do corretivo, podendo o subsolo continuar com elevado teor de Al trocável (FONTES et

al., 1996). O efeito nocivo da toxidez de Al manifesta-se, geralmente, bloqueando o crescimento radicular, principalmente das laterais, diminuindo, assim, a área e volume dos pêlos radiculares (ROSSIELLO; JACOB-NETTO, 2006). Há a rápida inibição do processo de alongação radicular (cerca de 30-120 min após o contato dos genótipos sensíveis com Al tóxico), em razão da paralisação da divisão celular (WHIGHT, 1989; DELHAIZE; RYAN, 1995; KOCHIAN, 1995). A exposição contínua ao Al conduz à alterações morfológicas, como o engrossamento e encurtamento das raízes, com aspecto quebradiço (DELHAIZE; RYAN, 1995), o desenvolvimento de cor castanha na região apical e alteração na arquitetura do sistema radicular, reprimindo o crescimento das laterais e conduzindo à formação de sistemas radiculares com menor área de volume. (ROSSIELLO; JACOB-NETTO, 2006). Nessas condições, as plantas não conseguem obter água e nutrientes suficientes do subsolo, tornando-se, portanto, menos produtivas. Os mecanismos fisiológicos da toxidez por Al no crescimento radicular não são, ainda, bem compreendidos, sendo a inibição da divisão celular um efeito primário, causado pela ligação do Al com ácidos nucleicos. Esse efeito é mais acentuado nas células da coifa, incidindo diretamente na inibição da alongação radicular (FONTES et. al., 1996).

## **2.2 - TOXIDEZ POR ALUMÍNIO**

A constituição química da crosta superior da Terra apresenta predomínio de oxigênio (O), silício (Si) e alumínio (Al). A cada 100 átomos da crosta terrestre, cerca de 6 ou 7 são de Al, 60 são de O e 20 são de Si. Estes elementos formam os minerais secundários do solo, representados principalmente por óxidos e silicatos de Al. O restante são átomos de ferro (Fe), cálcio (Ca), sódio (Na), potássio (K) e magnésio (Mg). Estes 8 elementos constituem 99% do total de átomos presentes na superfície terrestre (CREPANI et al., 2001).

Segundo VIOLANTE & VIOLANTE (1980), o íon Al vem da decomposição de aluminossilicatos, feldspatos, micas, anfibólios, piroxênios e minerais secundários. Há liberação de Al quando os minerais são intemperizados. O elemento pode combinar-se com o Si para formar minerais secundários, ser complexado pelos compostos orgânicos ou ser precipitado sob a forma de hidróxidos de Al.

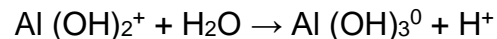
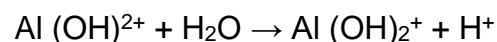
A liberação do íon  $Al^{3+}$  depende de diversos fatores, entre eles a influência de alguns elementos químicos. Em solos de locais com elevadas precipitações



pluviométricas, ocorre a lixiviação de nutrientes solúveis, como Ca, Mg e K. Quando a remoção dos cátions básicos é maior do que a liberação através da intemperização das rochas, o pH do solo diminui (BOHNEN, 1995).

Parte da dificuldade em estudar os processos que ocorrem nas plantas, decorrente da ação deste metal, pode ser atribuída à sua complexidade química. Em pH abaixo de 5, o hidrogênio ( $H^+$ ) atua sobre os minerais de argila ocasionando a hidrólise do hidróxido de Al, de íons silicato da superfície dos argilominerais e do Al complexado com a matéria orgânica do solo (MALAVOLTA, 1985; ASHMAN; PURI, 2002) o que provoca liberação do Al para a solução do solo. O Al se hidrolisa em solução, de tal modo que a espécie de Al trivalente,  $Al^{3+}$ , predomina em condições ácidas ( $pH < 5,0$ ). Já com a elevação do pH ( $pH > 5,0$ ), há o predomínio das espécies  $Al(OH)^{2+}$  e  $Al(OH)_2^+$ . Em valores de pH próximos da neutralidade ( $pH=7,0$ ), há predomínio das espécies  $Al(OH)_3$  e  $Al(OH)_4^-$  (DELHAIZE; RYAN, 1995). Em solução, estes íons  $Al^{3+}$  atraem moléculas de água e, por processos de hidrólise, há liberação de íons  $H^+$ , fazendo com que o pH do solo diminua ainda mais, conforme a reação:

Colóide do solo –  $Al^{3+} \leftrightarrow Al^{3+}$  na solução do solo +  $H_2O \rightarrow Al(OH)^{2+} + H^+$



A reação completa de hidrólise, até a formação do hidróxido de Al precipitado, contribui para a liberação de três íons  $H^+$ . À medida que o pH do solo diminui, aumenta a atividade do Al na solução do solo e, conseqüentemente, ocorre potencialização dos efeitos nocivos desse elemento às culturas (SALET et al., 1999).

### 2.3 - EFEITOS DO ALUMÍNIO SOBRE O SISTEMA RADICULAR

A toxidez causada pelo Al provoca diversos efeitos sobre a planta, que incidem principalmente sobre o sistema radicular. Os danos radiculares mais importantes atribuídos ao Al na solução do solo são:

a. *Alterações na membrana da célula:* as membranas das células radiculares são as primeiras a sentir os efeitos tóxicos do Al. As alterações causadas pelo Al diminuem a permeabilidade da célula para água, devido a alteração das propriedades da membrana plasmática e vacuolar (ZHAO et al., 1987);

b. *Inibição da síntese de DNA e da divisão celular*: um dos danos de maior importância para o sistema radicular é a inibição da divisão celular, 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, ocorrendo assim, estabilização da dupla fita e, conseqüentemente, resultando em um decréscimo da atividade de duplicação. (WALLACE & ANDERSON, 1984);

c. *Inibição do alongamento celular*: a inibição do alongamento celular ocorre devido a alterações na região da coifa, que agem como sensores ao estresse ambiental (MARSCHNER, 1991). Acredita-se que estas alterações ocorram devido a altas concentrações de Al no núcleo das células (NAIDOO et al. 1978);

Como resultado desses efeitos do Al na solução do solo às plantas, é inevitável que ocorra alterações na absorção de nutrientes, devido à inibição do crescimento do sistema radicular pelo Al, a área explorada torna-se potencialmente pequena, resultando em menor absorção de nutrientes e água (FOY, 1974). Além disso, o pH baixo do solo resulta em alterações na disponibilidade de nutrientes, dificultando sua absorção (Figura 1).

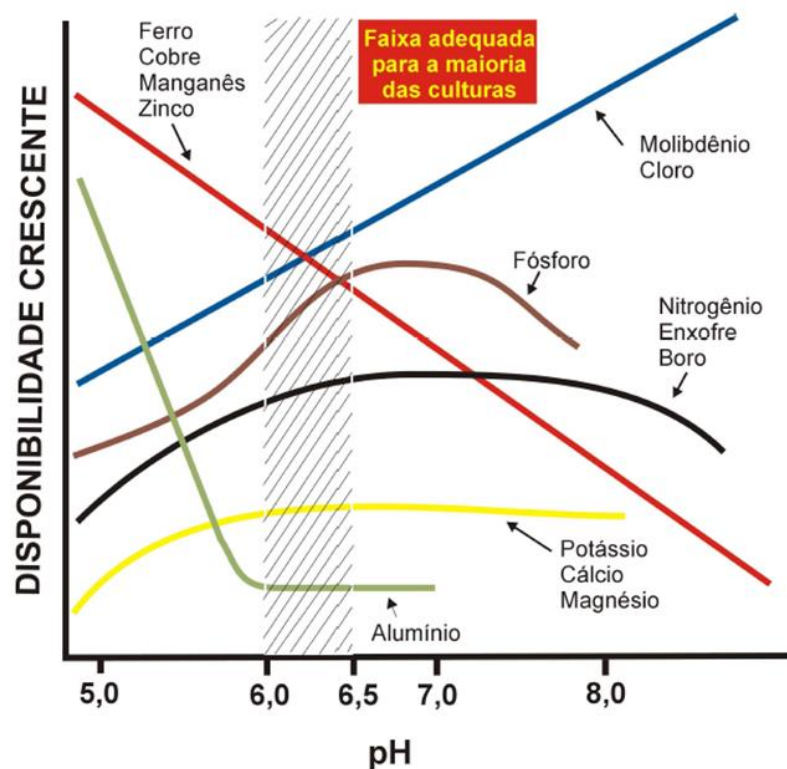
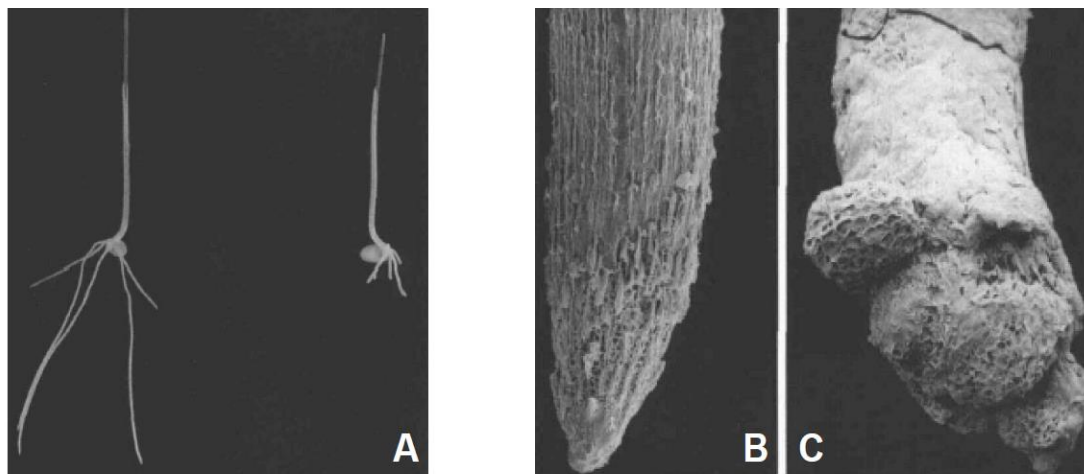


FIGURA 1. Disponibilidade de nutrientes vegetais em relação ao pH do solo

(MALAVOLTA, 1979).

Em relação aos danos morfológicos, as raízes tornam-se curtas, grossas, frágeis, com ápices espessos, coifa deformada e coloração marrom (FOY, 1974; DELHAIZE & RYAN, 1995) (Figura 2).



**FIGURA 2.** Aspectos morfológicos de raízes de plântulas de trigo afetadas pelo Al do solo: (A) efeito do Al no crescimento das raízes; (B) microscopia eletrônica de varredura (MEV) do ápice radicular de variedades tolerante (B) e sensível (direita) ao Al do solo (C) (DELHAIZE & RYAN, 1995).

Há a rápida inibição do processo de alongação radicular (cerca de 30-120 minutos após o contato dos genótipos mais sensíveis com o Al tóxico), em razão da paralisação da divisão celular (WRIGHT, 1989; DELHAIZE & RYAN, 1995; KOCHIAN, 1995). A produção de biomassa radicular é normalmente mais sensível à toxicidade do Al que a produção de biomassa da parte aérea (MACHADO & PEREIRA, 1990). A redução do crescimento da parte aérea (Figura 3) ocorre num momento posterior e parece ser uma consequência dos danos que ocorrem na raiz (MATSUMOTO et al., 1976).

Não se sabe, exatamente, a partir de qual concentração na solução do solo o Al passa a ser tóxico para as plantas. Entretanto, espera-se que quantidades na ordem de alguns poucos  $\mu\text{mol L}^{-1}$  de Al sejam capazes de provocar alterações negativas na maioria das espécies vegetais, principalmente por afetar diretamente as raízes e lesar seu funcionamento normal, diminuindo a absorção de nutrientes e água (SOBRAL & GUIMARÃES, 1992).



**Figura 3.** Parte aérea e sistema radicular de plantas de milho (Híbrido 30F53) cultivadas em solução nutritiva na ausência e presença de alumínio, respectivamente (TECHIO, 2009).

As espécies e cultivares vegetais variam em relação à tolerância ao Al em solução, devido à diferentes mecanismos utilizados pelas plantas. Duas categorias de mecanismos de tolerância ao Al são propostas. A primeira, e bem menos conhecida, diz respeito a mecanismos de tolerância a grandes quantidades de Al no simplasto da raiz, que podem estar relacionados à quelação do Al no citosol, à compartimentação do Al nos vacúolos, à ligações Al-proteínas ou à evolução de enzimas tolerantes ao Al (TAYLOR, 1988). Há relatos da inexistência de relação entre a concentração de Al nos vacúolos e o índice de tolerância baseado no crescimento da raiz (ECHART & CAVALLI-MOLINA, 2001). A segunda categoria de mecanismo de tolerância ao Al está relacionada com a habilidade de excluir o Al do ápice da raiz, e envolve diferentes tipos de mecanismos como permeabilidade seletiva do Al na membrana plasmática, imobilização do Al nas paredes celulares, formação de uma barreira de pH induzida pela planta na rizosfera ou no apoplasto da raiz e a eliminação de ligantes quelados (TAYLOR, 1988). A exclusão de Al da extremidade das raízes pode ser obtida pela eliminação de ácidos orgânicos do ápice radicular. Está bem estabelecida a habilidade dos ácidos orgânicos de quelatar os íons livres  $Al^{3+}$ ,

transformando-os em espécies não-fitotóxico. Tem sido especulado que plantas tolerantes ao Al usam ácidos orgânicos para se desintoxicarem do  $Al^{3+}$ , tanto internamente como na rizosfera. FOY et al. (1978) propuseram um mecanismo de exclusão de Al que envolve o aumento do pH da rizosfera, reduzindo a concentração de  $Al^{3+}$  em favor de espécies de Al menos tóxicas, como os hidróxidos e os fosfatos de Al.

## **2.4 - AVALIAÇÃO DA TOLERÂNCIA DAS PLANTAS AO ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO**

A seleção de plantas tolerantes ao Al tem sido a alternativa mais usada para o aumento da produção em solos ácidos. Alguns dos métodos empregados incluem o cultivo da cultura de interesse em condições de campo ou em condições mais controladas de casa-de-vegetação ou laboratório, usando solo ou soluções nutritivas como substrato.

No método de cultura em campo, há a vantagem da seleção de germoplasma sob condições naturais de clima e solo, baseada na integração do resultado do estresse causado pela toxidez do Al e dos fatores associados ao solo e ao ciclo de crescimento completo do vegetal. Entretanto, o método de campo requer um tempo comparativamente longo em relação ao método de cultura em solução, constituindo uma desvantagem. Além disso, alterações simultâneas e não controladas que ocorrem na solução do solo, com a modificação de seu nível de acidez, e nas raízes, não são facilmente observáveis usando cultura em solo (ECHART, 2001).

A maioria dos trabalhos utiliza a técnica de cultivo de germoplasma em solução nutritiva. O meio hidropônico oferece vantagens como o pronto acesso ao sistema radicular e a possibilidade de monitoramento e controle do pH e das concentrações de Al e de outros íons relevantes à expressão das reações de sensibilidade e tolerância (ROSSIELLO & JACOB-NETTO, 2006). Nessa abordagem, o critério mais utilizado para medir a sensibilidade ao Al é a comparação do crescimento e/ou do peso das raízes de plantas crescidas em solução nutriente com pH ácido e uma concentração adequada de Al com plantas controles crescidas na ausência de Al. Outra opção é observar os aspectos morfológicos da raiz sob influência do Al, através da microscopia óptica (ECHART, 2001).

### **3 – OBJETIVOS**

O objetivo geral do estudo foi estudar a sensibilidade de quatro variedades de feijão (Formoso, Alvorada, Harmonia e Diplomata), ao estresse por Al em solução.

Os objetivos específicos foram:

- a) avaliar as taxas de alongamento radicular de plântulas de variedades de feijoeiro cultivadas em solução nutritiva com diferentes condições de estresse por Al;
- b) examinar alterações morfológicas nas raízes de feijoeiro submetidas ao estresse por Al, através de microscopia óptica.

### **4 – MATERIAL E MÉTODOS**

O estudo foi realizado no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos (CCA-UFSCar), no município de Araras-SP, no mês de janeiro de 2013, em condições de laboratório.

#### **4.1 – PRÉ-GERMINAÇÃO DE SEMENTES**

Foram utilizadas quatro variedades de feijão: Formoso, Harmonia, Diplomata e Alvorada. A pré-germinação das sementes (30 de cada variedade) foi feita em cartuchos de papel germiteste, colocados na posição vertical em recipientes de vidro, com a base imersa em solução de  $\text{CaCl}_2$  0,001 mol L<sup>-1</sup>. Os cartuchos foram mantidos em câmara de germinação, à temperatura de 30°C e fotoperíodo ininterrupto, até que

as raízes atingissem 5-10 cm de comprimento (Figura 4).



**FIGURA 4.** Fase de pré-germinação de sementes de variedades de feijão, envolvidas em cartuchos de papel germiteste, com a base imersa em solução de  $\text{CaCl}_2$   $0,001 \text{ mol L}^{-1}$ , no interior da câmara de germinação.

## 4.2 – SOLUÇÃO NUTRITIVA E TEMPO DE CULTIVO DAS PLÂNTULAS DE FEIJOEIRO

A adequada nutrição mineral das plântulas de feijoeiro, antes de serem submetidas ao estresse por Al, foi feita por uma adaptação da clássica solução de Hoagland & Arnon, preparada com fundamento nos teores foliares de nutrientes considerados adequados para a cultura (MALAVOLTA et al., 1997) (Tabela 1).

A composição e a concentração da solução nutritiva de micro (Tabela 2) e de macronutrientes (Tabela 3) adequadas para a cultura foram calculadas conforme o método prático de Cometti et al. (2006). A solução nutritiva foi usada para garantir às plântulas e, principalmente, às suas raízes, plenas condições de fornecimento balanceado de nutrientes, de forma a evitar que o sistema radicular apresentasse limitações que não fossem decorrentes do estresse pelo Al.

**Tabela 1.** Teores foliares de macro e de micronutrientes considerados adequados para a cultura do feijoeiro.

Nutriente	Teores foliares
<b>Macronutrientes (g kg<sup>-1</sup>)</b>	
N	30-50
P	2,0-3,0
K	20-25
Ca	15-20
Mg	4,0-7,0
S	5,0-10
<b>Micronutrientes (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	
B	30-60
Cu	10-20
Fe	100-450
Mn	30-300
Mo	0,40-1,00
Zn	40-100

Fonte: Malavolta et al. (1997)

**Tabela 2.** Fontes e concentrações de micronutrientes utilizadas na composição da solução nutritiva para cultivo de plântulas de feijoeiro.

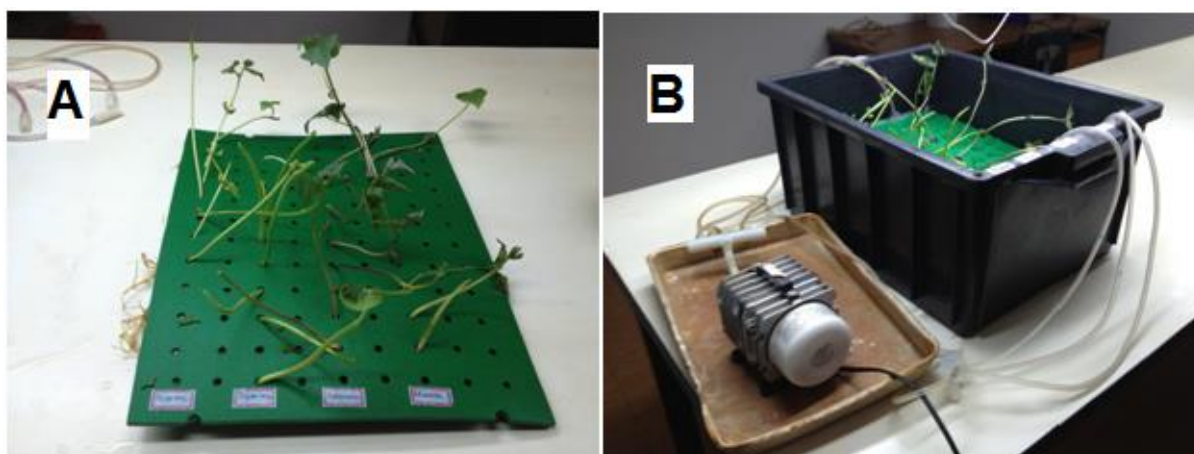
Nutriente	Sal/Fertilizante	Concentração adotada mg L <sup>-1</sup>
B	Ácido bórico	0,30
Cu	Sulfato de cobre	0,20
Fe	Fe-EDTA	2,00
Mn	Sulfato de manganês	0,6
Mo	Molibdato de sódio	0,03
Zn	Sulfato de zinco	0,35

**Tabela 3.** Fontes e concentrações de macronutrientes utilizadas na composição da solução nutritiva para cultivo de plântulas de feijoeiro.



Nutriente	Sal/Fertilizante	Concentração adotada g/1000 L
N	Nitrato de cálcio	635,0
K	Nitrato de potássio	528,0
P	Fosfato monoamônico (MAP)	232,5
Mg	Sulfato de magnésio	255,0

As plântulas de feijoeiro foram retiradas do papel germiteste, fixadas em placas de EVA devidamente identificadas e transferidas para tanque de 25L de solução nutritiva (Figura 5).



**FIGURA 5.** A - Plântulas de feijoeiro fixadas e identificadas em placa de EVA. B - Fase de aclimação com sistema radicular imerso em tanque contendo solução nutritiva, sistema de arejamento e iluminação artificial.

O sistema foi mantido sob arejamento contínuo da solução, por borbulhamento de ar suprido por moto-compressor, e sob iluminação fluorescente artificial permanente de 5000 lux (Figura 5). Em quatro dias, as raízes alcançaram vigor, comprimento e uniformidade adequados para imersão em solução nutritiva adicionada de concentrações crescentes de Al, ocasião em que tiveram seu comprimento inicial medido (Figura 6).



**FIGURA 6.** Aspecto do sistema radicular de plântulas de feijoeiro (A) e medição das raízes após período de aclimatação em solução nutritiva (B).

### **4.3 - FAIXA DE CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA**

Após o período de quatro dias de imersão em solução nutritiva (Figuras 5 e 6), foram selecionadas, para cada variedade, 9 plântulas com uniformidade radicular, as quais foram submetidas a 3 tratamentos com Al, com 3 réplicas cada (Figura 7). O experimento de exposição do sistema radicular das plântulas de feijão a condições de estresse por Al foi desenvolvido em recipientes de PVC rígido, de 10 cm de diâmetro, 20 cm de altura e capacidade de 1,6 L (Figura 7).



**FIGURA 7.** Plântulas de feijão com sistema radicular imerso em recipientes de PVC, contendo solução nutritiva adicionada de concentrações crescentes de Al (0,0, 1,5 e 3,0 mg L<sup>-1</sup>).

As plântulas foram transferidas para os recipientes contendo solução nutritiva e doses crescentes de Al, fornecido na forma de AlCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O nas concentrações de 0,0, 1,5 e 3,0 mg L<sup>-1</sup>, escolhidas conforme Braccini et al. (1996), para constituírem os tratamentos T1 (testemunha), T2 e T3, respectivamente. O pH da solução nutritiva contendo Al foi ajustado para 4,0 diariamente com HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> para garantir o predomínio da espécie livre trivalente de Al [Al(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub><sup>3+</sup>] (ROSSIELLO & JACOB NETO, 2006). Nesta etapa, a concentração de P foi reduzida para 0,0025 mmol L<sup>-1</sup>, para contornar problemas de precipitação com Al (BRACCINI et al., 2000ab).

#### **4.4 - TEMPO DE EXPOSIÇÃO DAS RAÍZES À SOLUÇÃO CONTENDO ALUMÍNIO**

Não há indicação consolidada em referências bibliográficas sobre o tempo necessário de imersão de raízes de feijoeiro em soluções contendo Al. Optou-se por considerar o trabalho de Braccini et. al (1996), que identificaram diferenças na tolerância ao Al entre duas cultivares de feijão em 25 horas de exposição a uma solução contendo 0 e 3 mg L<sup>-1</sup> de Al. Neste trabalho, foi usada também uma concentração intermediária de 1,5 mg L<sup>-1</sup> de Al. Para Braccini et al (1996), a exposição de raízes de plântulas ao estresse por Al durante 25 horas é suficiente para a visualização de alterações morfológicas por microscopia óptica. Entretanto, neste

trabalho, após 25 e 50 horas, após verificações de danos através de microscopia óptica, não houve alterações morfológicas visíveis, por tanto foi escolhido o tempo de 4 dias, no total, para avaliação dos efeitos morfológicos causados aos ápices radiculares pelo Al em solução, assim, após este período, as raízes foram medidas e, novamente seus ápices radiculares (1,5 cm) visualizados em microscópio óptico.

#### **4.5. - ESTIMATIVAS DAS TAXAS DE ALONGAMENTO RADICULAR (ROSSIELO & JACOB NETO, 2006)**

Medidas biométricas dos comprimentos radiculares de todas as plântulas foram registradas de forma a obter dois grupos de medidas do comprimento inicial (Ci):

- a) Ci (Al<sub>0</sub>): comprimento inicial (mm) da raiz seminal, antes da exposição à solução sem Al;
- b) Ci (Al<sub>x</sub>): comprimento inicial (mm) da raiz seminal, antes da exposição à solução com concentração 1,5 e 3 mg L<sup>-1</sup> de Al.

Após o período de 4 dias de exposição ao estresse por Al, as plântulas foram transferidas para solução nutritiva livre de Al, e o seu comprimento radicular foi medido novamente, obtendo-se:

- a) Cf (Al<sub>0</sub>): comprimento final (mm) da raiz seminal, após a exposição à solução sem Al;
- b) Cf (Al<sub>x</sub>): comprimento final (mm) da raiz seminal, após a exposição à solução com concentração 1,5 e 3 mg L<sup>-1</sup> de Al.

Com as medidas iniciais e finais de comprimento radicular, foram calculadas as taxas de alongamento (TA):

$$TA_{Al_0} = \frac{Cf_{Al_0} - Ci_{Al_0}}{Tf - T_0} \qquad TA_{Al_x} = \frac{Cf_{Al_x} - Ci_{Al_x}}{Tf - T_0}$$

em que a TA é a taxa de alongamento expressa em cm dia<sup>-1</sup>; Tf-T<sub>0</sub> representa o intervalo de tempo desde o início dos tratamentos com Al. Os valores absolutos das

taxas de alongação dos controles foram comparados diretamente com os do tratamento.

## **4.6 - FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS**

Devido às condições controladas em laboratório, o experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com esquema fatorial 3x4 (3 concentrações de Al em solução e 4 variedades de feijão), com três réplicas. A tolerância das variedades de feijão ao Al em solução foi avaliada pelos seguintes critérios:

- a) resultados da taxa de alongamento radicular foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de *Tukey*, ao nível de 5% de significância, para a identificação de diferenças significativas entre os tratamentos e variedades;
- b) alterações morfológicas dos ápices radiculares submetidos ao Al em solução, foram explorados na forma de imagens por registro fotográfico das observações ao microscópio óptico.

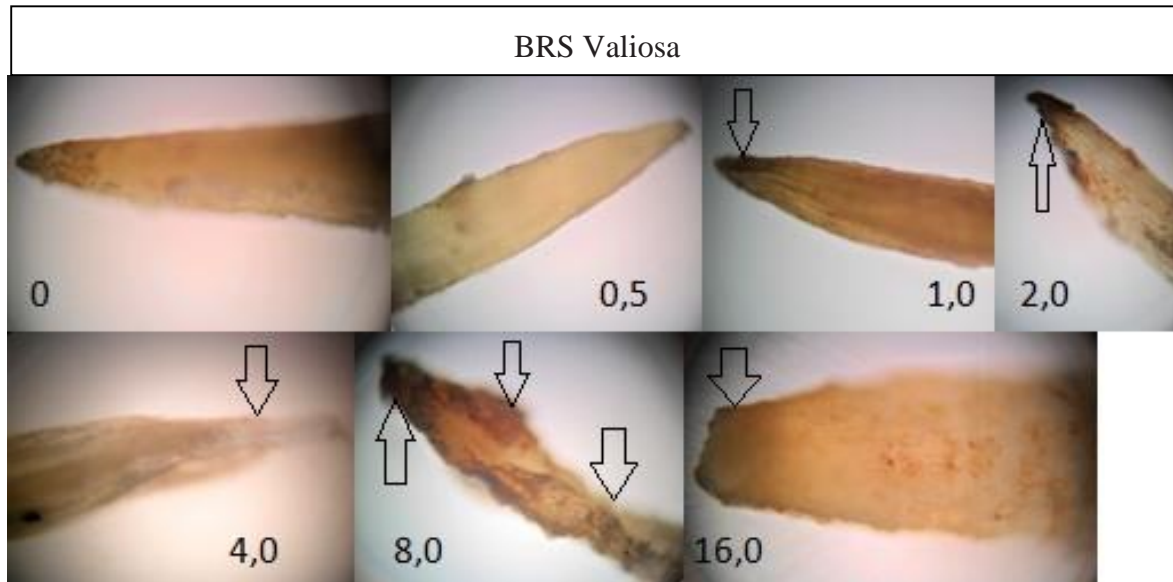
## **5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1 - MICROSCOPIA ÓPTICA DE ÁPICES RADICULARES DE PLÂNTULAS DE FEIJOEIRO SUBMETIDOS AO ESTRESSE POR Al**

Normalmente, o exame microscópico dos ápices radiculares submetidos ao Al revela alterações morfológicas típicas, tais como a aparência engrossada e escurecida (amarronzada), o aspecto retorcido, deformado e quebradiço, colapso da coifa, perda de células da epiderme, produção de mucilagem, etc (OLIVEIRA, 2012).

Genótipos de culturas de ciclo anual geralmente apresentam este conjunto de sintomas após poucos dias de exposição ao Al. Por exemplo, COGHI (2012) observou

variedades de soja e concluiu que a coifa das raízes da variedade BRS Valiosa começou a ser afetada na concentração de 2 mg de Al L<sup>-1</sup>, sendo que o dano causado se tornou mais acentuado com o aumento da dose de Al (Figura 8). Deformações severas puderam ser observadas nas doses de 4, 8 e 16 mg de Al L<sup>-1</sup>.



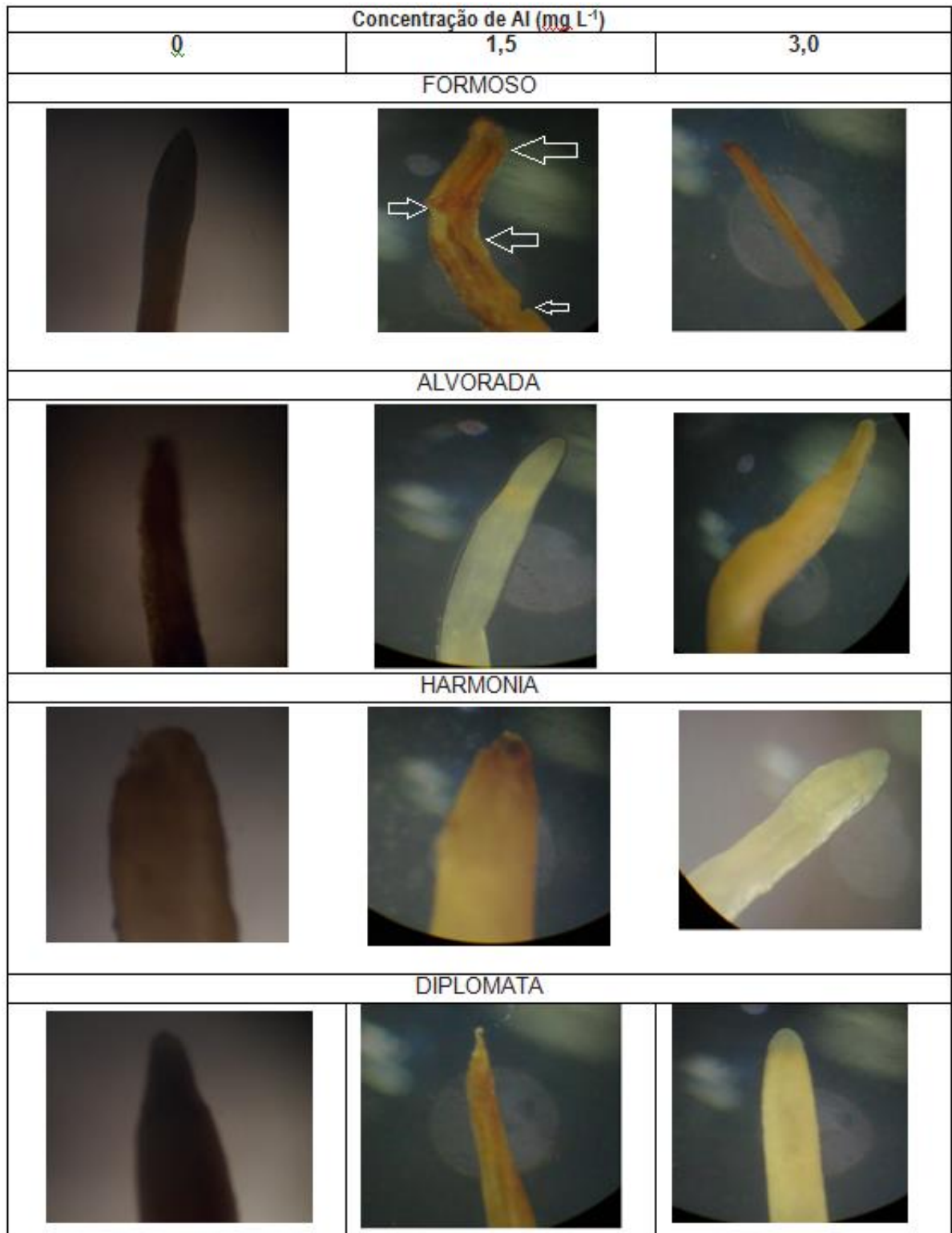
**Figura 8.** Ápices radiculares da variedade de soja BRS Valiosa sob microscópio óptico (ampliação 10 x) após exposição a concentrações crescentes de Al em solução.

Fonte: COGHI (2012).

Entretanto, as imagens captadas da microscopia óptica de ápices radiculares das plântulas de feijoeiro não mostraram alterações morfológicas evidentes com a elevação da concentração de Al em solução, com exceção da variedade Formoso (Figura 9).

Ainda que Bracinni et al. (1996) tenham utilizado um período de 25 horas de exposição de raízes de feijoeiro ao Al, que fora suficiente para a expressão da sensibilidade ao estresse, neste experimento o período de 4 dias não foi o bastante para causar injúrias visíveis ao sistema radicular das plântulas de feijão, com exceção da variedade Formoso, que apresentou uma deformidade da raiz lateral, que se mostrou mais visível na concentração de 1,5 mg L<sup>-1</sup> (Figura 9).



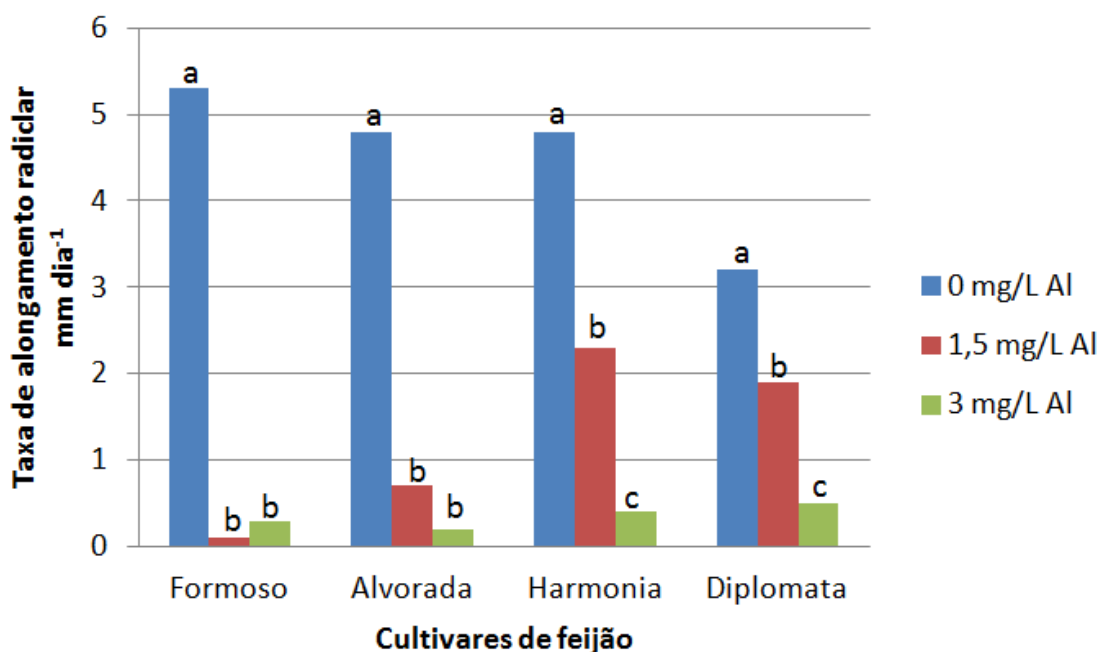


**Figura 9.** Ápices radiculares de variedades de feijão sob microscópio óptico (ampliação 10 x) após exposição às concentrações crescentes de Al em solução.



## 5.2 - TAXAS DE ALONGAMENTO RADICULAR

As variedades Formoso, Alvorada, Harmonia e Diplomata de feijoeiro apresentaram decréscimo na taxa de alongamento radicular quando submetidas a concentrações crescentes de Al em solução (Figura 10).



**Figura 10.** Comparação das taxas de alongamento radicular de plântulas de variedades de feijoeiro submetidas a concentrações crescentes de Al em solução.

Os resultados da taxa de alongamento radicular foram submetidos à análise de variância (Tabela 4) para atestar a consistência das constatações feitas a partir da Figura 10.

**Tabela 4.** Resumo da análise de variância (ANOVA) de taxa de alongamento radicular de plântulas de variedades de feijoeiro submetidas às concentrações crescentes de Al em solução.

Causas de variação	GL	SQ	QM	F
Dosagem	2	117,7405	58,8702	922,70 **
Cultivar	3	2,2617	0,7539	11,82 **
Interação dosagem x cultivar	6	14,3672	2,3945	37,53 **
Tratamentos	11	134,3694	12,2154	191,46 **
Resíduo	24	1,5313	0,0638	
<b>Total</b>	<b>35</b>	<b>135,9006</b>		

Significância: \*\* 1%; \* 5%, + 10%; ns: não significativo.

Houve alta significância estatística tanto para a influência isolada dos fatores testados (doses de Al e cultivares), quanto para a interação dos fatores (doses de Al x cultivares). O teste de comparação de médias (Tukey a 5%) foi aplicado para as variedades e para as concentrações de Al em solução (Tabela 5).

**Tabela 5.** Média geral da taxa de alongamento radicular de plântulas de cada variedade de feijão, submetidas ao Al em solução.

Doses de Al (mg L <sup>-1</sup> )	Formoso	Alvorada	Harmonia	Diplomata	Média
	mm dia <sup>-1</sup>				
0	5,3 a A	4,8 a AB	4,8 a B	3,3 a C	4,5 a
1,5	0,1 b B	0,7 b B	2,3 b A	1,9 b A	1,2 b
3	0,3 b A	0,2 b A	0,4 c A	0,5 c A	0,3 c
<b>Média</b>	1,9 B	1,9 B	2,5 A	1,9 B	2,0

Letras iguais indicam não significância, minúsculas na coluna, maiúsculas na linha.

A variedade Formoso apresenta característica de maior desenvolvimento radicular na ausência de condições de estresse por Al, ou seja, sob condições similares de solo corrigido em condições de campo. Entretanto, mostrou grande sensibilidade quando submetida ao Al, mesmo na menor dose, com drástica redução da taxa de alongamento radicular. O mesmo comportamento foi observado para a variedade Alvorada. Não houve diferença significativa entre os efeitos proporcionados pelas doses 1,5 e 3,0 mg L<sup>-1</sup> para estas duas variedades.

O efeito das doses de Al na redução da taxa de alongamento radicular foi menos acentuado nas variedades Harmonia e Diplomata. No entanto, também foi observado diminuição significativa do desenvolvimento radicular na presença do Al em solução. Houve ainda efeito significativo da concentração de Al em solução, já que na dose 3,0 mg L<sup>-1</sup> de Al a redução do crescimento radicular foi ainda mais evidente. As pequenas taxas de alongamento radicular obtidas para as variedades Formoso e Alvorada na dose 1,5 mg L<sup>-1</sup> somente foram observadas na dose 3,0 mg L<sup>-1</sup> para as variedades Harmonia e Diplomata, sendo um indicativo de maior tolerância dessas últimas ao Al em solução.

Com respeito aos valores das médias da taxa de crescimento radicular nas três doses de Al em solução, a variedade Harmonia foi a única que apresentou desenvolvimento radicular estatisticamente superior às variedades Formoso, Alvorada e Diplomata, implicando em maior tolerância desta variedade e maior

sensibilidade das demais ao Al em solução. Neste caso, a sequência das variedades quanto à tolerância ao Al em solução foi a seguinte: Harmonia > Formoso = Alvorada = Diplomata.

Decréscimos significativos na taxa de alongamento radicular das plântulas de feijoeiro foram observados a partir da concentração de  $1,5 \text{ mg L}^{-1}$  (Figura 10 e Tabela 5), considerado, neste estudo, valor crítico a partir do qual tem início a influência do Al sobre o desenvolvimento radicular inicial de plântulas de feijoeiro. Essa concentração crítica aponta para a provável suscetibilidade das variedades de feijão estudadas às concentrações iônicas de Al superiores aquelas consideradas típicas na solução de solos ácidos, que normalmente estão entre  $4,0$  e  $5,5 \text{ mg L}^{-1}$  ( $150$  e  $200 \mu\text{mol L}^{-1}$ ) (ROSSIELLO & JACOB NETTO, 2006). Bracinni et. al. (1996), verificaram que o Al, na concentração de  $3 \text{ mg L}^{-1}$ , causou grande inibição no alongamento das raízes da variedade de feijão mais sensível analisada no seu trabalho. Os autores concluíram que o Al limitou o crescimento radicular, possivelmente por afetar a divisão celular e por reduzir a plasticidade e elasticidade da parede celular, mesmo nos períodos iniciais de exposição a este elemento. Porém, as variedades usadas neste estudo, incluindo a variedade Harmonia, que apresentou taxa de crescimento radicular maior comparada às outras variedades, tiveram decréscimos no crescimento radicular a partir de  $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ , concentração intermediária e adicional às adotadas por Bracinni et al. (1996) para maiores detalhes na avaliação.

O valor crítico da concentração de Al em solução, e que influencia o desenvolvimento radicular, depende de cada espécie vegetal e até mesmo da variedade (Evans & Kamprath, 1970). Por isso, não existe um valor crítico único para a concentração de Al. Sbrissa (2013), verificou que decréscimos significativos na taxa de alongamento radicular de porta-enxertos de Limão Cravo, Citrumelo Swingle e Tangerina Sunki, foram observados a partir da concentração de  $15 \text{ mg L}^{-1}$  de Al, considerado valor crítico a partir do qual tem início a influência do Al sobre o desenvolvimento radicular inicial de mudas cítricas. Sbrissa (2013) concluiu que o porta-enxeto mais sensível foi a Tangerina Sunki. Já para Coghi (2011), que estudou a sensibilidade das variedades de soja BRS Valiosa, Monsoy 7211 e Tomoko ao Al, notou que ocorreu decréscimos na taxa de alongamento radicular a partir da dose de  $1 \text{ mg L}^{-1}$  de Al, sendo a mais sensível a variedade Tomoko. Para Malvestiti (2011), a concentração de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  de Al foi crítica para iniciar injúrias ao sistema radicular das variedades de cana-de-açúcar RB855156, SP81-3250 e RB935744. Entretanto,

para um conjunto mais amplo de variedades de cana-de-açúcar avaliado por Oliveira (2012) (RB928064, RB966928, RB937570, RB855156, RB855453, RB935744, RB867515, RB925345 e SP813250), o valor crítico de Al em solução variou de 3,5 a 8,0 mg L<sup>-1</sup>. Lima (2011), observou decréscimos significativos na taxa de alongamento radicular de plântulas das variedades de milho Ag 8061, Al Bandeirante, Dow 255 e DKB a partir da concentração de 3 mg L<sup>-1</sup> de Al, sendo as variedades Dow 255 e DKB as mais sensíveis às condições de toxidez pelo Al.

## 6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, foram testados dois métodos para estimar a sensibilidade de primórdios radiculares de variedades de feijão à concentrações crescentes de Al em solução. A análise dos efeitos do Al pela microscopia óptica não foi de grande consistência, afinal, apenas a variedade Formoso apresentou algum dano visível. Já pela análise estatística dos resultados de biometria das raízes, todas as variedades apresentaram diminuição do desenvolvimento radicular. A variedade Formoso, a qual se destacou na microscopia óptica por danos evidentes, mostrou crescimento radicular estatisticamente igual às variedades Alvorada e Diplomata, enquanto a variedade Harmonia apresentou tolerância maior às condições de toxidez por Al, em comparação às demais variedades. Por isso, a biometria das raízes foi o parâmetro mais consistente para avaliar o efeito de concentrações crescentes de Al em solução sobre o sistema radicular. A interpretação dos resultados de taxa de alongação radicular indicou que danos significativos aos primórdios radiculares de plântulas de feijão se deu na dose crítica de 1,5 mg L<sup>-1</sup>.

Embora os experimentos de laboratório contribuam na elucidação do comportamento vegetal perante às situações diversas de estresse, é preciso reconhecer a dificuldade de sua aplicação direta na forma de recomendação para o setor produtivo. Assim, este estudo também aponta para a necessidade de continuidade de experimentos com o feijoeiro em condições de casa-de-vegetação e, principalmente, em condições de campo.

O referencial teórico e experimental sobre a tolerância de variedades de feijão às condições adversas de acidez extrema e, principalmente, a alta saturação por Al,

ainda é inconclusivo. É indiscutível o valor econômico, social e ambiental de uma planta tolerante à qualquer situação de estresse, já que isso pode significar a redução dos custos e dos impactos do uso exagerado dos fatores de produção. Estas espécies, resguardado seu potencial produtivo, devem se comportar de forma eficiente, precisando apresentar alguma tolerância ao Al. Neste sentido, a identificação dos genótipos mais tolerantes à estas condições de estresse contribui para a síntese de variedades por processos biotecnológicos em programas de melhoramento genético, para a devida alocação das variedades no campo e para a condução de sistemas sustentáveis de produção.

## **7 – CONCLUSÕES**

Para as variedades de feijão Formoso, Alvorada, Harmonia e Diplomata, nas condições experimentais em que este estudo foi conduzido, concluiu-se que:

- o aumento da concentração de Al em solução causou diminuição da taxa de alongamento radicular ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) das quatro variedades;
- a concentração crítica de Al em solução para a taxa de alongamento radicular das variedades de feijão foi de  $1,5 \text{ mg L}^{-1}$  de Al;
- o período de 4 dias de exposição das raízes das variedades de feijão ao Al em solução não foi suficiente para promover alterações morfológicas visíveis ao sistema radicular, com exceção da variedade Formoso;
- a variedade Harmonia apresentou taxa de crescimento radicular estatisticamente superior às variedades Formoso, Alvorada e Diplomata, implicando em maior tolerância desta variedade e maior sensibilidade das demais ao Al em solução;
- a biometria de raízes indicou a seguinte sequência das variedades quanto à tolerância ao Al em solução: Harmonia > Formoso = Alvorada = Diplomata.

## **8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ABREU JR., C.H.; MURAUKA,T.; LAVORANTE, A.F. Relationship between acidity and chemical properties of brasilian soils. **Scientia Agricola**, v.60, p.337-343, 2003.
- ANDRADE, F.H. **Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce**, Argentina. *Field Crops Research*, 41:1-12, 1993.
- ASHMAN, M. R.; PURI, G. **Essencial Soil Science**. Oxford: Blackwell Science, 2002.
- BRACCINI, A.L. et al. **Germinação e vigor de sementes de soja sob estresse hídrico induzido por soluções de cloreto de sódio, manitol e polietilenoglicol**. *Revista Brasileira de Sementes*, Brasília, v.18, n.1, p.10-16, 1996a.
- BRACCINI, M.C.L.; MARTINEZ, H.E.P.; BRACCINI, A.L. **Avaliação de linhagens de cafeeiros quanto à tolerância ao alumínio pelo método do papel-solução**. *Bragantia*, v.59, n.2, p.221-226, 2000a.
- BRACCINI, M.C.L.; Martinez, H.E.P.; SILVA, E.A.M.; BRACCINI, A.L.; Scapim, C.A. **Crescimento da planta e coloração das raízes com hematoxilina como critérios de avaliação de genótipos de café quanto à tolerância à toxidez por alumínio**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 24, p.59-68, 2000b.
- BORGONOV, R. A., SCHAFFERT, R. E., PITTA, G. V. E. Breeding aluminum tolerant sorghums. In: LM Gourley, JG Salinas, Soghum for acid soils, eds, **Proceedings of a workshoop on evaluating sorghum for tolerance to Al-toxic tropic soils in latin america**, INTSORMIL – ICRISAT – CIAT, Cali, Colombia, pp 271-292, 1987.
- BOHNEN, H. Acidez e calagem. In: GIANELLO, C., BISSANI, C.A., TEDESCO, M.J. (eds.) **Princípios de fertilidade de solo**. Porto Alegre : Dep. de Solos. Fac. de Agronomia. UFRGS, 1995. p.51-76.

BORÉM et al., **Feijão** (*Phaseolus Vulgaris L.*) editora UFV – 2ªed., 2011.

COMETTI, N.N.; FURLANI, P.R.; RUIZ, H.A.; FERNANDES FILHO, E.I. Soluções nutritivas: formulações e aplicações. In: FERNANDES, M.S (Ed.). Nutrição mineral de plantas. Viçosa: Sociedade **Brasileira de Ciência do Solo**, 2006. p.88-114.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J.S.; HERNANDES FILHO, P.; FLORENZANO, T. DELHAIZE, E.; RYAN, P.R. **Aluminium toxicity and tolerance in plants**. Plant Physiology, v. 107, p. 315-321, 1995.

COGHI, R. **Sensibilidade de variedades de soja (*Glycine max*) ao alumínio em solução**. 2012. 50 p. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Araras, 2012.

ECHART, C. L. & CAVALLI-MOLINA, **Fitotoxicidade do alumínio: efeitos, mecanismo de tolerância e seu controle genético**. *Cienc. Rural* [online]. 2001, vol.31, n.3 [cited 2013-01-23], pp. 531-541

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.

FAGERIA, N.K.; STONE, L.F., SANTOS, A.B. Manejo de solos ácidos. In: Maximização da eficiência de produção das culturas. Brasília, **Embrapa Comunicação para a transferência de Tecnologia**, 1999. p.200-232.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C;A; Dinâmica da calagem superficial em um Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.235-247, 2005.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D (Org.) **Feijão Irrigado: Tecnologia e Produção**. Piracicaba/SP: Universidade de São Paulo, 2005. v. 1. 174 p.

- FONTES et al., **Técnicas de Avaliação de Toxidez por Alumínio em Plântulas de Feijão (*Phaseolus Vulgaris L.*)** Cultivadas em Solução Nutritiva. Revista Ceres, 43 (245): 3-16, 1996.
- FOY, C.D. & FLEMING, A.L. **The physiology of plant tolerance to excess available aluminum an manganese in acid soils.** In: JUN, G. A. (ed.). Crop tolerance to subotinal land conditions. Madison: ASA/CSSA/SSSA. p.301-343. (Special Publication; n.32), 1978.
- 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.; CHANEY, R. L.; WHITE, M. C. **The physiology of metal toxicity in plants.** Annual Review of Plant Biology, Palo Alto, Review Biology v. 29, p. 511-566, 1978
- GUIMARÃES, C. M. **Efeitos fisiológicos do estresse hídrico .** In: ZIMMERMANN, M. J. de O.; ROCHA, M. & YAMADA, T. Cultura do feijoeiro: Fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFÓS, 1988. p. 157-174.
- LIMA, D.L.S. **Sensibilidade de variedades de milho (*Zea mays*) ao alumínio em solução.** 2011. 42 p. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Araras, 2011.
- MACEDO JÚNIOR. et al. Produção do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris L.*) submetido a cinco níveis de tensão de água no solo. **Ciência e Prática**, Lavras, MG, v. 18, n. 4, p. 438-444, 1994.
- MARIOT, E. J. **Ecofisiologia do feijoeiro.** p. 25-41. In Iapar. O feijão no Paraná. Londrina. 303 p. (Circular 63), 1989.
- MASCARENHAS, H.A.A.; CAMARGO, C.E.O.; FALIVENSE, S.M.P. **Efeito do alumínio sobre o crescimento de raízes de diferentes cultivares de soja.** **Bragantia**, v.43, p.191-200, 1984.



MATSUMOTO, H.; HIRASAWA, F.; TORIKAI, H.; et al. **Localization of absorbed aluminium in pea root and its binding to nuclei acid.** *Plant Cell Physiology*, Kyoto, v.17,p.627-631, 1976.

MATSUMOTO, H; MORIMURA, S. **Repressed template activity of chromatin of pea roots treated by aluminium.** *Plant Cell Physiology*, 21: 951-959, 1980.

MACHADO, E.C.; PEREIRA, A.R. **Eficiência de conversão e coeficiente de manutenção da planta inteira, das raízes e da parte aérea em milho e arroz submetidos ao estresse de alumínio.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.25, p.845-855, 1990.

MALAVOLTA et. al., **Estudos sobre a nutrição mineral do feijão Macassar** (*Viagnia sinensis* L. ENDL.). I. Deficiências minerais, v. XXXVI, p.231-246, 1979.

MARSCHNER, H. 1991. **Mechanisms of adaptation of plants to acid soils.** In: R.J. Wright, V.C. Baligar, and R.P. Moorman (eds), *Plant-soil interactions at low pH. Proceedings of the Second International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH*, June 24 –29, 1990, Beckley, West Virginia, USA. Kluwer Academic Publisher. p 683–702.

MALVESTITI, J.A. **Sensibilidade de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) ao alumínio em solução avaliada por corantes indicadores.** 2011. 63 p. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Araras, 2011.

MORAES, J.F.N. Calagem e Adubação. In: ZIMMERMANN, M.J.O. et al. (Coord.). **Cultura do feijoeiro: fatores que afetam a produtividade.** Piracicaba: Potafós, 1988. p. 275-279.

NAIDOO G., STEWART, J.M., LEWIS, RJ (1978) **Accumulation sites of Al**

**insnapbean and cotton roots.** Agron J 7 0 489-492.

OLIVEIRA, M. de S. **Tolerância de variedades de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) ao alumínio em solução.** 2012. 112 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Araras, 2012.

PURSEGLOVE, J.W. **Tropical crops. Monocotyledons.** I. John Wiley and Sons. Inc. New York. 334p.,1986.

QUAGGIO, J.A. **Acidez e calagem em solos tropicais.** Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 2000. 111p.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo.** 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 285p.; 1996. (Boletim Técnico 100).

RYAN, P.R.; DELHAIZE, E.; RANDALL, P.J. Characterization of Al-stimulated efflux of malate from the apices of Al-tolerant wheat roots. **Planta**, v.196, p.103-110,1995.

ROSOLEM, C.A. Calagem e adubação mineral. In: ARAUJO, R.S.; RAVA, C.A.; STONE, L.F.; ZIMMERMANN, M.J.O. (Ed.) **Cultura do feijoeiro comum no Brasil.** Piracicaba: Potafós, 1996. cap.4., p.353-385.

ROSSIELLO, R.O.P.; JACOB NETTO, J. Toxidez de alumínio em plantas: novos enfoques para um velho problema. In: Fernandes, M.S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas.** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p.375-418.

SANTOS, C. H.; FILHO G. H.; RODRIGUES, J. D.; PINHO, S. Z. Dos et al. Aluminum

- levels and macronutrient accumulation in citrus rootstocks in hydroponic solution. **Scientia Agricola**, Botucatu, v. 56, n. 4, p.1165-1175, 05 out. 1999.
- SALET, R.L. et al. Atividade do Alumínio na solução do solo do sistema plantio direto. **Revista Científica Unicruz**, Cruz Alta, v.1, p.9-13, 1999).
- SBRISSA, M. C. Tolerância de porta enxertos cítricos ao alumínio em solução. 2013. 50p. **Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)** – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Araras, 2013.
- SILVA et al., **Panorama Mundial** - Feijão, 2009.
- SOBRAL, A. F. de; GUIMARÃES, V. O. da S. Relação entre a toxidez do alumínio e a produção de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.27, n.2, p.287-292, 1992.
- TAYLOR C.W. (1988) Various approaches to and definitions of creativity. In *The Nature of Creativity: Contemporary Psychological Perspectives*, RJ Sternberg (ed), pp 99–124. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- TECHIO, J. W., **Crescimento de milho em solução com alumínio e produção de ácidos orgânicos de baixo peso molecular**. Universidade de Passo Fundo. Março de 2009. 106 p. Dissertação de mestrado.
- VIEIRA, C. **O feijoeiro comum: cultura, doenças e melhoramento**. Viçosa, MG: UFV, 1967. 220 p
- VIOLANTE, A.; VIOLANTE P. 1980. **Influence of pH, concentration, and chelating**

**power of organic anions on the synthesis of aluminum hydroxides and oxyhydroxides.** Clays and Clay Minerals, Vol 28, n° 6: 425-434.

VITORELLO, V.A.; CAPALDI, F.R.; STEFANUTO, V.A. Recent advances in aluminium toxicity and resistance in higher plants. **Brasilian Journal Plant Physiology**, v.17, p.129-143, 2005.

KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminium toxicity and resistance in plant. **Plant Physiology Plant Molecular Biology**, v. 46, p. 237-260, 1995.

WALLACE, S.U.; ANDERSON, I.C. (1984), **Aluminum toxicity and DNA synthesis in wheat roots.** Agron J 76 5-8

WRIGHT, R.J., **Soil aluminum toxicity and plant growth.** Communications in Soil Science and Plant Analysis, v.20, p.1479-1497, 1989.

ZHAO, X.-J.; SUCOFF, E.; STADELMANN, E.J. **Al<sup>3+</sup> and Ca<sup>2+</sup> alteration of membrane permeability of *Quercus rubra* root cortex cells.** Plant Physiology, Rockville, v.83, p.159-162, 1987.