

MARIA DO CARMO LANA BRACCINI

**TOLERÂNCIA DE GENÓTIPOS DE CAFÉ AO ALUMÍNIO
EM SOLUÇÃO NUTRITIVA E EM SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
SETEMBRO - 2000

MARIA DO CARMO LANA BRACCINI

**TOLERÂNCIA DE GENÓTIPOS DE CAFÉ AO ALUMÍNIO
EM SOLUÇÃO NUTRITIVA E EM SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 01 de dezembro de 1999.

Prof. Paulo Roberto Gomes Pereira
(Conselheiro)

Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães
(Co-Orientador)

Prof. Roberto Ferreira de Novais

Dr. Antonio Alves Pereira

Prof^ª. Herminia Emilia Prieto Martinez
(Orientadora)

AGRADECIMENTOS

A Deus, que tudo torna possível, sempre presente em minha vida e guiando meus caminhos.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Fitotecnia, pela oportunidade oferecida para a realização do Curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais, pelo suporte financeiro.

À Prof^a Herminia Emilia Prieto Martinez, pela dedicada orientação, pelos ensinamentos transmitidos e principalmente pelo carinho e pela amizade.

Ao Prof. Paulo Roberto Gomes Pereira, pela atenção, pelos ensinamentos e pelo aconselhamento.

Ao Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães, pela atenção e pelas críticas e sugestões.

Ao Prof. Eldo Antônio Monteiro da Silva, pelo auxílio na realização dos estudos anatômicos.

Ao Prof. Tocio Sedyama, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, pelo incentivo e apoio constante.

Ao Prof. Roberto Ferreira de Novais, pelas valiosas críticas e sugestões.

Ao acadêmico de Agronomia Sebastião Marcos de Mendonça, bolsista de iniciação científica, pelo auxílio na condução dos experimentos.

Aos professores das disciplinas cursadas durante a formação acadêmica, pelos conhecimentos transmitidos.

Ao Prof. Carlos Alberto Scapim, da Universidade Estadual de Maringá, pelo auxílio na análise estatística.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, na pessoa do pesquisador Dr. Antonio Alves Pereira, pelo fornecimento das sementes de café utilizadas neste trabalho e pelas sugestões.

Ao funcionário do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas, Domingos Sávio da Silva, pela eficiente ajuda na realização deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Fitotecnia, em especial, Mara Rodrigues e Vicente Madaleno dos Santos, pela ajuda e apoio constantes.

Ao amigo José Claudio Faria e demais colegas de curso, pelo incentivo, pelo apoio e pela agradável convivência.

Ao meu esposo, Alessandro de Lucca e Braccini, pelo grande estímulo, amor, e pela valiosa colaboração em todos os momentos da realização deste curso.

Enfim, a todos aqueles que, de alguma forma, auxiliaram na realização deste trabalho, o meu reconhecimento e gratidão.

BIOGRAFIA

MARIA DO CARMO LANA BRACCINI, filha de Roberto Trindade Lana e Nair Rosa de Oliveira Lana, nasceu em Guaraciaba-MG, no dia 16 de março de 1966.

Em novembro de 1991, graduou-se em Engenharia Agrônômica, pela Universidade Federal de Viçosa.

Realizou Aperfeiçoamento no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, como bolsista do CNPq, no período de dezembro de 1991 a agosto de 1992.

Concluiu o Curso de Mestrado em Fitotecnia na Universidade Federal de Viçosa, em março de 1995.

Em março de 1995, iniciou o Programa de Pós-Graduação, em nível de Doutorado em Fitotecnia, na Universidade Federal de Viçosa, defendendo tese em dezembro de 1999.

CONTEÚDO

	Página
EXTRATO	viii
ABSTRACT	x
INTRODUÇÃO	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	3
TOLERÂNCIA DE GENÓTIPOS DE CAFÉ AO ALUMÍNIO PELO MÉTODO DO PAPEL-SOLUÇÃO	4
RESUMO	4
SUMMARY	5
INTRODUÇÃO	6
MATERIAL E MÉTODOS	8
RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
CONCLUSÕES	16
LITERATURA CITADA	16
CRESCIMENTO DA PLANTA E COLORAÇÃO DAS RAÍZES COM HEMATOXILINA COMO CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DE GENÓTIPOS DE CAFÉ QUANTO À TOLERÂNCIA À TOXIDEZ DE ALUMÍNIO	19
RESUMO	19
SUMMARY	20
INTRODUÇÃO	21
MATERIAL E MÉTODOS	23

	Página
RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
CONCLUSÕES	37
LITERATURA CITADA	38
ALTERAÇÃO DO pH DA RIZOSFERA DE GENÓTIPOS DE CAFÉ EM RESPOSTA AO ALUMÍNIO DO SOLO	41
RESUMO	41
SUMMARY	42
INTRODUÇÃO	42
MATERIAL E MÉTODOS	45
RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
CONCLUSÕES	53
LITERATURA CITADA	54
RESPOSTAS DE TRÊS CULTIVARES DE CAFÉ AO ALUMÍNIO TROCÁVEL EM COLUNAS DE SOLO.....	57
RESUMO	57
SUMMARY	58
INTRODUÇÃO	59
MATERIAL E MÉTODOS	61
RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
CONCLUSÕES	98
LITERATURA CITADA	98
RESUMO E CONCLUSÕES	103

EXTRATO

BRACCINI, Maria do Carmo Lana, Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2000. **Tolerância de genótipos de café ao alumínio em solução nutritiva e em solo**. Orientadora: Prof^a Herminia Emilia Prieto Martinez. Conselheiros: Prof. Paulo Roberto Gomes Pereira e Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães.

Foram conduzidos quatro experimentos em laboratório e em casa de vegetação para estudar a tolerância de genótipos de café ao alumínio. No primeiro experimento, vinte e seis genótipos de café foram avaliados pelo método do papel-solução. As sementes foram colocadas para germinar na ausência e na presença de Al, na concentração de 45 mg L^{-1} , e após quarenta e dois dias foi avaliado o comprimento da raiz principal. Os genótipos foram agrupados em quatro classes de tolerância em função do percentual de redução no comprimento da raiz principal. No segundo experimento, vinte e cinco genótipos de café foram estudados quanto à tolerância medida pela inibição no crescimento da parte aérea e das raízes e utilizando-se a técnica da hematoxilina. As plantas foram cultivadas em solução nutritiva na ausência e na presença de Al, na concentração de 8 mg L^{-1} durante 80 dias. Os resultados expressos em percentagem de inibição no comprimento da raiz principal causada pelo Al e no crescimento da parte aérea e das raízes, foram analisados pela técnica multivariada. Os genótipos foram separados nas classes tolerante, intermediária e sensível. Apenas três genótipos foram considerados

tolerantes ao Al e seis sensíveis, enquanto que a maioria deles pertence à classe intermediária. O teste de coloração com hematoxilina não foi adequado para selecionar genótipos tolerantes ao Al. Foi conduzido um terceiro experimento com o objetivo de avaliar a relação entre alteração do pH da rizosfera e tolerância ao Al, de cinco genótipos, na presença e na ausência de calagem. Utilizou-se a técnica do agar-indicador no qual uma fina camada de agar contendo indicador é derramada sobre a superfície do solo. Quando o solo foi corrigido, observou-se o desenvolvimento da coloração amarela próximo às raízes, indicando abaixamento do pH. Observou-se variação de 0,2 e 0,3 unidades de pH entre solo e rizosfera. Entretanto, na presença de Al não houve diferença entre pH do solo e da rizosfera, indicando que alteração no pH da rizosfera não parece ser o mecanismo de possível tolerância ao Al em cafeeiros. O quarto experimento teve como objetivo avaliar o crescimento da parte aérea e das raízes e a composição mineral de três cultivares de café, cultivados em coluna de solo, formada por três anéis, com diferentes saturações por Al na camada superficial e elevada acidez subsuperficial. A acidez foi neutralizada com doses de carbonatos de cálcio e de magnésio para reduzir a saturação por Al de 70 para 45, 29, 0 e 0%. Após oito meses de cultivo, foram avaliados produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes, comprimento e superfície das raízes em cada anel. Nos tecidos foram determinadas as concentrações de Al, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn. Tanto o cultivar sensível (Catuaí Vermelho – UFV 2147) quanto os tolerantes (Catuaí Amarelo – UFV 2149 e Icatu – IAC 4045) emitiram raízes em camadas de solo com alta saturação por Al. Entretanto, a elevada saturação por Al reduziu o comprimento e a superfície das raízes do cultivar Catuaí Vermelho. A calagem reduziu a concentração de Cu e de Zn na planta; desta forma, a produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes das cultivares Catuaí Vermelho e Icatu foi maior sem a correção da acidez do solo.

ABSTRACT

BRACCINI, Maria do Carmo Lana, Federal University of Viçosa, September of 2000. **Aluminum tolerance of coffee genotypes in nutrient solution and in soil.** Adviser: Prof. Herminia Emilia Prieto Martinez. Committee members: Prof. Paulo Roberto Gomes Pereira and Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães.

Four experiments were carried out in laboratory and in greenhouse with the purpose of evaluating coffee genotypes to aluminum tolerance. In the first experiment, twenty six coffee genotypes were evaluated by the solution-paper method. Seeds were germinated in the presence and absence of 45 mg L^{-1} of Al, and after forty two days the main root length was evaluated. The genotypes were classified into four tolerance groups as function of the percentage of main root length reduction. In the second experiment, twenty five coffee genotypes were evaluated in relation to Al tolerance measuring root and shoot growth inhibition and by hematoxylyn staining test. Plants were cultivated in nutrient solution in the presence and absence of Al, with 8 mg L^{-1} concentration, during eighty days. The results were expressed in percentage of reduction of main root length caused by Al and root and shoot dry biomass production was analyzed by the multivariate technique. The genotypes were classified in tolerant, intermediate and susceptible to Al. Only three genotypes were classified as Al tolerant, and six were susceptible, while most of the genotypes were scored in the intermediate

class. The hematoxylin staining test was not suitable for assessment of Al tolerance. The third experiment was carried out to evaluate the relationship between rhizosphere-pH and aluminum tolerance of five coffee genotypes, grown with or without soil liming. To make use of agar technique in which a solid agar layer with pH indicator was placed on the surface of soil and roots. When the soil was limed, were observed the development of yellow color near roots indicating a pH decrease. Were observed soil and rhizosphere-pH changes, varying between 0,2 and 0,3 units of pH. On the other hand, in the presence of Al was not observed differences among soil and rhizosphere-pH, indicating that root-induced pH changes seems not to be the Al tolerance mechanism in coffee plants. The fourth experiment was carried out with the purpose of evaluate the shoot and root growth and nutrient uptake of three coffee cultivars, in relation to different aluminum saturation in the surface layer and high subsurface acidity in soil columns. The soil acidity was neutralized using CaCO_3 and MgCO_3 doses to reduce Al saturation from 70 to 45, 29, 0 e 0%. The coffee plants were grown for eight months and after that the shoot and root dry biomass production, root length and surface in each PVC cylinders were evaluated. The Al, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu and Zn concentrations were evaluated in plant tissue. Both Al-sensitive (Catuaí Vermelho – UFV 2147) and tolerant cultivars (Catuaí Amarelo – UFV 2149 e Icatu – IAC 4045) grew root into soil layer with high Al saturation, but reducing root length and surface of Catuaí Vermelho cultivar. The liming caused reduction in Cu and Zn concentrations of plant. Therefore, shoot and root dry biomass of Catuaí Vermelho and Icatu cultivars was greater without liming.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a cafeicultura tem se expandido para a região do cerrado brasileiro, em solos com fertilidade extremamente baixa, acidez elevada, baixos teores de matéria orgânica, fósforo, cálcio, e de micronutrientes. No entanto têm se mostrado aptos a uma cafeicultura altamente tecnificada, mas requerendo o uso intensivo de corretivos e fertilizantes. Além disso, o café produzido nessa região é considerado um dos melhores do mundo, dadas as condições de clima extremamente favoráveis, com déficit hídrico elevado por ocasião da colheita.

A prática da calagem é eficiente para elevar o pH, os teores de cálcio e magnésio, a saturação de bases e reduzir a toxidez de alumínio e manganês no solo. Entretanto, essas alterações restringem-se à camada de solo corrigida devido à pouca movimentação de cálcio no solo (CHAVES et al., 1988). Esta característica da calagem pode causar problemas sérios em condições de baixo teor de cálcio e alta concentração de alumínio trocável na subsuperfície do solo.

A presença de alumínio em níveis tóxicos pode causar distúrbios citológicos, fisiológicos e bioquímicos no sistema radicular, impedindo o seu aprofundamento em camadas inferiores do solo, tornando-o ineficiente quanto à absorção de água e nutrientes (MARSCHNER, 1995).

A possibilidade de obtenção de plantas capazes de emitirem raízes mais profundas nessas condições, dada a variabilidade genética geralmente encontrada

dentro de uma espécie, parece ser forma mais eficiente e econômica de contornar o problema, principalmente em regiões onde ocorrem períodos de estiagens prolongados.

Em trabalhos anteriores conduzidos por BRACCINI et al. (1998), realizados em solução nutritiva, já foi constatada a existência de diferença entre genótipos de cafeeiros quanto à tolerância ao alumínio. Em condições de campo, algumas variedades de café possuem a capacidade de aprofundar suas raízes em subsolos ácidos, evidenciando certa tolerância ao alumínio.

Para explicar a tolerância das plantas ao excesso de alumínio, mecanismos de tolerância por exclusão e de tolerância interna têm sido propostos, entre eles mudanças no pH da rizosfera. As plantas podem aumentar o pH da rizosfera e desta forma reduzir a presença de espécies iônicas tóxicas de alumínio no solo (GAHOONIA, 1993).

Na caracterização de genótipos tolerantes ao alumínio é possível empregar diferentes procedimentos de seleção. Os mais simples são baseados em observações visuais dos sintomas de toxidez ou em medidas do crescimento da parte aérea e raízes, como comprimento, biomassa, área foliar, entre outras.

Este trabalho teve como objetivo estudar o comportamento de genótipos de café, quanto à tolerância ao alumínio, pelo método do papel-solução, coloração das raízes com hematoxilina e crescimento das plantas em solução nutritiva e em solo.

Foram conduzidos quatro experimentos, cada um constituiu um artigo da tese que seguem as normas da Revista Brasileira de Ciência do Solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRACCINI, M.C.L., MARTINEZ, H.E.P., PEREIRA, P.R.G., SAMPAIO, N.F., SILVA, E.A.M. Tolerância de genótipos de cafeeiro ao alumínio em solução nutritiva: I Crescimento e desenvolvimento da parte aérea e sistema radicular. **Rev. Bra. Ci. Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p.435-442, 1998.
- CHAVES, J.C.D., PAVAN, M.A., MIYAZAWA, M. Redução da acidez subsuperficial em coluna de solo. **Pesq. Agropec. Bras.**, Brasília, v.23, n.5, p.469-476, 1988.
- GAHOONIA, T.S. Influence of root-induced pH on the solubility of soil aluminium in the rhizosphere. **Plant Soil**, Dordrecht, v.149, n.2, p.289-291, 1993.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. London: Academic Press, 1995. 889p.

TOLERÂNCIA DE GENÓTIPOS DE CAFÉ AO ALUMÍNIO PELO MÉTODO DO PAPEL-SOLUÇÃO

RESUMO

A presença de alumínio trocável, em níveis tóxicos, é um fator limitante na produtividade das culturas em regiões de solos com elevada acidez. Dois experimentos foram conduzidos, em germinador, com o objetivo de avaliar o comportamento de vinte e seis genótipos de café quanto à toxidez de Al utilizando o método do papel-solução. Com a finalidade de determinar a concentração adequada de Al para discriminar as diferenças na tolerância, sementes de dois genótipos de café foram submetidas a níveis crescentes de Al (0, 25, 35 e 65 mg L⁻¹) pela técnica do papel-solução e, após quarenta dias, foi avaliado o comprimento da raiz principal. O genótipo de catuai vermelho LCH 2077-2-5-15 (UFV 2237) mostrou-se mais sensível ao Al do que o catimor (Caturra vermelho x Híbrido de Timor - UFV 2880) e a concentração de 35 mg L⁻¹ permitiu boa discriminação quanto à tolerância. No segundo experimento, sementes de vinte e seis genótipos de café foram submetidas à ausência e presença de Al, na concentração de 45 mg L⁻¹, pela mesma técnica, avaliando-se o comprimento da raiz principal aos quarenta e dois dias de idade. Os genótipos foram agrupados em quatro classes de

tolerância, pela técnica multivariada de análise de agrupamento, em função do percentual de variação no comprimento da raiz principal.

Termos de indexação: *Coffea arabica* L., *C. canephora* Pierre, técnica de seleção, toxidez de alumínio.

SUMMARY: *ALUMINUM TOLERANCE OF COFFEE GENOTYPES USING THE SOLUTION-PAPER METHOD*

Toxic levels of exchangeable aluminum is a restricting factor of crop growth in acid soils. Two experiments were carried out in a germination chamber with the objective to select coffee genotypes for aluminum (Al) tolerance and to evaluate the response of twenty-six genotypes using the solution-paper method. The first experiment was carried out to determine the adequate Al concentration to differentiate tolerance levels. Seeds of two genotypes were submitted to increasing Al levels (0, 25, 35 and 65 mg L⁻¹) using the solution-paper method followed by the determination of the primary root length after 40 days of sowing. The genotype catuai vermelho LCH 2077-2-5-15 (UFV 2237) was more sensitive to Al toxicity than the catimor (Caturra vermelho x Híbrido de Timor - UFV 3880) and the concentration of 35 mg L⁻¹ allowed good differentiation for tolerance. In the second experiment, seeds of twenty-six coffee populations were submitted to zero (control) and 45 mg L⁻¹ of Al using the solution-paper method and followed by the determination of the primary root length after 42 days. Coffee genotypes were classified into four tolerance groups using multivariate analysis technique, in relation to reduction percentage of primary root length.

Index terms: Coffea arabica L., *C. canephora* Pierre, screening technique, aluminum toxicity.

INTRODUÇÃO

A produção de café em solos ácidos pode ser reduzida por altas concentrações de alumínio (Al) trocável e, ou, baixa saturação por bases (Pavan & Bingham, 1982). Na maioria das vezes, o problema é contornado com a aplicação de calcário aos solos. No entanto, a correção da toxidez de Al nos horizontes inferiores fica comprometida. A alternativa que oferece maiores possibilidades de sucesso é a correção superficial dos solos, juntamente com a utilização de espécies e/ou variedades tolerantes à toxidez de Al. Muitos pesquisadores têm relatado que espécies de plantas e genótipos dentro de espécies diferem amplamente quanto à tolerância ao estresse de Al (Furlani & Clark, 1981; Foy, 1988), e que plantas tolerantes a Al podem ser uma alternativa à calagem (Howeler, 1987).

Encontra-se na literatura grande número de publicações sobre toxidez de Al em diversas espécies de interesse econômico. Entretanto, trabalhos específicos para o cafeeiro são escassos. Estudos realizados por Pavan & Bingham (1982), Londoño & Valencia A. (1983), Passo & Ruiz (1995), Rodrigues (1997) e Braccini et al. (1998) mostraram que o Al afeta a absorção de nutrientes, o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea e que existe comportamento diferente entre genótipos quanto à tolerância a Al.

A redução no crescimento radicular pode ser devido a uma forma específica ou várias formas de alumínio, algumas de detecção difícil face à complexidade dos métodos analíticos. Além disso, a presença de complexos orgânicos com Al pode afetar a avaliação de sua toxidez. Desta forma, a utilização de testes biológicos é uma alternativa para avaliar a fitotoxidez de Al. Ritchey et al. (1988) descreveram dois testes relativamente simples, baseados no crescimento radicular de plântulas de trigo e sorgo, com a finalidade de identificar tanto a deficiência de Ca como a toxicidade de Al em diferentes solos. Os resultados foram obtidos em apenas quatro dias após o transplântio das plântulas.

Considerando que café é cultura perene e que apresenta, portanto, taxa de crescimento muito lenta, a utilização de testes rápidos realizados em câmara de

crescimento ou casa de vegetação visando avaliar o efeito da toxidez de Al são de grande importância.

Wheeler et al. (1993) compararam cinco técnicas para avaliar a tolerância de genótipos de trigo em solução nutritiva, por meio do comprimento de raiz e da coloração das raízes com hematoxilina após três dias de exposição ao Al. Após quatro semanas de crescimento avaliou-se a produção de biomassa seca da parte aérea e raízes, comprimento de raiz e observação visual dos danos causados pelo Al. Dentre os métodos utilizados, a coloração com hematoxilina e observação visual de toxidez causada pelo Al foram os mais eficientes na identificação das plantas tolerantes e sensíveis.

A maioria das técnicas disponíveis, para selecionar genótipos quanto à tolerância ao Al, são baseadas em observações do crescimento das raízes em solução nutritiva. Entretanto, existe a necessidade de rigoroso controle do pH para manter constante a concentração de Al durante o teste.

Para contornar esse problema, Konzak et al. (1976) utilizaram com bastante sucesso o método do papel-solução, para avaliar a tolerância ao Al em diferentes espécies, ou seja, trigo, cevada, arroz, sorgo, milho e soja com base em medidas de comprimento da raiz. As vantagens deste procedimento estão relacionadas à facilidade no controle do pH, simplicidade do método e economia de tempo. Portanto, a escolha de características simples de serem avaliadas e suficientemente sensíveis para detectar diferenças na tolerância e utilização de métodos que possibilitem a seleção de grande número de espécies e/ou genótipos, em pequeno espaço físico e curto período de tempo, tornam-se altamente relevantes.

Os objetivos deste trabalho foram: 1) utilizar o método do papel-solução para avaliar a tolerância a Al de vinte e seis genótipos de café, 2) determinar a concentração adequada de Al para otimização desse método visando observar diferenças na tolerância.

MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente foi conduzido um teste preliminar com a finalidade de determinar a concentração adequada de Al para discriminar os genótipos de café quanto à tolerância, utilizando o método do papel-solução (Konzak et al. 1976).

O experimento foi conduzido em germinador mantendo-se a temperatura constante de 30°C, sendo cada parcela constituída de rolo de papel contendo vinte e cinco sementes. Os tratamentos consistiram de quatro níveis de Al (0, 25, 35 e 65 mg L⁻¹ de Al na forma de AlCl₃) e dois genótipos de café, UFV 2237 (Catuaí Vermelho - LCH 2077-2-5-15) e UFV 3880 (Catimor – Descendência de UFV 1603), dispostos no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. O potencial osmótico foi mantido constante e igual ao nível obtido para o tratamento com 65 mg L⁻¹ de Al, utilizando-se polietileno glicol (PEG 6000). As concentrações de PEG foram determinadas pela equação proposta por Michel & Kaufmann (1973), e corresponderam as seguintes doses (g L⁻¹): 25,0; 16,6; 13,1 e 0,0, respectivamente, para os quatro níveis de Al.

As sementes sem o pergaminho foram semeadas entre três folhas de papel-toalha, previamente umedecidas na solução teste. A solução nutritiva utilizada para embeber o papel foi a seguinte: MgSO₄ 0,1 mmol L⁻¹; KNO₃ 0,1 mmol L⁻¹; NH₄NO₃ 0,15 mmol L⁻¹; KHC₈H₄O₈ 8,0 mmol L⁻¹; além das diferentes concentrações de Al. Em função do curto período de cultivo, o fósforo foi omitido para evitar precipitação com Al. As soluções tiveram o pH corrigido para 4,0 e utilizou-se o biftalato de potássio para manter o pH em torno deste valor durante o experimento.

Para evitar o crescimento de fungos foi adicionado à solução nutritiva o fungicida Captan a 0,2%. Os rolos de papel foram colocados no interior de vasos contendo 250 mL de solução e mantidos no escuro. Após quinze dias, os rolos de papel foram abertos e as radículas direcionadas para baixo. Das quarenta sementes inicialmente colocadas para germinar foram eliminadas aquelas não germinadas, deixando-se 25 sementes por rolo. Aos quarenta dias foi avaliado o comprimento da raiz principal. Os dados foram submetidos à

análise de variância e regressão, determinando-se a concentração adequada de Al a ser utilizada no ensaio seguinte.

No segundo experimento, vinte e seis genótipos de café (Quadro 1) foram submetidos à ausência e presença de Al, na concentração de 45 mg L⁻¹, utilizando-se o método descrito anteriormente. Na ausência de Al a pressão osmótica foi ajustada com PEG 6000 na concentração de 18,5 g L⁻¹. O comprimento da raiz principal foi avaliado aos quarenta e dois dias após sua instalação.

Os tratamentos foram distribuídos no esquema fatorial 26 x 2 (genótipos x níveis de Al) e dispostos no delineamento em blocos casualizados, com quatro repetições. Os genótipos foram agrupados em diferentes classes de tolerância, em função da variação percentual no comprimento de raiz $\{\%RCR = [1 - (\text{Crescimento com Al} / \text{Crescimento sem Al})] \times 100\}$, pela técnica multivariada de análise de agrupamento, segundo o método de otimização de Tocher (Cruz & Regazzi, 1994). Utilizou-se como medida de dissimilaridade, para o agrupamento dos genótipos, a distância Euclidiana. A dissimilaridade entre genótipos foi representada em gráfico de dispersão, em espaço bidimensional, sendo as coordenadas estimadas de acordo com Cruz & Viana (1994).

Quadro 1 - Identificação e origem dos genótipos de café utilizados no experimento

Identificação	Origem do Material	Variedade/Híbrido
01 - UFV 2144	IAC LCH 2077-2-5-44	Catuaí Vermelho
02 - UFV 2145	IAC LCH 2077-2-5-81	Catuaí Vermelho
03 - UFV 2147	IAC LCH 2077-2-5-99	Catuaí Vermelho
04 - UFV 2237	IAC LCH 2077-2-5-15	Catuaí Vermelho
05 - UFV 2149	IAC LCH 2077-2-12-91	Catuaí Amarelo
06 - UFV 2150	IAC LCMP 376-4-32	Mundo Novo
07 - UFV 2163	IAC LCP 388-17-16	Mundo Novo
08 - UFV 2164	IAC LCMP 515-3	Mundo Novo
09 - UFV 1340	UFV 386-19*	Catimor
10 - UFV 1603	UFV 395-141*	Catimor
11 - UFV 2877	2 IV EP21.2	Catimor
12 - UFV 2859	124 EP 20.1	Catimor
13 - UFV 3869	202 EP 20.1	Catimor
14 - UFV 3880	232 T15 PN	Catimor
15 - UFV 3092	IAC 2942	Icatu Vermelho
16 - UFV 2953	IAC 4040	Icatu Vermelho
17 - UFV 2954	IAC 4042	Icatu Vermelho
18 - UFV 2955	IAC 4045	Icatu Vermelho
19 - UFV 2956	IAC 4782	Icatu Vermelho
20 - H 418-3	UFV 2143-235 x UFV 443-01	Catuaí Vermelho x Híbrido de Timor
21 - H 418-6	UFV 2143-235 x UFV 443-01	Catuaí Vermelho x Híbrido de Timor
22 - H 464-5	UFV 2190-100 x UFV 440-22	Mundo Novo x Híbrido de Timor
23 - H 484-2	UFV 2164-193 x UFV 443-03	Mundo Novo x Híbrido de Timor
24 - UFV 534	CIFC 19/1	Caturra Vermelho
25 - UFV 514	<i>Coffea canephora</i>	Guarini
26 - UFV 1359	UFV 386-45*	Catimor

* Geração F₃ de CIFC HW26/5 (CIFC 19/1 – Caturra Vermelho x CIFC 832/1 – Híbrido de Timor).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A presença do Al afetou o comprimento da raiz principal e das laterais que apresentaram engrossamento e amarelecimento das pontas. Os sintomas de toxidez de Al observados concordam com os relatados por Pavan e Bingham (1982) e Braccini et al. (1998) para café.

No teste preliminar o genótipo de Catuaí - UFV 2237 mostrou-se mais sensível ao Al do que o de Catimor - UFV 3880, apresentando redução mais acentuada no comprimento de raiz em função dos níveis crescentes de Al (Figura 1). A mesma tendência foi constatada por Braccini et al. (1998).

Apenas na concentração de 35 mg L⁻¹ foi possível separar os genótipos quanto à tolerância ao Al, enquanto que acima e abaixo deste valor não houve diferença estatística entre os genótipos. De acordo com Macedo et al. (1997) um dos principais problemas encontrados na seleção de plantas quanto à tolerância ao Al seria ajustar o nível de estresse de forma a produzir uma acentuada redução no crescimento da maioria das plantas sensíveis, porém limitado efeito sobre o crescimento dos genótipos tolerantes. Konzak et al. (1976) verificaram que a concentração de Al requerida para produzir efeitos tóxicos em plântulas de soja, pela técnica do papel-solução, foi cerca de dez vezes maior do que a utilizada em solução nutritiva. Braccini et al. (1998) utilizaram a concentração de 8 mg L⁻¹ de Al, em solução nutritiva, para selecionar nove genótipos de café quanto à tolerância ao Al. Concentrações muito elevadas ou muito baixas deste elemento tendem a eliminar diferenças entre os genótipos. Portanto, procurando-se manter uma margem de segurança, optou-se pela concentração de 45 mg L⁻¹ para classificar 26 genótipos de café quanto à tolerância ao Al, no segundo experimento.

O sistema radicular dos vinte e seis genótipos de café apresentou comprimento variando de 2,58 a 4,49 cm, na ausência de Al e de 1,38 a 4,10 cm na presença, atingindo um percentual de redução no comprimento de até 53,6%, embora

tenha sido constatado, para quatro genótipos de café, pequeno aumento no crescimento do sistema radicular, na presença de Al (Quadro 2).

Nuernberg et al. (1990) salientaram que o comprimento de raiz não deve ser usado como valor absoluto para procedimentos de “screening”, pois não permite uma separação clara entre cultivares tolerantes e sensíveis, assim como, a produção de biomassa seca da parte aérea e raízes. Desta forma, os dados de comprimento de raiz foram expressos em percentagem de redução ou aumento, causado pelo Al em relação ao tratamento controle (sem Al).

Visando simplificar a interpretação dos resultados, os vinte e seis genótipos de café foram reunidos em grupos com padrão de comportamento similar pela análise de agrupamento. Em decorrência da análise por este método, foram formados quatro grupos distintos quanto à tolerância ao Al, em função do percentual de variação no comprimento da raiz principal (Quadro 3). O grupo I, composto por quatro genótipos, com percentual médio de variação no comprimento da raiz de 49,1%, foi classificado como sensível. O genótipo IAC 4045 apresentou um aumento de 15,9% no comprimento de raiz, constituindo o grupo tolerante. Pelo fato de apresentar tolerância superior ao demais formou um grupo à parte o qual poderia ser classificado como muito tolerante.

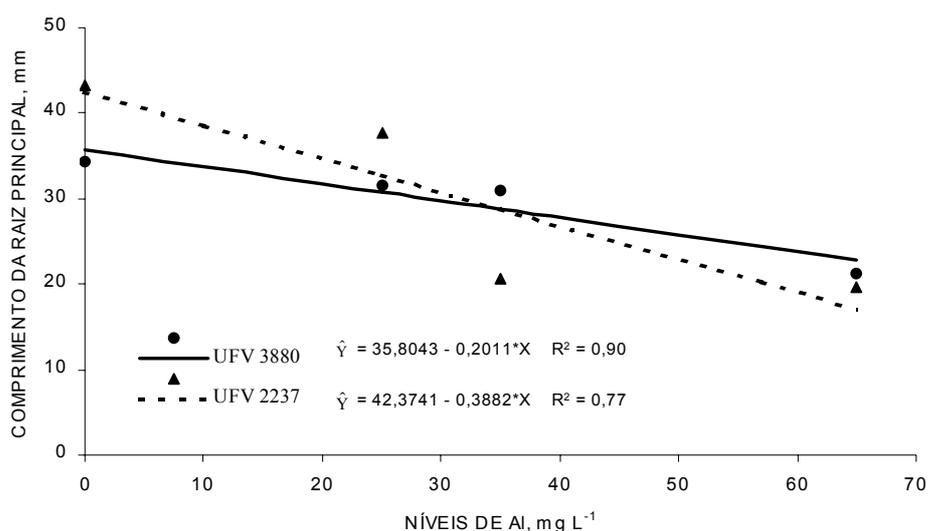


Figura 1 - Comprimento da raiz principal das plântulas de dois genótipos de café, submetidos a níveis crescentes de alumínio pelo método do papel-solução, no teste preliminar.

Quadro 2 - Comprimento da raiz principal e percentual de variação no comprimento das raízes das plântulas de vinte e seis genótipos de café, na ausência e presença de Al pelo método do papel-solução

Genótipo	Comprimento de raiz		Variação
	- Al	+ Al	
	----- cm -----		---- % ----
01 - UFV 2144	3,81	3,40	-10,57
02 - UFV 2145	4,41	3,62	-17,81
03 - UFV 2147	3,68	3,78	+2,92
04 - UFV 2237	4,26	3,77	-11,44
05 - UFV 2149	4,49	3,82	-14,87
06 - UFV 2150	4,34	3,13	-27,84
07 - UFV 2163	3,40	2,72	-20,12
08 - UFV 2164	3,70	3,11	-15,95
09 - UFV 1340	3,99	4,07	+1,88
10 - UFV 1603	3,01	2,50	-17,00
11 - UFV 2877	3,87	1,79	-53,59
12 - UFV 2859	2,58	2,09	-18,72
13 - UFV 3869	2,97	1,38	-53,61
14 - UFV 3880	3,42	1,95	-42,98
15 - UFV 3092	3,83	3,37	-11,89
16 - UFV 2953	3,85	3,64	-5,33
17 - UFV 2954	4,41	3,36	-23,78
18 - UFV 2955	3,54	4,10	+15,88
19 - UFV 2956	3,70	3,69	-0,07
20 - H 418-3	4,04	3,24	-19,85
21 - H 418-6	3,51	3,65	+4,13
22 - H 464-5	3,97	3,85	-2,84
23 - H 484-2	3,13	2,63	-15,75
24 - UFV 534	4,20	2,26	-46,07
25 - UFV 514	4,24	3,02	-28,86
26 - UFV 1359	3,21	3,04	-5,30
Média	3,75	3,12	-17,86

Os grupos II e III estão numa situação intermediária entre os grupos I (sensível) e IV (tolerante). Dos vinte e seis genótipos, dezoito foram incluídos no grupo III, apresentando redução média no comprimento da raiz principal de 9,9%, sendo classificados como moderadamente tolerante e o grupo II, constituído por apenas três genótipos, com redução média de 26,8%, foi classificado como moderadamente sensível.

Na figura 2 estão representados o agrupamento e a dispersão gráfica dos vinte e seis genótipos com base nas coordenadas estimadas pela matriz de dissimilaridade de acordo com Cruz & Viana (1994).

Com base na percentagem de inibição do crescimento da maior raiz dos cultivares de sorgo tolerante e sensível ao Al, Cambraia et al. (1991), estabeleceram um sistema de classificação arbitrária em que os cultivares que tivessem uma percentagem de inibição menor que 27% seriam considerados tolerantes, entre 27 e 69% intermediários, e acima de 69% sensíveis.

Quadro 3 - Grupos com comportamentos similares, estabelecidos pelo método de otimização de Tocher, com base na distância Euclidiana, em função da variação relativa do comprimento da raiz principal, de vinte e seis genótipos de café, submetidos a ausência e presença de Al pelo método do papel-solução

Grupos	Classe ⁽¹⁾	Varição	Genótipo ⁽²⁾
		-- % --	
I	S	-49,1	11, 13, 24, 14
II	MS	-26,8	6, 25, 17
III	MT	-9,9	16, 26, 22, 19, 9, 3, 21, 1, 4, 15, 5, 23, 8, 10, 2, 12, 20, 7
IV	T	+15,9	18

⁽¹⁾ S = Sensível; MS = Moderadamente Sensível; MT = Moderadamente Tolerante; T = Tolerante.

⁽²⁾ 1 (UFV 2144), 2 (UFV 2145), 3 (UFV 2147), 4 (UFV 2237), 5 (UFV 2149), 6 (UFV 2150), 7 (UFV 2163), 8 (UFV 2164), 9 (UFV 1340), 10 (UFV 1603), 11 (UFV 2877), 12 (UFV 2859), 13 (UFV 3869), 14 (UFV 3880), 15 (UFV 3092), 16 (IAC 4040), 17 (IAC 4042), 18 (IAC 4045), 19 (IAC 4782), 20 (H 418-3), 21 (H 418-6), 22 (H 464-5), 23 (H 484-2), 24 (UFV 534), 25 (UFV 514), 26 (UFV 1359).

Genótipos de café que apresentaram redução no crescimento radicular superior a 43% foram classificados como sensíveis ao Al.

O grupo sensível é constituído por três genótipos de Catimor e um de Caturra Vermelho. O Catimor é um cultivar originado de hibridação entre o Caturra Vermelho e o Híbrido de Timor. O Híbrido de Timor participou da origem dos quatro híbridos avaliados neste trabalho, os quais apresentaram comportamento mais tolerante. Portanto, esta maior sensibilidade da população de Catimor deve-se, provavelmente, a participação do cultivar Caturra na sua origem, uma vez que o Caturra Vermelho utilizado foi sensível ao Al.

De forma geral, os cultivares de Catuaí, de Icatu e os híbridos foram mais tolerantes ao Al.

Dos nove genótipos de café estudados por Braccini et al. (1998) em solução nutritiva, na ausência e na presença de Al, sete também foram avaliados pelo método do papel-solução. Quatro genótipos tiveram comportamento semelhante em ambos os trabalhos enquanto que três apresentaram resultados bastante contraditórios. Os Catuaís (UFV 2147 e UFV 2237) que no trabalho anterior foram classificados como sensíveis ao Al, no presente trabalho, pertencem à classe tolerante. Outro cultivar que apresentou resultado diferente foi o Catimor (UFV 2877) que era considerado moderadamente tolerante ao Al, e pela técnica do papel solução foi classificado como sensível. Tal resultado pode ser devido ao fato de haver 5 a 15% de fertilização cruzada em *Coffea arabica*, podendo 5 a 15% das sementes apresentarem genótipo diferente do apresentado pela planta mãe. De qualquer modo, seria interessante avaliar novamente os genótipos UFV 2147, UFV 2237 e UFV 2877 pelo método do papel-solução e confirmar seu comportamento. De toda maneira, a diversidade genética apresentada pelos genótipos pode ser explorada em programas de melhoramento para desenvolver genótipos tolerantes à solos ácidos.

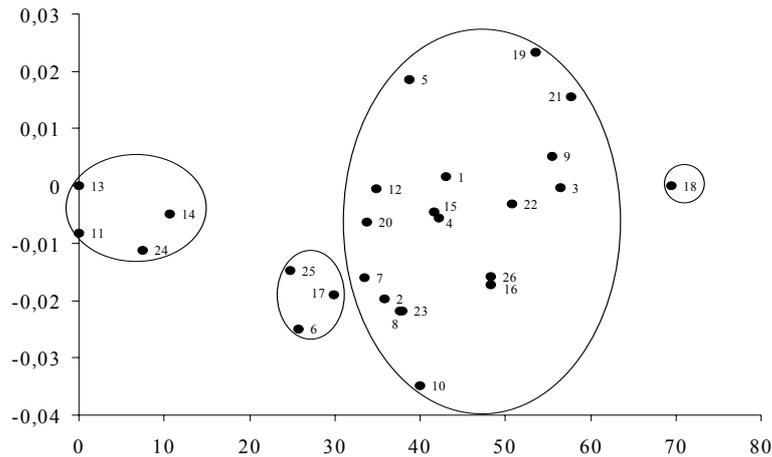


Figura 2 - Dispersão de vinte e seis genótipos de café, em função do percentual de variação do comprimento da raiz principal, por meio da projeção de distâncias no plano, com base na distância Euclidiana.

CONCLUSÕES

1. Os genótipos de café estudados foram afetados pela toxidez de Al.
2. A metodologia empregada permitiu selecionar um grande número de genótipos de café em curto período de tempo e apresentar os resultados de forma resumida e simplificada.
3. A concentração de Al de 45 mg L^{-1} , utilizando a técnica do papel-solução, foi adequada para detectar diferenças entre os genótipos.
4. Quatro genótipos foram classificados como sensíveis ao Al, dentre eles três Catimor (UFV 2877, UFV 3869 e UFV 3880) e um Caturra Vermelho (UFV 534).
5. O Mundo Novo (UFV 2150), o Icatu Vermelho (IAC 4042) e o Guarini (UFV 514) pertenceram à classe moderadamente sensível.
6. O Icatu Vermelho (IAC 4045) foi o genótipo mais tolerante ao Al, enquanto que a grande maioria foi classificada como moderadamente tolerante.

LITERATURA CITADA

- BRACCINI, M.C.L.; MARTINEZ, H.E.P.; PEREIRA, P.R.G.; SAMPAIO, N.F. & SILVA, E.A.M. Tolerância de genótipos de cafeeiro em solução nutritiva: I. crescimento e desenvolvimento da parte aérea e sistema radicular. R. Bras. Ci. Solo, 22:435-442, 1998.
- CAMBRAIA, J.; SILVA, M.A.; CANO, M.A.O. & SANT'ANNA, R. Método simples para a avaliação de cultivares de sorgo quanto a tolerância ao alumínio. Rev. Bras. Fisiol. Veg., 3:87-95, 1991.
- CRUZ, C.D. & REGAZZI, A.J. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Viçosa, Imprensa Universitária, 1994. 390 p.
- CRUZ, C.D. & VIANA, J.M.S. A methodology of genetic divergence analysis based on sample unit projection on two-dimensional space. Revista Brasileira de Genética, 17:69-73, 1994.
- FOY, C.D. Plant adaptation to acid aluminum-toxic soils. Comm. Soil Sci. Plant An., 19:959-987, 1988.
- FURLANI, P.R. & CLARK, R.B. Screening sorghum for aluminum tolerance in nutrient solutions. Agr. J., 73:587-594, 1981.
- HOWELER, R.H. Effective screening techniques for tolerance to aluminum toxicity. In: L.M. Gourley e J.G. Salinas (Ed.). Sorghum for acid soils. Cali, CIAT, 1987. p.173-186.
- KONZAK, C.F.; POLLE, E. & KITTRICK, J.A. Screening several crops for aluminum tolerance. In: WRIGHT, M.J. & FERRARI, A.S. eds. Proc. of workshop on plant adaptation to mineral stress in problem soils. Ithaca, Cornell Univ. Press, 1976. p. 311-327.
- LONDOÑO, M.E.A & VALENCIA-ARISTIZÁBAL, G. Toxicidad de aluminio en plantas de café. Cenicafé, 34:61-97, 1983.
- MACEDO, C.C.; KINET, J.M. & Van SINT JAN, V. Effects of duration and intensity of aluminum stress on growth parameters in four genotypes differing in aluminum sensitivity. J. Plant Nutr., 20:181-193, 1997.
- MICHEL, B.E. & KAUFMANN, M.R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. Plant Physiol., 51:914-916, 1973.
- NUERNBERG, N.J.; BISSANTI, C.A.; CAMPBELL, T.A. & FOY, C.D. Screening pasture plants for aluminum tolerance. In: El BASSAM, N.;

- DAMBROTH, M.; LOUGHMAN, B.C. eds. Genetic aspects of plant mineral nutrition. Wageningen, Kluwer Academic Publishers, 1990. p.203-208.
- PASSO, R.R. & RUIZ, H.A. Tolerância dos cafeeiros conilon e catuaí à toxidez causada pelo alumínio e manganês. R. Ceres, 42:45-52, 1995.
- PAVAN, M.A. & BINGHAM, F.T. Toxicity of aluminum to coffee seedlings in nutrient solution. Soil Sci. Soc. Am. J., 46:993-997, 1982.
- RITCHEY, K.D.; SOUSA, D.M.G. & RODRIGUES, G.C. Testes biológicos para diagnóstico da deficiência de cálcio e toxicidade de alumínio em solos. R. Bras. Ci. Solo, 12:113-120, 1988.
- RODRIGUES, L.A. Crescimento e composição mineral na parte aérea e nas raízes de duas variedades de café em resposta à calagem na subsuperfície do solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 89p. (Tese de Mestrado)
- WHEELER, D.M.; EDMEADES, D.C.; CHRISTIE, R.A. & GARDNER, R. Comparison of techniques for determining the effect of aluminum on the growth of, and the inheritance of aluminum tolerance in wheat. In: RANDALL, P.J.; DELHAIZE, E.; RICHARDS, R.A.; MUNNS, R. eds. Genetic aspects of plant mineral nutrition. Wageningen, Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 203-208.

**CRESCIMENTO DA PLANTA E COLORAÇÃO DAS RAÍZES COM
HEMATOXILINA COMO CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DE
GENÓTIPOS DE CAFÉ QUANTO À TOLERÂNCIA
À TOXIDEZ DE ALUMÍNIO**

RESUMO

A seleção de plantas tolerante ao Al é uma alternativa para solos que apresentam Al em níveis tóxicos. Neste contexto, vinte e cinco genótipos de café foram estudados quanto à tolerância ao Al avaliada pela inibição no crescimento da parte aérea e das raízes e pelo teste de coloração das raízes com hematoxilina. Avaliou-se, também, alocação do Al nos tecidos radiculares. Após 35 e 75 dias de cultivo em solução nutritiva, na ausência ou presença de Al, foi avaliado o comprimento da raiz principal e, aos 80 dias, a produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes. Os resultados expressos em percentagem de inibição causada pelo Al, foram analisados pela técnica multivariada e os genótipos separados nas classes tolerante, intermediária e sensível. O teste de coloração com hematoxilina foi realizado após 80 dias de cultivo em solução nutritiva e os genótipos foram avaliados de acordo com a intensidade de coloração da ponta da raiz. Apenas três genótipos foram tolerantes ao Al e seis foram sensíveis, enquanto que a maioria deles pertence à classe intermediária. O teste de coloração com hematoxilina não foi adequado para selecionar os genótipos. No genótipo mais tolerante, o Al acumulou-se apenas nas células

epidérmicas. Enquanto que no genótipo de tolerância intermediária observou-se acúmulo de Al nas células epidérmicas e em várias camadas de células do córtex.

Termos de indexação: *Coffea arabica* L., *C. canephora* Pierre, seleção, estresse, solos ácidos.

SUMMARY: *PLANT GROWTH AND ROOT HEMATOXYLIN STAINING TO EVALUATE ALUMINUM TOXICITY TOLERANCE OF COFFEE GENOTYPES*

The screening of plants for aluminum tolerance is an alternative to soils with toxic levels of this element. Twenty five coffee genotypes were evaluated for aluminum tolerance in relation to inhibition of shoot and root growth and by the hematoxylin staining test. The aluminum accumulation in root tissues was also evaluated. After 35 and 75 days of plant growth in nutrient solution with and without aluminum the length of main root was evaluated and after 80 days of exposure to Al the dry biomass of shoot and roots. The percentage of inhibition promoted by aluminum was analyzed by the multivariate technique and the genotypes were classified in tolerant, intermediate and susceptible. The hematoxylin staining test was conducted after 80 days of plant development in nutrient solution and the genotypes were evaluated by the intensity of root tip staining. The results indicated that only three genotypes were classified as Al tolerant, and six were susceptible, while most of the genotypes were scored in the intermediate class. The hematoxylin staining test was not suitable for assessment of Al tolerance. The Al accumulation in the most tolerant genotype was only observed in the epidermal cells, while in the genotypes classified in the intermediate class there was Al accumulation in the epidermal cells and in several layers of cortex cells.

Index terms: Coffea arabica L., *C. canephora* Pierre, screening technique, stress, acid soils.

INTRODUÇÃO

A presença de Al em níveis tóxicos nas camadas subsuperficiais pode limitar o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas, tornando-as menos tolerantes às condições de déficit hídrico.

O problema da toxicidade de Al e deficiência de Ca no subsolo pode ser contornado ou reduzido de várias formas, incluindo o movimento do Ca aplicado na camada arável (Chaves et al., 1988; Guimarães, 1992) ou pelo uso de cultivares tolerantes (Taylor, 1991). Em muitos solos, a calagem aplicada na superfície causa pouca movimentação de Ca e elevação do pH para neutralizar o Al no subsolo (Chaves et al., 1988). Uma alternativa é a correção superficial do solo, como usualmente é feita e a utilização de variedades que possuam a capacidade de emitir raízes em subsolos com Al em níveis tóxicos (Taylor, 1991; Foy, 1997).

Na caracterização de genótipos tolerante a Al existem diferentes procedimentos de “screening” que podem ser divididos em quatro categorias: (1) avaliações, em solução nutritiva, do crescimento da parte aérea e do sistema radicular, na presença e na ausência de Al (Wallace et al., 1982; Cambraia et al., 1991); (2) cultivo em solo com diferentes saturações de Al (Foy, 1997); (3) testes de coloração que avaliam o acúmulo de Al na extremidade das raízes, como hematoxilina, pyrocatechol e nitrato de prata (Massot et al., 1991; Rincón & Gonzales, 1992; Braccini et al., 1996); (4) e cultura de tecidos e células (Mix, 1990).

Estudos realizados em solução nutritiva apresentam uma série de vantagens em relação àqueles em solo. Permitem comparar grande número de genótipos em menor espaço de tempo e controlar os fatores associados à toxidez, como pH e composição da solução. Além disso, possibilitam a utilização das plantas após a avaliação dos efeitos tóxicos do Al, que é um ponto extremamente importante no caso de cultura perene, como o café, que apresenta taxa de crescimento muito lenta.

A técnica de coloração com hematoxilina tem sido usada para selecionar cultivares de trigo tolerantes ao Al (Polle et al., 1978; Wallace et al., 1982). O método é simples e se baseia na propriedade da hematoxilina de apresentar coloração violeta quando complexada com Al, permitindo detectar o acúmulo de Al nos tecidos radiculares.

Para as diferentes técnicas de seleção existem na literatura vários critérios para avaliar a tolerância. Os mais fáceis são baseados em observações visuais da evolução de necrose na parte aérea e no sistema radicular (Nuernberg et al., 1990). São também, muito utilizadas as medidas de produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes, comprimento total ou comprimento da raiz principal, volume e número de raízes, redução relativa na alongação radicular, capacidade de recuperação das plantas após a remoção do estresse de Al e índice de tolerância $[(\text{crescimento com Al} / \text{crescimento sem Al}) \times 100]$ (Wallace et al., 1982; Cambraia et al., 1991). Entretanto, não existe consenso entre os pesquisadores para propor condições experimentais e critérios para avaliar a sensibilidade ao Al. Nuernberg et al. (1990) verificaram que na classificação de cultivares de trevo vermelho quanto à tolerância ao Al, a combinação de duas ou mais variáveis, especialmente aquelas envolvendo parte aérea e raízes, apresenta resultados mais consistentes.

Braccini et al. (1998) avaliaram a contribuição relativa de diferentes características de crescimento, por meio da técnica multivariada de análise de componentes principais, para discriminar nove genótipos de café quanto à tolerância ao alumínio, cultivados em solução nutritiva. As características radiculares: redução do peso de matéria seca de raiz e do comprimento da raiz principal e aumento do número de raízes secundárias, foram as que mais contribuíram para discriminação dos genótipos. As características de menor importância foram: peso de matéria seca total, área foliar, peso de matéria seca da parte aérea e altura de planta.

O objetivo deste trabalho foi selecionar genótipos de café quanto à tolerância ao alumínio, em função da inibição no crescimento das plantas e da

coloração das raízes com hematoxilina, bem como avaliar a alocação do alumínio em cortes de extremidade de raízes.

MATERIAL E MÉTODOS

Inibição no crescimento da parte aérea e das raízes e na alongação radicular

Sementes de vinte e cinco genótipos de café, sem o pergaminho, foram colocadas para germinar em rolos de papel-toalha à temperatura de 30 °C. Após 40 dias as plântulas foram transferidas para casa de vegetação. Após a seleção, quanto à uniformidade de tamanho, as plântulas foram fixadas em placas de isopor, revestidas com papel alumínio, e colocadas em bandejas contendo 13 litros de solução nutritiva. Utilizou-se a solução de Hoagland & Arnon (1950) diluída a $\frac{1}{4}$ e modificada quanto à concentração de P ($0,025 \text{ mmol L}^{-1}$). O alumínio foi fornecido nas concentrações de 0 e $0,296 \text{ mmol L}^{-1}$, como AlCl_3 . A concentração de fósforo e o pH da solução nutritiva foram mantidos baixos para minimizar a precipitação com alumínio. O pH das soluções foi ajustado diariamente com $\text{HCl } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ou $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ para 4,2 permitindo variações de pH entre 4,0 e 4,4, durante o período experimental de 80 dias. As soluções foram mantidas sob arejamento constante e as trocas foram realizadas a cada 30 dias.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com quatro repetições, num esquema fatorial com 50 tratamentos, constituídos pela combinação de 25 genótipos e 2 níveis de alumínio. A parcela experimental foi constituída de 3 plantas. A identificação dos genótipos estudados é apresentada no quadro 1.

Quadro 1 - Identificação e origem dos genótipos de café utilizados no experimento

Identificação	Origem do Material	Variedade/Híbrido
01 - UFV 2144	IAC LCH 2077-2-5-44	Catuaí Vermelho
02 - UFV 2145	IAC LCH 2077-2-5-81	Catuaí Vermelho
03 - UFV 2147	IAC LCH 2077-2-5-99	Catuaí Vermelho
04 - UFV 2237	IAC LCH 2077-2-5-15	Catuaí Vermelho
05 - UFV 2149	IAC LCH 2077-2-12-91	Catuaí Amarelo
06 - UFV 2150	IAC LCMP 376-4-32	Mundo Novo
07 - UFV 2163	IAC LCP 388-17-16	Mundo Novo
08 - UFV 2164	IAC LCMP 515-3	Mundo Novo
09 - UFV 1340	UFV 386-19*	Catimor
10 - UFV 1603	UFV 395-141*	Catimor
11 - UFV 2877	2 IV EP21.2	Catimor
12 - UFV 2859	124 EP 20.1	Catimor
13 - UFV 3869	202 EP 20.1	Catimor
14 - UFV 3880	232 T15 PN	Catimor
15 - UFV 3092	IAC 2942	Icatu Vermelho
16 - UFV 2953	IAC 4040	Icatu Vermelho
17 - UFV 2954	IAC 4042	Icatu Vermelho
18 - UFV 2955	IAC 4045	Icatu Vermelho
19 - UFV 2956	IAC 4782	Icatu Vermelho
20 - H 418-3	UFV 2143-235 x UFV 443-01	Catuaí Vermelho x Híbrido de Timor
21 - H 418-6	UFV 2143-235 x UFV 443-01	Catuaí Vermelho x Híbrido de Timor
22 - H 464-5	UFV 2190-100 x UFV 440-22	Mundo Novo x Híbrido de Timor
23 - H 484-2	UFV 2164-193 x UFV 443-03	Mundo Novo x Híbrido de Timor
24 - UFV 534	CIFC 19/1	Caturra Vermelho
25 - UFV 514	<i>Coffea canephora</i>	Guarini

* Geração F₃ de CIFC HW26/5 (CIFC 19/1 – Caturra Vermelho x CIFC 832/1 – Híbrido de Timor)

Avaliou-se o comprimento da raiz principal aos 35 e 75 dias, para calcular a taxa de crescimento das raízes e a redução relativa na elongação radicular (REDREL), neste intervalo de tempo, determinada da seguinte forma: $\{[1 - (\text{incremento com Al}/\text{incremento sem Al})] \times 100\}$. Aos 80 dias, foram colhidas a parte aérea e as raízes. Após a secagem em estufa de circulação forçada de ar, à temperatura de 70°C por 72 horas, foram avaliadas a produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes.

Para identificação dos genótipos quanto à tolerância ao Al os percentuais de redução no crescimento da parte aérea e das raízes $\{\%RC = [1 - (\text{crescimento com Al}/\text{crescimento sem Al})] \times 100\}$ e na elongação radicular (REDREL), foram analisados pela técnica multivariada baseada na função discriminante, proposta por Anderson (1958). Esta análise é uma técnica multivariada usada para separar grupos de observações distintos e alocar uma nova observação num grupo previamente definido. Funções lineares são calculadas para os dados de grupos com o propósito de classificar um novo indivíduo em um dos grupos. Esta análise pressupõe uma otimização da classificação quando se considera simultaneamente um conjunto de variáveis tomadas em cada genótipo.

Para obtenção das funções discriminantes, é necessário o conhecimento prévio dos genótipos que pertencem a cada um dos grupos em que se pretende alocar os materiais genéticos de comportamento desconhecido. Tomando como referência experimento preliminar, o genótipo UFV 2955 foi utilizado como padrão representativo de tolerância, os genótipos UFV 2145 e UFV 2164 como tolerância intermediária e UFV 2877 e UFV 3880 como padrão de sensibilidade.

Pelo critério de classificação de Anderson (1958), um determinado genótipo é considerado tolerante se o resultado da função discriminante $D_t(x)$ for maior que $D_i(x)$ ou $D_s(x)$, e tolerância intermediária se $D_i(x)$ for maior que $D_t(x)$ ou $D_s(x)$ e sensível, em caso contrário. Para análise discriminante utilizou-se o programa GENES I – Análise de modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético (Cruz, 1997)

Teste de coloração das raízes com hematoxilina e alocação do alumínio nos tecidos radiculares

As plântulas foram mantidas em solução nutritiva de Hoagland & Arnon (1950), diluída a $\frac{1}{4}$ a pH 6,0, por um período de 80 dias, na ausência de alumínio. Em seguida foram transferidas para solução nutritiva, pH 4,2, na presença $0,296 \text{ mmol L}^{-1}$ de Al, por um período de 20 horas. Nesta solução Fe foi omitido para evitar interferência no processo de coloração, e a concentração de P foi reduzida a $0,025 \text{ mmol L}^{-1}$ para evitar precipitação com alumínio.

O acúmulo de alumínio nas pontas das raízes foi avaliado pela coloração com hematoxilina, segundo metodologia proposta por Polle et al. (1978), modificada quanto à concentração de hematoxilina. A solução corante foi preparada dissolvendo-se 1g de hematoxilina, 0,1g de NaIO_3 e uma gota de NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ em um litro de água destilada.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com três repetições e vinte e cinco tratamentos (genótipos). Cada bandeja com 30 litros de solução nutritiva constituiu um bloco, com três plantas por parcela. Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott, a 5%, utilizando-se o programa SAEG – Sistema para análise estatística e genéticas (Euclides, 1983).

Após o período de exposição ao Al, as plantas foram transferidas para bandejas contendo água desionizada e mantidas sob arejamento constante, por 30 minutos. Em seguida, foram submetidas à solução de hematoxilina por 15 minutos, em quantidade suficiente para cobrir as raízes, lavadas em água corrente por cerca de um minuto, e novamente mantidas em água desionizada por 30-60 minutos para remover o excesso de coloração. A ponta da raiz principal (1,5 cm) foi avaliada por meio de uma escala de notas variando de 1 a 6, sendo a nota 1 para menor acúmulo de Al e 6 para maior acúmulo de Al (Figura 1), conforme a intensidade e localização da região colorida, segundo o critério adotado por Fonseca Jr. (1982). As classes 3 e 4 apresentam zonas de exclusão em virtude do acúmulo de Al na região basal nos genótipos mais tolerantes, enquanto que os genótipos sensíveis

apresentaram maior acúmulo de Al na região meristemática. As raízes foram examinadas por meio de microscópio estereoscópio Olympus modelo SZH, com aumento de 10 vezes.

Para avaliar a alocação do Al nos tecidos radiculares, as plantas foram transferidas para solução nutritiva na presença de Al por 20 horas. Após este período foram submetidas à coloração com hematoxilina por 30 minutos e posteriormente mantidas em água desionizada por 10 minutos. Em seguida, foram realizados cortes transversais das pontas das raízes (0,5 cm), examinados em microscópio Zeiss modelo Docuval e posteriormente fotografados.

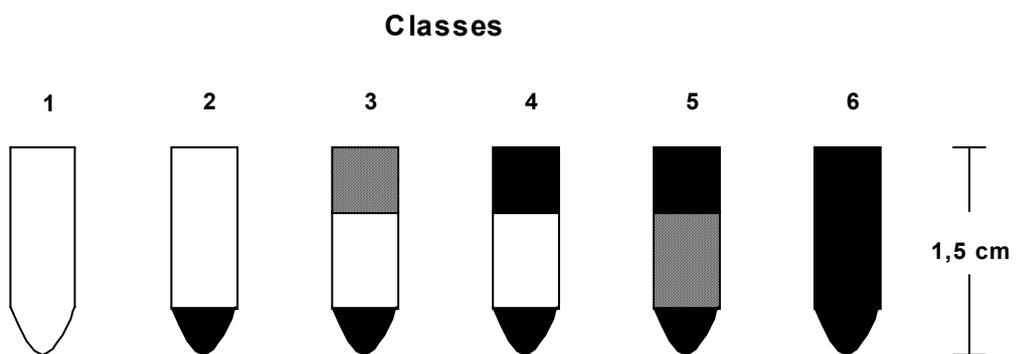


Figura 1 - Critério de avaliação do acúmulo de alumínio em raízes de plantas, em função do teste de coloração pela hematoxilina.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Enquanto que na ausência de Al as raízes eram longas e finas e de coloração mais clara, na presença de Al apresentaram sintomas típicos de toxidez de Al: engrossamento, amarelecimento e encurtamento das raízes (Figura 2). Os sintomas de toxidez de Al observados neste trabalho concordam com aqueles relatados por Pavan & Bingham (1982), Londoño & Valencia-Aristizábal (1983) e Rodrigues (1997).

Os efeitos tóxicos do Al no crescimento das plantas são atribuídos à várias alterações sobre vários processos bioquímicos e fisiológicos (Marschner, 1995) e o crescimento radicular é o principal indicador da sensibilidade das plantas à toxidez (Cabraia et al., 1991). O Al reduziu a produção de biomassa seca da parte aérea (BPA) e das raízes (BRA) (Quadro 2), e também a alongação radicular (Quadro 3). Em alguns casos ocorreu pequeno aumento na produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes, como constatado para os genótipos de Icatu, UFV 2955 e UFV 2956.

A alongação radicular foi mais afetada do que a produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes, apresentando redução de até 62% no caso do Guarini. A taxa de crescimento da raiz principal na ausência de Al foi, em média, $0,24 \text{ cm dia}^{-1}$, enquanto que na presença de Al o crescimento foi de $0,16 \text{ cm dia}^{-1}$, representando redução média na alongação radicular de 34%. Macedo et al. (1997) também constataram que na presença de Al o comprimento das raízes de quatro genótipos de arroz foi mais afetado do que a produção de biomassa seca das raízes.

Nuernberg et al. (1990) ressaltam a importância de se utilizar simultaneamente duas ou mais características, especialmente aquelas envolvendo parte aérea e raízes, para detectar diferenças na tolerância. De acordo com Cabraia et al. (1991) e Macedo et al. (1997), os valores relativos são os melhores critérios para estimar a tolerância mesmo para amplitudes pequenas.

Figura 2 - Desenvolvimento do sistema radicular do Guarini (UFV 514) na ausência e na presença de alumínio, na concentração de $0,296 \text{ mmol L}^{-1}$, em solução nutritiva.

Foram obtidos para os genótipos tolerantes, sensíveis e de tolerância intermediária, representados por $D_t(x)$, $D_s(x)$ e $D_i(x)$, respectivamente, as seguintes funções discriminantes:

$$D_t(x) = -6,4285 + 0,2415 \text{ BPA} - 0,3587 \text{ BRA} + 0,3386 \text{ REDREL}$$

$$D_i(x) = -4,7654 + 0,3995 \text{ BPA} - 0,3385 \text{ BRA} + 0,1855 \text{ REDREL}$$

$$D_s(x) = -9,6231 + 0,3413 \text{ BPA} - 0,3556 \text{ BRA} + 0,3793 \text{ REDREL}$$

Verifica-se que os genótipos considerados previamente como tolerante (UFV 2955), sensíveis (UFV 2877 e UFV 3880) ou de tolerância intermediária (UFV 2145 e UFV 2164), mantiveram suas posições com a análise discriminante (Quadro 4). Desta forma, a taxa de erro aparente, que mede o número de classificação errada, foi nula. Portanto, as funções estimadas têm consistência estatística e as inferências a respeito dos genótipos desconhecidos são válidas.

O padrão de comparação da classe tolerante foi o IAC 4045. Este genótipo apresentou pequena redução na alongação radicular, mas aumento na produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes, na presença de Al. Desta forma, apenas três genótipos foram classificados como tolerantes, sendo dois Icatu e um híbrido (Mundo Novo x Híbrido de Timor). Enquanto seis foram classificados como sensíveis, dos quais três são da população de Catimor, um da de Icatu, um híbrido (Mundo Novo x Híbrido de Timor) e um Guarini (Quadro 4). O Icatu é originário de cruzamento interespecífico entre Robusta e Bourbon Vermelho, o Catimor cruzamento entre Caturra Vermelho e Híbrido de Timor, enquanto que Híbrido de Timor é originário de hibridação espontânea entre *C. canephora* e *C. arabica*. Portanto, tanto os genótipos sensíveis quanto os tolerantes possuem como ancestrais a espécie *Coffea canephora*. Possivelmente, a maior sensibilidade ao Al se deve à contribuição do *C. canephora*, uma vez que o Guarini também foi sensível ao Al.

Quadro 2 - Produção de biomassa seca da parte aérea (BPA) e das raízes (BRA) e respectivos percentuais de variação, de vinte e cinco genótipos de café, em ausência e presença de alumínio em solução nutritiva

Genótipo	BPA			BRA		
	- Al	+Al	Variação	- Al	+Al	Variação
	----- mg -----	----- mg -----	--- % ---	----- mg -----	----- mg -----	--- % ---
1 – UFV 2144	90,83	62,58	-31,1	25,83	20,42	-21,0
2 – UFV 2145	112,25	77,83	-30,7	32,83	23,33	-28,9
3 – UFV 2147	110,58	90,18	-18,4	40,75	29,17	-28,4
4 – UFV 2237	86,00	63,67	-26,0	30,58	20,05	-34,4
5 – UFV 2149	101,08	87,25	-13,7	32,25	25,75	-20,2
6 – UFV 2150	100,67	68,17	-32,3	31,92	19,00	-40,5
7 – UFV 2163	84,75	64,17	-24,3	24,08	18,00	-25,3
8 – UFV 2164	123,42	86,33	-30,0	34,67	24,83	-28,4
9 – UFV 1340	124,00	73,67	-40,6	34,54	17,42	-49,6
10 – UFV 1603	75,33	61,82	-17,9	19,92	15,64	-21,5
11 – UFV 2877	87,92	53,36	-39,3	27,50	13,00	-52,7
12 – UFV 2859	67,75	49,92	-26,3	18,92	12,50	-33,9
13 – UFV 3869	132,33	97,58	-26,3	36,83	25,75	-30,1
14 – UFV 3880	91,08	63,50	-40,2	27,42	17,00	-37,0
15 – UFV 3092	90,25	74,67	-17,3	23,42	19,17	-18,1
16 – IAC 4040	67,42	56,08	-16,8	18,50	11,67	-36,9
17 – IAC 4042	77,00	57,00	-26,0	17,25	11,70	-32,4
18 – IAC 4045	68,75	73,25	+6,55	16,67	18,92	+13,5
19 – IAC 4782	61,08	61,75	+1,1	14,17	14,58	+2,9
20 – H 418-3	82,50	69,67	-15,6	19,67	15,00	-23,7
21 – H 418-6	82,58	68,58	-16,9	23,75	18,42	-22,5
22 – H 464-5	91,67	61,75	-32,6	23,50	12,50	-46,3
23 – H 484-2	80,36	57,25	-28,8	18,91	15,17	-19,8
24 – UFV 534	123,17	79,83	-35,2	39,25	24,17	-38,4
25 – UFV 514	138,33	94,58	-31,6	40,25	27,58	-31,5
Média	94,04	70,51	-24,4	26,78	19,07	-28,2

Quadro 3 - Comprimento da raiz principal aos 35 e 75 dias, taxa de crescimento de raiz (TCR) e redução relativa na elongação radicular (REDREL) de vinte e cinco genótipos de café, em ausência e presença de alumínio em solução nutritiva

Genótipo	- Al			+ Al			REDREL
	35 dias	75 dias	TCR	35 dias	75 dias	TCR	
	----- cm -----		- cm/dia -	----- cm -----		- cm/dia -	--- % ---
1 – UFV 2144	5,15	14,71	0,24	4,11	11,14	0,18	26,4
2 – UFV 2145	5,51	14,57	0,23	5,17	11,91	0,17	25,6
3 – UFV 2147	6,59	19,20	0,32	4,21	13,55	0,23	25,9
4 – UFV 2237	5,08	14,56	0,24	3,67	10,05	0,16	32,7
5 – UFV 2149	5,54	16,03	0,26	4,54	12,40	0,20	25,1
6 – UFV 2150	4,69	15,49	0,27	7,54	15,03	0,19	30,6
7 – UFV 2163	4,82	15,09	0,26	3,71	11,45	0,19	24,6
8 – UFV 2164	7,33	19,33	0,30	2,99	11,72	0,22	27,2
9 – UFV 1340	5,33	15,75	0,26	5,58	12,58	0,18	32,8
10 – UFV 1603	6,67	16,05	0,23	3,94	11,31	0,18	21,4
11 – UFV 2877	4,19	11,66	0,19	3,89	7,49	0,09	51,8
12 – UFV 2859	4,95	16,10	0,28	3,37	9,03	0,14	49,2
13 – UFV 3869	4,77	19,09	0,36	4,36	14,06	0,24	32,3
14 – UFV 3880	5,61	19,01	0,34	3,61	10,22	0,17	50,7
15 – UFV 3092	5,53	12,85	0,18	4,52	10,50	0,15	18,3
16 – IAC 4040	5,37	12,11	0,17	5,04	7,74	0,07	59,9
17 – IAC 4042	5,80	12,38	0,16	4,64	9,02	0,11	33,4
18 – IAC 4045	8,50	16,05	0,19	6,61	12,51	0,15	21,8
19 – IAC 4782	7,24	15,25	0,20	5,00	11,29	0,16	21,5
20 – H 418-3	6,57	15,37	0,22	4,27	9,77	0,14	37,5
21 – H 418-6	5,30	13,18	0,20	4,61	10,99	0,16	19,0
22 – H 464-5	5,43	15,49	0,25	4,97	9,00	0,10	59,9
23 – H 484-2	4,94	12,90	0,20	4,21	10,36	0,15	22,7
24 – UFV 534	4,27	15,38	0,28	3,83	10,80	0,17	37,3
25 – UFV 514	8,05	14,55	0,16	4,96	7,42	0,06	62,1
Média	5,73	15,26		4,53	10,85		34,0

Passo & Ruiz (1995) avaliaram a tolerância diferencial dos cafeeiros Conilon e Catuaí aos baixos índices de pH e aos teores elevados de Al em solução nutritiva. Em pH 4,0 e na presença de Al, após 170 dias do transplântio, o Conilon apresentou redução na produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes de 80% e 75%, respectivamente, enquanto que para o Catuaí a redução foi de 67% na parte aérea e 58% nas raízes. Estes resultados reforçam a idéia de que a maior sensibilidade apresentada pelos genótipos de Catimor, Icatu e híbrido (Mundo Novo x Híbrido de Timor), deve-se à presença do *C. canephora* na origem desses materiais.

Dezesseis genótipos apresentaram tolerância intermediária, dentre eles cinco Catuaí, três Mundo Novo, três Catimor, dois Icatu, um Caturra e dois híbridos (Catuaí x Híbrido de Timor; Mundo Novo x Híbrido de Timor) (Quadro 4).

Bragança et al. (1987) avaliaram o comportamento de dois cultivares de café, um Catimor e um Catuaí Amarelo, sob níveis crescentes de Al trocável no solo, durante 6 meses. Os dois cultivares não apresentaram tolerância ao Al e foram afetados de modo semelhante, apresentando redução na produção de biomassa seca de folhas, caule e raízes, altura de plantas, diâmetro de caule e área foliar. Na presença de $2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al^{3+} , a redução na produção de biomassa seca das raízes foi de 47% para o Catimor e de 80% para o Catuaí. Dos seis genótipos de Catimor, avaliados no presente trabalho, três foram considerados sensíveis e três apresentaram tolerância intermediária.

Quadro 4 - Classificação dos genótipos de café quanto à tolerância ao alumínio, com as respectivas estimativas das funções discriminantes, em função do percentual de variação na produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes e redução relativa na elongação radicular

Genótipo	Dt(x)	Di(x)	Ds(x)	Classificação
1 – UFV 2144	2,5044	5,4617	3,5551	Intermediária
2 – UFV 2145	-0,7321	2,4400	0,2660	Intermediária
3 – UFV 2147	-3,3883	-2,2064	-3,5982	Intermediária
4 – UFV 2237	-1,4343	0,0211	-0,5953	Intermediária
5 – UFV 2149	-1,8650	-1,4722	-2,6113	Intermediária
6 – UFV 2150	-2,7712	0,1188	-1,3707	Intermediária
7 – UFV 2163	-1,2944	0,9503	-0,9850	Intermediária
8 – UFV 2164	-0,1199	2,6920	0,8820	Intermediária
9 – UFV 1340	-3,3036	0,7531	-0,9581	Intermediária
10 – UFV 1603	-2,5488	-0,8979	-3,0140	Intermediária
11 – UFV 2877	1,6920	2,6981	4,6921	Sensível
12 – UFV 2859	4,4335	3,4012	5,9756	Sensível
13 – UFV 3869	0,0442	1,5245	0,8772	Intermediária
14 – UFV 3880	7,1609	8,1710	10,1604	Sensível
15 – UFV 3092	-2,5701	-0,6148	-3,2398	Intermediária
16 – IAC 4040	4,6795	0,5655	5,7166	Sensível
17 – IAC 4042	-0,4500	0,8565	0,4118	Intermediária
18 – IAC 4045	4,2339	1,2422	1,2345	Tolerante
19 – IAC 4782	1,6343	-0,2235	-0,8038	Tolerante
20 – H 418-3	1,5149	0,3727	1,4728	Tolerante
21 – H 418-6	-3,9437	-2,0627	-4,6019	Intermediária
22 – H 464-5	5,1361	3,7132	7,7822	Sensível
23 – H 484-2	1,1171	4,2434	1,7809	Intermediária
24 – UFV 534	0,9014	3,1948	2,8546	Intermediária
25 – UFV 514	10,9674	8,7457	13,5578	Sensível

A classificação dos vinte e cinco genótipos cultivados em solução nutritiva apresentaram algumas coincidências em relação ao agrupamento obtido pelo método do papel-solução realizado em germinador, com exceção de cinco genótipos (UFV 2859, UFV 3869, IAC 4040, IAC 4042 e UFV 534). Neste trabalho, dos seis genótipos sensíveis, três também tiveram a mesma classificação pelo método do papel-solução. Portanto, para os genótipos muito tolerante ou muito sensível, os testes estatísticos de análise discriminante e agrupamento discriminam bem; no entanto, as classificações intermediárias não são confiáveis.

O teste de coloração com hematoxilina possibilitou separar pelo teste Scott-Knott apenas o genótipo que acumulou mais Al, o Icatu 4042 (Grupo I) dos demais (Grupo II). Ele apresentou maior intensidade de coloração nas pontas das raízes, recebendo nota 6, enquanto os outros apresentaram, em média, nota 2,24 uma vez que pertenceram às classes 2 e 3. As plantas foram expostas ao Al, na concentração de 0,296 mmol L⁻¹ durante 20 horas. Esta condição não permitiu adequada diferenciação dos genótipos de café. Desta forma, para a melhor utilização deste método, torna-se necessário estabelecer anteriormente a concentração e o tempo de exposição ao Al.

A coloração com hematoxilina, isoladamente, não pode ser considerada um método adequado de seleção de genótipos de café para tolerância ao Al, porque seu resultado depende do mecanismo de tolerância envolvido. Por exemplo, se para um genótipo que acumule muito Al, o mecanismo de tolerância estiver relacionado com a detoxificação do Al após sua absorção, pode-se obter pelo teste a classificação como mais sensível, já que este se baseia na intensidade da cor desenvolvida. Por outro lado, Polle et al. (1978), Wallace et al. (1982) e Scott et al. (1992) utilizaram o teste de coloração com hematoxilina para selecionar genótipos de trigo quanto à tolerância ao Al. Esses pesquisadores concluíram que é um teste simples e rápido para separar um grande número de genótipos e que correlacionou-se bem com os resultados obtidos em solução nutritiva. Este comportamento não parece ser verdade para cultivares de feijão (Massot et al., 1991) e, também, para genótipos de café.

Cultivares de trigo tolerantes ao Al possuem menor capacidade de troca de cátions das raízes e tendem a acumular menos Al (Polle et al., 1978). Desta forma, o teste de coloração com hematoxilina poderia indicar maior ou menor tolerância ao Al. Por outro lado, em feijão, Massot et al. (1991) verificaram que a maior tolerância ao Al foi relacionada com alta concentração de Al nas raízes. Este acúmulo de Al nas variedades tolerantes pode ser explicado pela maior capacidade de precipitar o Al como polímeros, excluindo o Al da membrana plasmática (Taylor, 1991; Kochian, 1995).

Em raízes de café expostas ao Al durante 20 horas, observou-se que no genótipo mais tolerante, Figura 3(B), o Al acumulou-se apenas nas células epidérmicas, enquanto que no genótipo de tolerância intermediária, Figura 3(A),

Figura 3 - Cortes transversais da ponta de raízes de genótipos de café, após 20 horas de exposição ao alumínio, na concentração de $0,296 \text{ mmol L}^{-1}$, e coloridas com hematoxilina. A – genótipo com tolerância intermediária (Icatu, IAC 4042) e B – genótipo tolerante (Icatu, IAC 4045).

observa-se alocação de Al nas células epidérmicas e em várias camadas de células do córtex. Nenhuma coloração foi observada nas raízes das plantas controle (sem Al), seccionadas e examinadas ao microscópio.

Rincón & Gonzales (1992) verificaram que a sensibilidade diferencial de cultivares de trigo pode ocorrer em virtude da alocação de Al na região meristemática. O cultivar sensível apresenta maior intensidade de coloração na região apical, enquanto que, o cultivar tolerante mostra alocação de Al na região basal. Observaram, também, que o Al acumulou-se principalmente na parede celular, nos espaços intercelulares e no núcleo das células do córtex e da epiderme.

A menor formação do complexo Al-hematoxilina, no caso do genótipo tolerante IAC 4045, pode estar relacionada com mudanças químicas ocorridas nas pontas das raízes, tais como, alterações no pH próximo às raízes ou síntese de quelatos que podem interferir na formação do complexo Al-hematoxilina (Massot et al., 1991; Kochian, 1995). O acúmulo do Al em tecidos radiculares, avaliado por meio de cortes transversais na ponta da raiz colorida, associado com outras características, como redução no crescimento radicular, permite sugerir a possibilidade de que a maior tolerância apresentada pelo Icatu (UFV 2955) esteja relacionada com algum mecanismo de exclusão.

CONCLUSÕES

1. Os vinte e cinco genótipos de café foram agrupados em três classes. Dezesseis apresentaram tolerância intermediária, seis foram classificados como sensíveis e apenas três foram tolerantes ao Al na concentração de $0,296 \text{ mmol L}^{-1}$.
2. O teste de coloração com hematoxilina não se caracterizou como um método de discriminação promissor para selecionar genótipos de café tolerantes ao Al.

3. Em genótipo com tolerância intermediária, que apresentou maior intensidade de coloração com hematoxilina, a alocação de Al ocorreu nas células epidérmicas e em várias camadas de células do córtex. Em genótipo mais tolerante, o Al acumulou-se apenas nas células epidérmicas, sugerindo a existência de mecanismo de exclusão.

LITERATURA CITADA

- ANDERSON, T.W. An introduction to multivariate statistical analysis. New York, John Wiley, 1958. 374p.
- BRACCINI, M.C.L.; BRACCINI, A.L.; MARTINEZ, H.E.P.; PEREIRA, P.R.G. & FONTES, P.C.R. Técnicas de avaliação da toxidez do alumínio em plântulas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L). cultivadas em solução nutritiva. R. Ceres, 43: 3-16, 1996.
- BRACCINI, M.C.L.; MARTINEZ, H.E.P.; PEREIRA, P.R.G.; SAMPAIO, N.F. & SILVA, E.A.M. Tolerância de genótipos de cafeeiro ao alumínio em solução nutritiva . I. crescimento e desenvolvimento da parte aérea e sistema radicular. R. Bras. Ci. Solo, 22:435-442, 1998.
- BRAGANÇA, J.B.; PAULINO, A.J.; MATIELLO, J.B. & FRABRIS, E.J. Efeito do alumínio trocável do solo sobre o crescimento inicial do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) catimor (Catimor 183) e catuaí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 14., Campinas, 1987. Anais. Rio de Janeiro, COTEC/DIPRO/IBC, 1987. p. 295-297.
- CAMBRAIA, J.; SILVA, M.A.; CANO, M.A.O. & SANT'ANNA, R. Método simples para a avaliação de cultivares de sorgo quanto a tolerância ao alumínio. R. Bras. Fisiol. Veg., 3:87-95, 1991.
- CHAVES, J.C.D.; PAVAN, M.A. & MIYAZAWA, M. Redução da acidez subsuperficial em coluna de solo. Pesq. Agropec. Bras., 23: 469-476, 1988.
- CRUZ, C.D. Programa GENES – aplicativo computacional em genética e estatística. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 442p.
- EUCLYDES, R.F. Sistema para análise estatística e genéticas (SAEG) – manual provisório. Viçosa, CPD/UFV, Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento, 1983. 74p.

- FONSECA Jr., N.S. Estudo da herança da tolerância ao alumínio em soja (*Glycine max* (L.) Merrill), pelo método da hematoxilina. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1982. 46p. (Tese de Mestrado).
- FOY, C.D. Tolerance of eastern gamagrass to excess of aluminum in acid soil and nutrient solution. *J. Plant Nutr.*, 20:1119-1136, 1997.
- GUIMARÃES, P.T.G. O uso do gesso agrícola na cultura do cafeeiro. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., Uberaba, 1992. Anais. São Paulo, Instituto Brasileiro do Fosfato, 1992. p. 175-190.
- HOAGLAND, D.R. & ARNON, D.I. The water-culture method for growing plants without soil. Berkeley, Cal. Agric. Exp. Station, 1950. 347p. (Cal. Agric. Exp. Station, Cir.)
- INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ - IBC. A moderna cafeicultura nos cerrados. Rio de Janeiro, IBC/GERCA, 1987. 148 p.
- KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 46: 237-260, 1995.
- LONDOÑO, M.E.A. & VALENCIA-ARISTIZÁBAL, G. Toxicidade de alumínio en plantas de café. *Cenicafé*, 34: 61-97, 1983.
- MACEDO, J. Os solos da região dos cerrados. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E.F. & FONTES, M.P.F., eds. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p.135-140.
- MACEDO, C.C.; KINET, J.M. & Van SINT JAN, V. Effects of duration and intensity of aluminum stress on growth parameters in four genotypes differing in aluminum sensitivity. *J. Plant Nutr.*, 20:181-193, 1997.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London, 889 p., 1995.
- MASSOT, N.; POSCHENRIEDER, C. & BARCELÓ, J. Aluminum tolerance assessment in buxh bean cultivars by root growth analysis and hematoxylin staining. *Suelo Planta*, 1:25-32, 1991.
- MIX, G. Application of in vitro techniques for screening plant genetic variability. In: EL BASSAM, N.; DAMBROTH, M. & LOUGHMAN, B.C. eds. Genetic of plant mineral nutrition, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1990. p.339-343.

- NUERNBERG, N.J.; BISSANI, C.A.; CAMPBELL, T.A. & FOY, C.D. Screening pasture plants for aluminum tolerance. In: EL BASSAM, N.; DAMBROTH, M. & LOUGHMAN, B.C. eds. Genetic of plant mineral nutrition, Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1990. p.345-353.
- PASSO, R.R. & RUIZ, H.A. Tolerância dos cafeeiros conilon e catuaí à toxidez causada pelo alumínio e manganês. R. Ceres, 42:45-52, 1995.
- PAVAN, M.A. & BINGHAM, F.T. Toxicity of aluminum to coffee grown in nutrient solution. Soil Sci. Soc. Am. J., 46: 993-997, 1982.
- POLLE, E.; KONZAK, C.F. & KITTRICK, J.A. Visual detection of aluminum tolerance levels in wheat by hematoxilin staining of seedling roots. Crop Sci., 18:823-827, 1978.
- RINCÓN, M. & GONZALES, R.A. Aluminum partitioning in intact roots of aluminum-tolerant and aluminum-sensitive wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. Plant Physiol., 99:1021-1028, 1992.
- RODRIGUES, L.A. Crescimento e composição mineral na parte aérea e raízes de duas variedades de café em resposta à calagem na subsuperfície do solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 89p. (Tese de Mestrado)
- SCOTT, B.J.; FISHER, J.A. & SPOHR, J. Tolerance of australian wheat varieties to aluminum toxicity. Comm. Soil Sci. Plant Anal., 23:509-526, 1992.
- TAYLOR, G.J. Current views of the aluminum stress response; the physiological basis of tolerance. Cur. Top. Plant Biochem. Physiol., 10:57-93, 1991.
- WALLACE, S.U.; HENNING, S.J. & ANDERSON, I.C. Elongation, Al concentration, and hematoxylin staining of aluminum-treated wheat roots. Iowa State J. Res., 57:97-106, 1982.
- ZHANG, G. & TAYLOR, G.J. Kinetics of aluminum uptake by excised roots of aluminum-tolerant and aluminum-sensitive cultivars of *Triticum aestivum* L. Plant Physiol., 91:1094-1099, 1989.

ALTERAÇÃO DO pH DA RIZOSFERA DE GENÓTIPOS DE CAFÉ EM RESPOSTA AO ALUMÍNIO DO SOLO

RESUMO

A tolerância das plantas ao alumínio (Al) tem sido freqüentemente associado com aumento do pH da rizosfera. O experimento foi conduzido em casa de vegetação com o objetivo de avaliar a relação entre pH da rizosfera e tolerância ao Al, de cinco genótipos de café, na presença e na ausência de calagem. As plantas de café se desenvolveram em caixas plásticas, com as raízes próximas da tampa. Após 90 dias, as tampas das caixas foram removidas e uma fina camada de agar contendo indicador foi derramada sobre a superfície. Também foram avaliadas a produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes, o comprimento e a superfície de raízes. Quando o solo foi corrigido, observou-se o desenvolvimento da coloração amarela próximo às raízes, indicando o abaixamento do pH. Este resultado foi confirmado pela avaliação do pH do solo e da rizosfera com variações de 0,2 e 0,3 unidades. Por outro lado, na presença de Al não houve diferença entre pH do solo e da rizosfera, indicando que a alteração no pH da rizosfera não parece ser o mecanismo de tolerância de cafeeiros ao Al.

Termos para indexação: *Coffea arabica* L. tolerância, técnica do agar-indicador

**SUMMARY: RHIZOSPHERE pH CHANGES OF COFFEE GENOTYPES
IN RESPONSE TO SOIL ALUMINUM**

Aluminum (Al) plant tolerance has been frequently associated with a pH increase in the rhizosphere. This work was carried out in greenhouse with the purpose to evaluate the relationship between rhizosphere-pH and aluminum tolerance of five coffee genotypes, grown with or without soil liming. Coffee plants were grown in plastic boxes, with roots developing near the cover. After 90 days the lids were removed and a solid agar layer with pH indicator was placed on the surface of soil and roots. It was also evaluated roots and shoots dry biomass production and roots length and surface. When the soil was limed, the development of yellow color near roots indicating a pH decrease was observed. This result was confirmed by observing soil and rhizosphere-pH changes, varying between 0,2 and 0,3 units. On the other hand, in the presence of Al differences among soil and rhizosphere-pH was not observed, indicating that root-induced pH changes seems not to be the Al tolerance mechanism in coffee plants.

Index terms: Coffea arabica L. tolerance, agar technique.

INTRODUÇÃO

Os efeitos tóxicos do Al sobre as plantas são bem documentados (Foy, 1988; Taylor, 1991). Entretanto, pouco é conhecido sobre os mecanismos de toxidez de Al e muito menos ainda sobre os mecanismos que controlam a tolerância.

Vários mecanismos de tolerância ao Al são propostos (Foy, 1988; Taylor, 1991; Kochian, 1995), incluindo a quelatação do Al via formação de complexos com ácidos orgânicos e proteínas (Suhayda & Haug, 1986), acúmulo de Al em organelas como vacúolos e parede celular (Taylor, 1991), precipitação

do Al pela alcalinização da rizosfera (Marschner et al., 1982), mudanças ou indução de atividades de enzimas menos sensível ao Al (Slaski, 1990), e transporte de Al para fora de tecidos radiculares (Zhang & Taylor, 1988).

O controle do pH da rizosfera e exclusão do Al pela membrana plasmática têm sido considerados como possíveis mecanismos de tolerância ao Al. O pH do meio envolvendo as raízes tem grande influência na especiação do Al, sendo de grande importância na redução da toxidez de Al na rizosfera (Gahoonia, 1993).

Diferenças entre a composição química da rizosfera e do solo ocorrem principalmente devido a absorção de água e de nutrientes, mudanças no pH, exsudação de ácidos orgânicos e atividade microbiológica. Muitos desses processos podem influenciar a disponibilidade de nutrientes e a solubilidade de elementos tóxicos como o Al (Marschner, 1995).

Diferenças na liberação de H^+ ou HCO_3^- estão relacionadas com o balanço do total de íons absorvidos, o qual varia entre as espécies e particularmente com a forma de nitrogênio absorvida (Keltjens, 1997, Durieux et al., 1993). Como relatado por Marschner & Römheld, 1983) e Keltjens & Loenen (1989), plantas supridas com $N-NO_3^-$ aumentaram o pH do solo enquanto que a fertilização com $N-NH_4^+$ resultou em abaixamento do pH. Isto tem levado vários pesquisadores a levantar a hipótese de que diferenças na tolerância ao Al podem estar relacionadas com absorção preferencial de NO_3^-/ NH_4^+ entre espécies e cultivares. Keltjens (1997) e Durieux et al. (1993) observaram que plantas de milho apresentaram redução na absorção de NO_3^- na presença de Al. Uma vez que a maioria das espécies mostram preferência na absorção de amônio sobre nitrato, quando ambos estão presentes (Marschner, 1995), a inibição na absorção de nitrato, na presença de Al, poderia resultar em maior acidificação da rizosfera. Portanto, cultivares sensíveis e tolerantes ao Al poderiam diferir na taxa de exclusão de H^+ ou HCO_3^- .

Além do N, o nutriente quantitativamente mais absorvido pelas plantas, outros elementos como K, Ca, Mg, P e Fe contribuem para o balanço dos nutrientes absorvidos e a liberação de H^+ ou OH^- pelas raízes (Marschner, 1995).

Nos solos, o aumento no pH da rizosfera poderia prevenir a entrada do Al no apoplasto, enquanto que em soluções nutritivas aeradas, em função da ausência do efeito de rizosfera, o Al pode entrar facilmente no apoplasto de células do córtex. No apoplasto, o Al pode ser adsorvido por cargas negativas e dependendo do pH pode ser precipitado (Taylor, 1991). Em solução nutritiva, Tan et al. (1992) observaram que o acúmulo de Al nas raízes foi maior em plantas supridas com NO_3^- do que na presença de NH_4^+ . Este resultado contradiz aqueles obtidos no solo. Em solos ácidos, onde a nitrificação é normalmente inibida, as plantas tenderiam a acidificar a rizosfera, em função de maior absorção de NH_4^+ (Silva et al., 1994).

Mudanças no pH da rizosfera dependem também da espécie de planta (Marschner & Römheld, 1983), do pH e da capacidade tampão do solo (Marschner, 1995).

Vários métodos têm sido utilizados para avaliar alterações químicas ao longo das raízes de plantas crescendo em solução nutritiva ou no solo. A maioria deles dependem de um meio-agar contendo reagentes específicos e indicadores. Pela coloração, é possível demonstrar os seguintes processos na rizosfera: mudanças de pH (Marschner & Römheld, 1983), exsudação de ácidos orgânicos e solubilização de vários fosfatos inorgânicos (Dinkelaker et al., 1993), redução de Fe III e Mn IV (Marschner et al., 1982). Estes métodos indicam em qual zona ao longo da raiz, esses processos ocorrem. Também podem ajudar a entender mecanismos pelos quais as plantas se adaptam a condições adversas tais como altas concentrações de alumínio e baixa fertilidade.

Experimentos sobre a toxidez de Al em solução nutritiva muitas vezes apresentam baixa correlação com estudos conduzidos em solos ácidos (Keltjens, 1997). Desta forma, um melhor entendimento das condições na interface solo-raiz e a toxidez de Al são de grande importância.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a relação entre a capacidade de cinco genótipos de café em alterar o pH da rizosfera e a tolerância ao alumínio.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação utilizando amostra de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, coletado na região de Viçosa, MG, na camada superficial apresentando, inicialmente, $1,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al (Quadro 1). Metade do solo foi corrigido com CaCO_3 e MgCO_3 na relação molar de 4:1, correspondendo a $4,8 \text{ t ha}^{-1}$. A necessidade de calagem foi determinada conforme recomendação de Raij et al. (1996), para atingir 70% da saturação por bases. Após a aplicação do calcário, as amostras de solo foram umedecidas até atingir 80% da capacidade de retenção de água, acondicionadas em sacolas plásticas e incubadas por 22 dias. Após o período de incubação, as amostras de solo receberam a seguinte adubação (mg kg^{-1}): P-400; K-150; N-50; S-40; B-0,81; Cu-1,33; Fe-1,55; Mn-3,66; Mo-0,15 e Zn-4,0. Os nutrientes foram adicionados nas formas: K_2SO_4 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, H_3BO_3 , $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Essas formas foram aplicadas ao solo via solução com exceção do $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Após a adubação, o solo foi colocado em caixas plásticas do tipo gerbox (10,5 x 10,5 cm). Essas caixas tiveram uma das laterais removida onde foram colocadas as plântulas. Utilizou-se o delineamento em blocos casualizados com três repetições e o arranjo dos tratamentos em esquema fatorial 2 x 5 (calagem x genótipos). Foram avaliados dois genótipos sensíveis: UFV 2147 (Catuaí Vermelho - LCH 2077-2-5-99) e UFV 3880 (Catimor - descendência de UFV 1603) e três tolerantes: UFV 2149 (Catuaí Amarelo - LCH 2077-2-12-91), IAC 4045 (Icatu Vermelho) e IAC 4782 (Icatu Vermelho), de acordo com trabalho anterior (método do papel-solução).

Quadro 1 - Caracterização química do solo na ausência e na presença de calagem

Solo	C ⁽¹⁾	pH (H ₂ O)	P ⁽²⁾	K ⁽²⁾	Al ⁽³⁾	Ca ⁽³⁾	Mg ⁽³⁾	(H+Al) ⁽⁴⁾	S	CTC		V	m
	dag kg ⁻¹		- mg dm ⁻³ -		----- cmol _c dm ⁻³ -----					Efet. Total		----	% ----
S/cal	1,8	4,8	1,0	28	1,8	0,5	0,2	7,2	0,77	2,57	7,97	9,66	70
C/cal	1,8	5,6	1,1	24	0,0	2,6	0,6	4,8	3,27	3,27	8,07	40,5	0,0

⁽¹⁾ Método Walkley-Black. ⁽²⁾ Extrator Mehlich-1. ⁽³⁾ Extrator KCl 1 mol L⁻¹. ⁽⁴⁾ Extrator Ca(CH₃COO)₂ 0,5 mol L⁻¹, pH 7,0.

As sementes de café foram colocadas para germinar entre folhas de papel toalha no germinador e após 40 dias as plântulas foram transferidas para as caixas plásticas. As plântulas foram colocadas na extremidade superior de forma que as raízes crescessem próximas à tampa. Para evitar o desenvolvimento de algas, as caixas foram cobertas com plástico de coloração preta, revestidas com papel alumínio e colocadas inclinadas, formando um ângulo de 50°, com a tampa voltada para baixo, de forma que permitisse a avaliação do crescimento radicular.

Na preparação do meio agar-indicador, utilizou-se o método descrito por Marschner & Römheld (1983), no qual a solução de agar (0,75%) foi aquecida até a dissolução completa e após o seu resfriamento foi adicionado o indicador, púrpura de bromocresol, na concentração de 0,06%. O pH do meio foi ajustado com NaOH para 6,0 apresentando, neste caso, coloração vermelha. Após 90 dias, as tampas foram cuidadosamente removidas e uma fina camada de agar contendo o indicador, foi colocada sobre as raízes. Para obter a camada de agar sólido de 2-3 mm, a solução de agar-indicador foi colocada dentro de caixa plástica forrada com um filme de PVC. Após o resfriamento, a lâmina de agar foi colocada sobre a superfície pelo deslizamento da mesma sobre o solo e as raízes. Mudanças de coloração do agar foram observadas após um período de quinze minutos a duas horas em função da alteração no pH da rizosfera.

Foram avaliados, também, o pH (H₂O) do solo e da rizosfera. Para avaliar o pH da rizosfera, foi removido o solo onde as raízes se desenvolveram,

com a ajuda de uma espátula, até a profundidade de 2 mm. Em seguida, foram avaliadas as produções de biomassa seca da parte aérea e das raízes, o comprimento e a superfície de raízes de acordo com a metodologia descrita por Rossiello et al. (1995). A área superficial de raízes foi quantificada pelo método fotoelétrico, com a utilização de medidor de área (Delta-T Area Measurement System, modelo Area Meter MK₂). Calculou-se o comprimento das raízes a partir da seguinte equação: $L = A/(2\pi R)$, sendo A a área superficial e R o raio calculado pela fórmula $R = 2V/A$, onde V representa o volume radicular, determinado pelo deslocamento de um volume de água numa proveta graduada.

Foram calculados os percentuais de redução no crescimento obtidos pela divisão da média dos valores na presença de Al, pela média dos valores na ausência de Al, subtraído de 1, multiplicado por 100.

Os resultados foram submetidos a análise de variância, em que a soma de quadrado para tratamentos foi desdobrada segundo um esquema de contrastes ortogonais, para avaliar o comportamento dos cinco genótipos, na presença e ausência de alumínio em relação ao pH da rizosfera e do solo e características de crescimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema radicular da progênie de Catimor UFV 3880 cresceu melhor na ausência de Al, enquanto que para a de Icatu IAC 4045, visualmente não houve diferença entre ausência e presença de Al (Figura 1).

Alterações de pH ao longo das raízes foram observadas na lâmina de agar colocada sobre a superfície do solo. O agar foi adicionado com pH 6,0 (vermelho) e o pH inicial sem calagem era de 4,8. Na presença de Al não se observou, visualmente, diferenças entre pH do solo e da rizosfera, uma vez que a coloração do agar mudou por completo para amarelo (Figura 2). A coloração amarelo indica que o pH estava abaixo de 4,5 que é o pH de viragem do indicador. Este resultado foi confirmado pelos valores de pH do solo e da rizosfera (Quadro 2). Não houve diferença entre os genótipos, como pode ser

observado pelos contrastes de 2 a 5 (Quadro 3), apresentando em média pH 4,07 na rizosfera e 4,14 no solo.

Pavan & Bingham (1982) demonstraram que o crescimento de plantas de café foi mais bem relacionado com a atividade de Al^{3+} . Com valores de pH entre 3,9 e 4,2 a espécie de Al predominante é o Al^{3+} (Taylor, 1991). Portanto, com o pH do solo de 4,1 e na presença de $1,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, acredita-se que sejam condições adequadas para detectar diferenças entre genótipos sensíveis e tolerantes. As plantas de café não modificaram o pH da rizosfera como acontece com outras culturas como milho (Keltjens, 1997) e sorgo (Cambraia et al., 1987).

Entretanto, quando se corrigiu o solo, ou seja, na ausência de Al, observou-se o desenvolvimento da coloração amarela próximo às raízes, indicando abaixamento do pH (Figura 3). Este resultado foi confirmado pela avaliação do pH do solo e da rizosfera com variações de 0,2 e 0,3 unidades de pH (Quadro 2).

Não foi possível detectar diferenças entre os genótipos, como pode ser observado pelos contrastes 6 a 9 (Quadro 3), apresentando em média, pH 4,87 na rizosfera e 5,11 no solo. Tyler et al. (1987) citados por Marschner (1995) verificaram que na faixa de pH do solo entre 4,0 e 4,5 um aumento de 0,2 unidade de pH representa uma redução de 2 a 3 vezes na concentração de Al na solução do solo, indicando a importância que o aumento no pH da rizosfera pode ter em reduzir o toxidez de Al.

Apesar de ser utilizado apenas amônio como fonte de N, o abaixamento do pH da rizosfera foi pequeno em relação aos resultados obtidos por Keltjens (1997). Plantas de milho supridas com $N-NO_3^-$ aumentaram o pH da rizosfera em 0,55-0,89 unidade de pH, enquanto que na presença de $N-NH_4^+$ o abaixamento do pH variou entre 0,84-1,48.



Figura 1 - Crescimento do sistema radicular dos genótipos de Icatu (IAC 4045) e de Catimor (UFV 3880) em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, na presença de $1,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al e após a calagem.

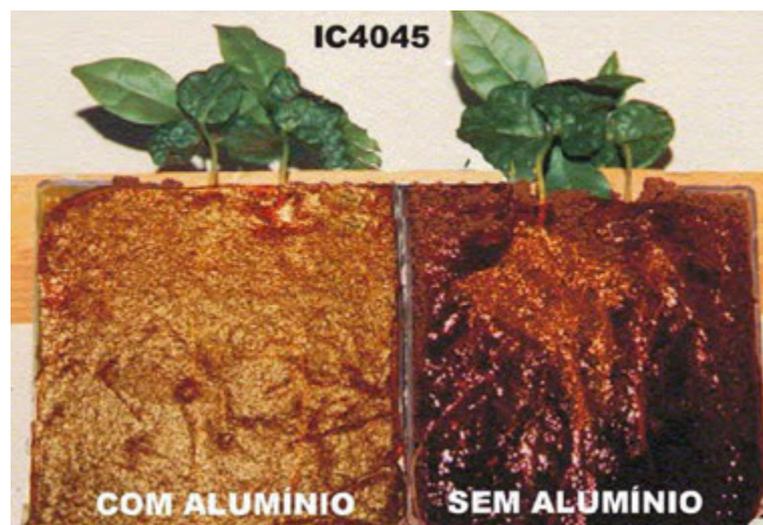


Figura 2 - Mudanças no pH do agar, induzidas pelo Icatu (IAC 4045), na presença (A) e na ausência de Al (B), após duas horas de adição do agar com pH inicial ajustado para 6,0 (vermelho).



Figura 3 - Verificação de diferença de pH do solo e da rizosfera do genótipo IAC 4782 na ausência de Al.

Vaast & Zasoski (1992) verificaram em condições de solos ácidos, que plantas de café da cultivar Guatemala foram capazes de utilizar diversas fontes de N, mas com eficiência diferente. Plantas supridas com NH_4^+ e NH_4NO_3 cresceram melhor e absorveram mais N do que aquelas supridas com NO_3^- . O pH da rizosfera decresceu de 4,2 para 3,8 na presença de NH_4^+ e aumentou de 4,2 para 4,7 na presença de NO_3^- .

De acordo com Marschner (1995), a capacidade tampão do solo e o pH inicial são os principais fatores que determinam a extensão na qual as raízes de uma dada espécie podem mudar o pH da rizosfera. A capacidade tampão de pH depende dos teores de argila e de matéria orgânica, os quais podem tamponar as mudanças de pH induzidas pelas raízes. O solo utilizado apresenta 3% de matéria orgânica e 68% de argila, portanto, a capacidade das plantas de café em alterar o pH da rizosfera pode ter sido influenciada por estes fatores.

As vantagens do método do agar-indicador estão relacionadas à sua natureza não destrutiva, além de permitir melhor localização das variações de pH ao longo das raízes. Enquanto a separação mecânica do solo, para avaliação do pH, implica em definir qual a distância da superfície das raízes é considerada como rizosfera.

Pelo contraste 1 (Quadro 3) é avaliado o efeito da calagem sobre várias características de crescimento. Observou-se que houve diferença apenas em relação à produção de biomassa seca da parte aérea, que foi superior a 37 mg, quando se fez a correção do solo. Entretanto, os valores absolutos não permitem separação clara entre os genótipos sensíveis e tolerantes.

Para explicar as diferenças entre os genótipos foram calculados os valores relativos (Quadro 4). Observa-se que o Catuaí Amarelo (UFV 2149) produziu 14,7% a mais de biomassa seca da parte aérea na presença de Al^{3+} (Quadro 4). Os demais genótipos apresentaram redução que chegou a 37,8% no caso da progênie de Catimor UFV 3880.

A comparação entre os Catuaís sensível (UFV 2147) e o tolerante (UFV 2149), na presença de Al, é feita pelo contraste 3 (Quadro 3). Observa-se que houve diferença quanto à produção de biomassa seca das raízes. O genótipo tolerante produziu 15 mg a mais que o sensível. Além disso, o UFV 2149 produziu 11 % a mais na presença de Al em relação à sua ausência (Quadro 4). Em solução nutritiva, Braccini et al. (1998) também constataram que este genótipo apresentou menor redução na produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes, altura de planta e área foliar.

Os genótipos de Icatu (IAC 4045 e 4782) apresentaram menor produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes tanto na presença quanto na ausência de Al, comparado aos genótipos de Catuaí e Catimor (Quadro 2). Este comportamento também foi observado Rodrigues (1997) para a cultivar IAC 4045. Entretanto, na presença de Al a produção de biomassa seca de raízes foi superior a 5,77% para o IAC 4045 e 22,87% para o IAC 4782 em relação a ausência deste elemento.

Quadro 2 - Valores de pH (H₂O) da rizosfera e do solo, produção de biomassa seca da parte aérea (BPA) e das raízes (BRA), superfície (SR) e comprimento das raízes (CR) de cinco genótipos de café, na presença e ausência de alumínio trocável no solo

Genótipo	pH rizosfera		pH solo		BPA		BRA		SR		CR	
	+ Al	- Al	+ Al	- Al	+ Al	- Al	+ Al	- Al	+ Al	- Al	+ Al	- Al
					----- mg/planta -----				-cm ² /planta-		- cm/planta -	
UFV 2147	4,09	4,83	4,15	5,11	188,6	216,5	43,7	47,8	19,6	21,8	36,8	30,7
UFV 2149	4,10	4,87	4,14	5,13	235,0	204,9	59,0	53,2	23,9	23,2	29,1	37,3
IAC 4045	4,05	4,89	4,14	5,09	136,8	163,4	36,7	34,7	15,5	16,4	30,0	22,3
IAC 4782	4,05	4,91	4,12	5,08	145,7	174,2	45,7	37,2	16,8	14,4	21,1	21,4
UFV 3880	4,11	4,90	4,15	5,16	215,7	347,0	48,8	65,5	22,0	30,2	37,0	47,0
Média	4,07	4,87	4,14	5,11	184,4	221,2	46,8	47,7	19,6	21,2	30,8	31,7
C.V. (%)	2,2		1,2		22,2		18,9		20,4		41,1	

Quadro 3 - Contrastes ortogonais analisados e seus valores para pH da rizosfera (pHr) e pH do solo (pHs), produção de biomassa seca da parte aérea (BPA) e das raízes (BRA), área superficial (SUP) e comprimento total das raízes (CR)

Tratamento	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
Com Al									
UFV 2147	1	3	1	0	0	0	0	0	0
UFV 2149	1	3	-1	0	0	0	0	0	0
IAC 4045	1	-2	0	1	1	0	0	0	0
IAC 4782	1	-2	0	1	-1	0	0	0	0
UFV 3880	1	-2	0	-2	0	0	0	0	0
Sem Al									
UFV 2147	-1	0	0	0	0	3	1	0	0
UFV 2149	-1	0	0	0	0	3	-1	0	0
IAC 4045	-1	0	0	0	0	-2	0	1	1
IAC 4782	-1	0	0	0	0	-2	0	1	-1
UFV 3880	-1	0	0	0	0	-2	0	-2	0
pHr	-0,80**	0,02 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,06 ^{ns}	0,0 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,0 ^{ns}	-0,01 ^{ns}
pHs	-0,97**	0,0 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	0,01 ^{ns}
BPA (mg)	-36,84**	45,72 ^{ns}	-46,48 ^{ns}	-74,40*	-8,85 ^{ns}	-17,52 ^{ns}	11,62 ^{ns}	-178,22**	-10,85 ^{ns}
BRA (mg)	0,91 ^{ns}	7,61 ^{ns}	-15,33*	-7,66 ^{ns}	-8,96 ^{ns}	4,72 ^{ns}	-5,34 ^{ns}	-29,58**	-2,50 ^{ns}
SUP (cm ²)	1,65 ^{ns}	3,65 ^{ns}	-4,24 ^{ns}	-5,84 ^{ns}	-1,31 ^{ns}	2,14 ^{ns}	-1,42 ^{ns}	-14,79**	1,94 ^{ns}
CR (cm)	0,93 ^{ns}	3,55 ^{ns}	7,67 ^{ns}	-11,48 ^{ns}	8,92 ^{ns}	4,53 ^{ns}	-6,53 ^{ns}	-25,16*	0,91 ^{ns}

* e **: significativo em nível de 5 e 1%, respectivamente, pelo teste F.

ns: não significativo em nível de 5% pelo teste F.

Quadro 4 - Percentual de redução ou aumento da produção de biomassa seca da parte aérea (BPA) e das raízes (BRA), da superfície (SR) e comprimento total de raízes (CR) em cinco genótipos de café em função da presença de Al trocável no solo⁽¹⁾

Genótipo	BPA	BRA	SR	CR	Média
	----- % -----				
UFV 2147	-12,91	-8,71	-9,86	+19,06	-2,97
UFV 2149	+14,71	+10,97	+2,93	-21,93	+1,67
IC 4045	-16,24	+5,77	-5,43	+34,66	+4,69
IC 4782	-16,38	+22,87	+16,30	-1,30	+5,37
UFV 3880	-37,85	-25,45	-27,21	-21,17	-27,92

A progênie de Catimor UFV 3880 apresentou diferença significativa em relação aos genótipos de Icatu, quanto à produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes, superfície e comprimento das raízes na ausência de Al (contraste 8, Quadro 3). Entretanto, na presença de Al, para este genótipo, foram observados os maiores percentuais de redução em todas as características avaliadas (Quadro 4).

As médias obtidas para o conjunto de avaliações (Quadro 4) permite concluir que não seria esperada limitação no crescimento radicular para os genótipos Catuaí (UFV 2149) e para os Icatu (IAC 4045 e IAC 4782), na presença de 70% de saturação por Al no solo, uma vez que, estes genótipos não apresentaram redução na presença de Al.

CONCLUSÕES

1. Aumento no pH da rizosfera não está relacionado com a tolerância ao alumínio nos genótipos de café.
2. Na presença de calagem ocorreu pequeno abaixamento no pH da rizosfera.

3. A técnica do agar-indicador mostrou-se eficiente para estudo de avaliação do pH da rizosfera.

4. A progênie de Catimor UFV 3880 apresentou maior sensibilidade ao alumínio, enquanto que o Catuaí Amarelo UFV 2149 (LCH 2077-2-12-91) apresentou maior tolerância.

LITERATURA CITADA

BRACCINI, M.C.L.; MARTINEZ, H.E.P.; PEREIRA, P.R.G.; SAMPAIO, N.F. & SILVA, E.A.M. Tolerância de genótipos de cafeeiro ao alumínio em solução nutritiva: I. Crescimento e desenvolvimento da parte aérea e sistema radicular. R. Bra. Ci. Solo, 22:435-442, 1998.

CAMBRAIA, J.; CHANDÍAS, J.E.T.; SANT'ANNA, R. & ESTEVÃO, M.M. Efeito do alumínio e da proporção $\text{NO}_3^- / \text{NH}_4^+$ sobre a composição do nitrogênio solúvel em sorgo. R. Ceres, 35:273-282, 1987.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 4ª aproximação. Lavras, 1989. 159p.

DINKELAKER, B.; HAHN, G.; RÖMHELD, V.; WOLF, G.A. & MARSCHNER, H. Non-destructive methods for demonstrating chemical changes in the rhizosphere: I. Description of methods. In: BARROW, N.J. ed. Plant nutrition from genetic engineering to field practice. Dordrecht, Klumer Academic, 1993. p. 71-74. (Developments in plant and soil sciences, 45).

DURIEUX, R.P.; JACKSON, W.A.; KAMPRATH, E.J. & MOLL, R.H. Inhibition of nitrate uptake by aluminium in maize. Plant Soil, 151:97-104, 1993.

FOY, C.D. Plant adaptation to acid, aluminum-toxic soils. Commun. in Soil Sc. Plant Anal., 19: 959-987, 1988.

GAHOONIA, T.S. Influence of root-induced pH on the solubility of soil aluminium in the rhizosphere. Plant Soil, 149:289-291, 1993.

- KELTJENS, W.G. Plant adaptation and tolerance to acid soils; its possible Al avoidance – A review. In: MONIZ, A.C.; FURLANI, A.M.C.; SCHAFFERT, R.E.; FAGERIA, N.K.; ROSOLEM, C.A. & CANTARELLA, H. (ed.). Plant-soil interactions at low pH: sustainable agriculture and forestry production. Campinas/Viçosa: SBCS, 1997. p.109-117. (Proceedings of the fourth International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH).
- KELTJENS, W.G. & LOENEN, E. van Effects of aluminium and mineral nutrition on growth and chemical composition of hydroponically grown seedlings of five different forest tree species. *Plant Soil*, 104:39-50, 1989.
- KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. *Annual Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.*, 46:237-260, 1995.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London, 889p., 1995.
- MARSCHNER, H. & RÖMHELD, V. In vivo measurement of root-induced pH changes at the soil-root interface: effect of plant species and nitrogen source. *Z. Pflanzenphysiol. Bd.*, 111:241-251, 1983.
- MARSCHNER, H.; RÖMHELD, V. OSSENBERG-NEUHAUS, H. Rapid method for measuring changes in pH and reducing processes along of intact plants. *Z. Pflanzenphysiol. Bd.*, 105:407-416, 1982.
- PAVAN, M.A. & BINGHAM, F.T. Toxidez de alumínio em cafeeiros cultivados em solução nutritiva. *Pesq. agrop. bras.*, 17:1293-1302, 1982.
- 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 Agrônômico & Fundação IAC, 1996. 285p. (Boletim Técnico, 100).
- RODRIGUES, L.A. Crescimento e composição mineral na parte aérea e nas raízes de duas variedades de café em resposta à calagem na subsuperfície do solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 89p.
- ROSSIELLO, R.O.P.; ARAÚJO, A.P.; MANZATTO, C.V. & FERNANDES, M.S. Comparação dos métodos fotoelétrico e da interseção na determinação de área, comprimento e raio médio radicular. *Pesq. agrop. bras.*, 30:633-638, 1995.
- SILVA, C.A.; VALE, F.R. & GUILHERME, L.R.G. Efeito da calagem na mineralização do nitrogênio em solos de Minas Gerais. *R. Bra. Ci. Solo*, 18:471-476, 1994.

- SLASKI, J.J. Response of calmodulin-dependent and calmodulin-independent NAD kinase to aluminum in root tips from various cultivated plants. *J. Plant Physiol.*, 136:40-44, 1990.
- SUHAYDA, C.G. & HAUG, A. Organic acids reduce aluminum toxicity in maize root membranes. *Physiol. Plant.*, 68:189-195, 1986.
- TAN, K.; KELTJENS, W.G. & FINDENEGG, G.R. Effects of nitrogen form on aluminum toxicity in sorghum genotypes. *J. Plant Nutr.*, 15: 1383-1394, 1992.
- TAYLOR, G.J. Current views of the aluminum stress response; the physiological basis of tolerance. *Current Topics Plant Bioch. Physiol.*, 10:57-93, 1991.
- VAAST, P.H. & ZASOSKI, R.J. Effects of VA-mycorrhizae and nitrogen sources on rhizosphere soil characteristics, growth and nutrient acquisition of coffee seedlings (*Coffea arabica* L.). *Plant Soil*, 147:31-39, 1992.
- ZANG, G. & TAYLOR, G.J. Effect of aluminum on growth and distribution of aluminum in tolerant and sensitive cultivars of *Triticum aestivum* L. *Commun. Soil Sc. Plant Anal.*, 19:1195-1205, 1988.

RESPOSTAS DE TRÊS CULTIVARES DE CAFÉ AO ALUMÍNIO TROCÁVEL EM COLUNAS DE SOLO

RESUMO

O experimento foi conduzido em casa de vegetação para avaliar o crescimento da parte aérea e das raízes e a composição mineral de três cultivares de café, em resposta a diferentes saturações de Al na camada superficial e elevada acidez subsuperficial em colunas de solo. A acidez do solo foi neutralizada com doses de carbonatos de cálcio e de magnésio (0; 2,4; 4,8; 9,6 e 12,0 t ha⁻¹) para reduzir a saturação por Al de 70 para 45, 29, 0 e 0%, equivalentes aos teores de Al trocável de 1,8; 1,2; 0,9; 0 e 0 cmol_c dm⁻³, respectivamente. Os tratamentos foram arranjos num esquema fatorial 3 x 5 + 3 (cultivares de café e doses de calcário) mais três tratamentos adicionais, que consistiram da aplicação de calcário (6,0 t ha⁻¹) em toda a coluna de solo para os três cultivares. Foram estudados dois cultivares classificados como tolerantes (Catuaí Amarelo – UFV 2149 e Icatu Vermelho – IAC 4045) e um classificado sensível ao Al (Catuaí Vermelho – UFV 2147). Após oito meses de cultivo foram avaliados a produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes, o comprimento e a superfície das raízes em cada anel. No tecido vegetal foram determinadas as concentrações de Al, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn. A influência da calagem sobre a produção de biomassa seca e sobre a absorção de Al pelas plantas foi

pequena. Tanto o cultivar sensível quanto os tolerantes emitiram raízes em camadas de solo com alta saturação por Al. Entretanto, a elevada saturação por Al reduziu o comprimento e a superfície das raízes do cultivar Catuaí Vermelho. A calagem reduziu a concentração de Cu e Zn na planta; desta forma, a produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes dos cultivares Catuaí Vermelho e Icatu Vermelho foi maior sem a correção da acidez do solo. Houve menor produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes, para os três cultivares de café, quando toda a coluna de solo foi corrigida.

Termos para indexação: *Coffea arabica* L., saturação por alumínio, acidez, calagem.

SUMMARY: RESPONSE OF THREE CULTIVARS OF COFFEE EXCHANGEABLE ALUMINUM IN SOIL COLUMN

An experiment was carried out in greenhouse to evaluate the shoot and root growth and nutrient uptake by three coffee cultivars in relation to different aluminum saturation in the surface layer and high subsurface acidity in soil columns. The soil acidity was neutralized using CaCO₃ and MgCO₃ doses (0; 2.4; 4.8; 9.6 e 12.0 t ha⁻¹) to reduce Al saturation from 70 to 45, 29, 0 e 0%, equivalent to exchangeable Al concentrations of 1.8; 1.2; 0.9; 0 e 0 cmol_cdm⁻³, respectively. The treatments were arranged in a factorial scheme 3 x 5 + 3 (coffee cultivars x lime doses) and also three additional treatments, according to liming (6.0 t ha⁻¹) in all soil column for the three cultivars. Two cultivars classified as tolerant were evaluated (Catuaí Amarelo – UFV 2149 and Icatu Vermelho – IAC 4045) and also a cultivar classified as Al-sensitive one (Catuaí Vermelho – UFV 2147). The coffee plants were grown for eight months and after that the shoot and root dry biomass production, root length and surface in each PVC cylinders were evaluated. The Al, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu and Zn concentrations were evaluated in plant tissues. The liming influence on dry biomass production and on Al uptake by coffee plants was small. Both Al-

sensitive and tolerant cultivars grew root into soil layer with high Al saturation. However high Al saturation reduced root length and surface of Catuaí Vermelho cultivar. Liming reduced Cu and Zn concentrations in plant. Therefore, shoot and root dry biomass yield of Catuaí Vermelho and Icatu Vermelho cultivars was greater without liming. Shoot and root dry biomass yield of the three coffee cultivars was smaller when all soil column was limed.

Index terms: Coffea arabica L., aluminum saturation, soil acidity, liming.

INTRODUÇÃO

O excesso de alumínio trocável é um dos mais importantes efeitos adversos da acidez do solo sobre o crescimento das plantas, especialmente dentro de certos valores de pH. Em pH abaixo de 5,0 a solubilidade do Al aumenta significativamente e grande parte dos sítios de troca do solo podem estar ocupados por este elemento (Kochian, 1995). Além disso, sucessivas aplicações de fertilizantes de reação ácida no solo, como os adubos nitrogenados, causam grande acidificação dos solos com cafezais na projeção da copa (Raij et al., 1996b).

O Al tem vários efeitos diretos sobre as plantas, particularmente quanto ao crescimento das raízes. As raízes tornam-se curtas e grossas e não se aprofundam no perfil do solo para absorver água e nutrientes (Foy, 1988; Taylor, 1991). O Al pode também ter vários efeitos indiretos, entre eles, interações com outros nutrientes, decrescendo sua disponibilidade e absorção que acarreta efeitos sobre as funções internas desses nutrientes nas plantas (Marschner, 1995).

Apesar de diversos trabalhos mostrarem que a calagem pode aumentar consideravelmente a produtividade do cafeeiro (Lazzarini et al., 1975; Chaves et al., 1984; Viana et al., 1990), a correção do solo para seu cultivo é assunto que tem suscitado dúvidas.

A calagem do cafeeiro é recomendada com base em resultados da análise de solo de amostras coletadas na projeção da copa, parte mais acidificada do

terreno devido à aplicação de adubos nitrogenados. Raij et al. (1996b) verificaram pequeno efeito da calagem sobre a produção de café e que a meta de saturação por bases preconizada de 70%, para amostragens na projeção das copas é muito elevada. Isto porque a saturação por bases nas entrelinhas é mais elevada. Além disso, a fixação de um valor de saturação por bases, que varia entre 50 e 70%, não leva em conta os elementos que estão tornando-a alta ou baixa. Se houver muito H^+ e pouco Al^{3+} , por exemplo, tem-se uma situação muito diferente daquela em que o solo apresenta elevada saturação por Al^{3+} .

Malavolta e Moreira (1997) observaram maior acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S e maior crescimento de mudas de café em solução nutritiva com pH 4,0. Ambas as variáveis decresceram com o aumento do pH de 4,0 para 7,5. Esse resultado também foi evidenciado por Passo & Ruiz (1995) para a variedade Catuaí. A produção de matéria seca da parte aérea e das raízes foi maior em pH 4,0 do que em pH 5,5. Malavolta e Lima Filho (1997) citam o exemplo de uma propriedade no sul de Minas Gerais onde foram encontrados, em média, os seguintes componentes de acidez: pH ($CaCl_2$) 4,3, H^+ 5,1 $cmol_c\ dm^{-3}$, Al^{3+} 0,9 $cmol_c\ dm^{-3}$ e V% 35 e a produtividade média de 59 sacas por hectare.

Por outro lado, Chaves et al. (1988) verificaram que o baixo teor de cálcio (0,7 $cmol_c\ dm^{-3}$) e alto de Al (1,4 $cmol_c\ dm^{-3}$) na subsuperfície diminuíram drasticamente o crescimento do cafeeiro. A aplicação do calcário em colunas de solo até 60 cm de profundidade proporcionou condições químicas mais favoráveis para o crescimento radicular, refletindo em maior desenvolvimento das mudas de café.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o crescimento e a composição mineral de três cultivares de café com diferentes graus de tolerância ao Al, submetidos a níveis crescentes de calagem na camada superior. Objetivou-se ainda comparar o efeito da calagem superficial e da calagem uniforme em colunas de solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais (20°45'S 42°51'W) num Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico textura muito argilosa. A amostra de solo foi coletada na região de Viçosa, MG, na profundidade de 5 a 20 cm, apresentando as seguintes características físicas: 19% de areia grossa, 10% de areia fina, 3% de silte e 68% de argila; densidade aparente de 1,1 kg dm⁻³ e capacidade de retenção de água de 0,338 kg kg⁻¹. As características químicas encontram-se no quadro 1.

Os tratamentos foram arranjos num esquema fatorial 3 x 5 + 3 sendo 3 cultivares de café, 5 doses de calcário no anel superior e três tratamentos adicionais, que consistiram da aplicação de calcário em toda a coluna de solo para os três cultivares. O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso com três repetições.

Quadro 1 - Caracterização química das amostras de solo após a incubação com diferentes doses de calcário

Calcário	M.O. ⁽¹⁾	pH H ₂ O	P ⁽²⁾	K ⁽²⁾	Ca ⁽³⁾	Mg ⁽³⁾	Al ⁽³⁾	Al ⁽⁴⁾	H+Al ⁽⁵⁾	CTC total	V	m	Zn ⁽²⁾	Fe ⁽²⁾	Mn ⁽²⁾	Cu ⁽²⁾
t ha ⁻¹	dag kg ⁻¹		---	mg kg ⁻¹ ---	----- cmol _c dm ⁻³ -----					----- % -----			----- mg kg ⁻¹ -----			
0	3,09	4,8	1,0	28	0,5	0,2	1,8	1,57	7,2	8,00	10,0	70,0	1,0	116,8	4,7	0,4
2,4	-	5,0	1,5	24	1,0	0,4	1,2	0,31	5,1	6,54	22,0	45,5	-	-	-	-
4,8	-	5,2	1,0	22	1,4	0,7	0,9	0,05	4,5	6,68	32,6	29,2	-	-	-	-
9,6	-	6,1	1,0	23	5,0	1,6	0,0	0,03	1,8	8,53	78,9	0,0	-	-	-	-
12,0	-	6,5	1,2	22	5,4	2,1	0,0	0,05	1,2	8,77	86,3	0,0	-	-	-	-
6,0	-	5,4	0,9	26	2,9	1,1	0,6	0,04	3,9	8,01	51,3	12,7	-	-	-	-

⁽¹⁾Método Walkley-Black. ⁽²⁾Extrator Mehlich-1. ⁽³⁾Extrator KCl 1 mol L⁻¹. ⁽⁴⁾ Método do aluminon. ⁽⁵⁾Extrator Ca(CH₃COO)₂ 0,5 mol L⁻¹, pH 7,0.

Foram avaliados dois cultivares de café que foram previamente classificados como tolerantes ao Al: Icatu Vermelho (IAC 4045) e Catuaí Amarelo H 2077-2-12-91(UFV 2149) e um classificado como sensível ao Al: Catuaí Vermelho H 2077-2-5-99 (UFV 2147), de acordo com trabalho anterior (Braccini et al., 1998a). As sementes de Icatu Vermelho foram provenientes da fazenda experimental da Epamig em Patrocínio, e as de Catuaí do Departamento de Fitopatologia da UFV em Viçosa, MG.

Os vasos foram constituídos de colunas de PVC de 20 cm de diâmetro e 39 cm de altura, subdivididas em três anéis, correspondendo a três camadas de solo, de 0 a 12, 12 a 24 e 24 a 36 cm de espessura. O anel superior tinha 15 cm de espessura deixando 3 cm para irrigação. Os anéis foram unidos por fita adesiva, recebendo, na base, uma placa de isopor de 2 cm de espessura.

A amostra de solo foi seca ao ar, passada em peneira com malhas de 4 mm e dividida em porções de 3,77 e 7,54 dm³ correspondendo aos anéis superior e inferiores (intermediário e inferior), respectivamente. As porções de solo dos anéis superiores receberam calagem diferencial que consistiu de uma mistura de carbonato de cálcio e de magnésio, p.a. na relação molar de 4:1, resultando em diferentes saturações de Al.

As doses de calcário utilizadas foram 0; 2,4; 4,8; 9,6 e 12,0 t ha⁻¹ que corresponderam, respectivamente, a 0; 0,5; 1,0; 2,0 e 2,5 vezes a necessidade de calagem para se atingir 70% de saturação por bases (RAIJ, et al., 1996a). As amostras de solo destinadas aos anéis inferiores (intermediário + inferior) não foram corrigidas. A dose utilizada para os tratamentos adicionais foi de 6 t ha⁻¹ correspondendo a 1,25 vez a necessidade de calagem.

Após a aplicação do calcário, as amostras foram umedecidas até atingir 80% da capacidade de retenção de água, acondicionadas em sacolas plásticas e incubadas. Após 22 dias de incubação, quando o pH do solo monitorado diariamente manteve-se constante, o solo foi seco ao ar e à sombra, destorroado e passado em peneira de 4mm. As subamostras foram analisadas e apresentaram os seguintes níveis de saturação por Al: 69,2%; 45,5%; 29,2%; 0,0% e 0,0% equivalentes aos teores de Al trocável (cmol_c dm⁻³) de 1,8; 1,2; 0,9; 0,0 e 0,0 e aos

valores de pH de 4,8; 5,0; 5,2; 6,1 e 6,5. A amostra de solo utilizada para compor os tratamentos adicionais apresentou 12,7% de saturação por Al, 0,6 cmol_c dm⁻³ de Al trocável e pH 5,4.

Todas as porções de solo correspondentes aos anéis superiores e inferiores (intermediário + inferior) e os tratamentos adicionais receberam a seguinte adubação (mg kg⁻¹): P-400; K-150; N-50; S-40; B-0,81; Cu-1,33; Fe-1,55; Mn-3,66; Mo-0,15 e Zn-4,0. Os nutrientes foram adicionados nas formas: K₂SO₄, NH₄H₂PO₄, Ca(H₂PO₄)₂.2H₂O, H₃BO₃, CuSO₄.5H₂O, FeCl₃.6H₂O, MnCl₂.4H₂O, NaMoO₄.2H₂O, ZnSO₄.7H₂O. Essas formas foram aplicadas ao solo via solução com exceção do Ca(H₂PO₄)₂.2H₂O.

Os vasos foram preparados da seguinte forma: primeiro foram colocados 7,54 dm³ de solo (8 kg), correspondendo aos anéis inferiores e, logo em seguida, foram adicionados 3,77 dm³ de solo (4 kg) com as diferentes saturações de Al. Para os tratamentos adicionais, foram colocados 11,31 dm³ do solo (12 kg) que recebeu calagem uniforme. As plântulas, germinadas em rolos de papel-toalha, em germinador, foram transferidas para os vasos no estágio “palito de fósforo” (40 dias). Cada vaso recebeu quatro plântulas. Quando o primeiro par de folhas estava completamente desenvolvido, fez-se o desbaste, deixando duas plantas por vaso. A umidade nos vasos foi mantida próximo à capacidade de retenção de água do solo, mediante irrigações diárias.

Após 8 meses do plantio, avaliaram-se a altura das plantas e o diâmetro do caule e colheu-se o experimento, cortando-se a parte aérea rente ao solo. As folhas foram separadas do caule, enxaguadas por imersão rápida em água deionizada e secas em papel-toalha. Determinou-se a área foliar com a utilização de medidor de área (Delta-T Area Measurement System, modelo Area Meter MK₂). Posteriormente, a parte aérea foi seca em estufa com circulação forçada de ar a 70°C por 72 horas e avaliou-se a produção de biomassa seca.

Para avaliação do sistema radicular, separou-se um anel do outro com uma faca. As raízes existentes em cada anel foram separadas do solo com auxílio de peneira de 2 mm de malha, por catação manual e lavagem com jatos de água. As raízes foram acondicionadas entre folhas de papel-toalha umedecidas e

levadas para geladeira, para posterior avaliação do volume, do comprimento e da superfície de raízes de acordo com metodologia descrita por Rossiello et al. (1995). A área superficial de raízes foi quantificada pelo método fotoelétrico, com a utilização de medidor de área (Delta-T Area Measurement System, modelo Area Meter MK₂). Calculou-se o comprimento das raízes a partir da seguinte equação: $L = A/(2\pi R)$, sendo A a área superficial e R o raio calculado pela fórmula $R = 2V/A$, onde V representa o volume radicular, determinado pelo deslocamento de um volume de água numa proveta graduada de 500 mL. Em seguida, avaliou-se a produção de biomassa seca das raízes de cada anel. Foram coletadas amostras de solo do anel superior e dos inferiores (intermediário e inferior). Nessas amostras, determinaram-se: teor de matéria orgânica, de acordo com o método de Walkey-Black (Jackson, 1970); pH em água (1:2,5); Ca, Mg e Al trocáveis extraídos com KCl 1 mol L⁻¹; K, P, Zn, Fe, Mn e Cu pelo extrator de Mehlich-1; H + Al com Ca(Oac)₂ 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0 (Embrapa, 1997).

Amostras de 0,5 g de tecido vegetal secas e moídas, da parte aérea e das raízes, foram mineralizadas por digestão nítrico-perclórica na proporção 4:2. Nos extratos, P foi determinado pelo método do ácido ascórbico, modificado por Braga & Defelipo (1974); K, por fotometria de emissão de chama, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn por espectrofotometria de absorção atômica e Al determinado colorimetricamente pelo método d aluminon descrito por Alvarez V. (1985).

Os resultados foram submetidos à análise de variância e o efeito das doses de calcário foi avaliado por meio de equações de regressão, relacionando as variáveis de respostas da planta às doses de calcário aplicadas. Os modelos que melhor se ajustaram aos dados foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, pelo teste F, considerando os níveis de 10, 5 e 1% de probabilidade e no maior valor do coeficiente de determinação ajustado (R²).

A comparação entre cada média de tratamento de calcário versus tratamento adicional foi feita pelo teste t, a 5% de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os três genótipos de café apresentaram grande semelhança de comportamento quanto à distribuição do sistema radicular nos vasos. Não ocorreu limitação ao aprofundamento do sistema radicular nas camadas inferiores dos vasos que continham solo com elevada saturação por Al. Esse padrão de comportamento foi verificado também quando o solo foi uniformemente corrigido (Figuras 1, 2 e 3).

Visualmente não foram observados sintomas de toxidez de Al na parte aérea e nas raízes do anel superior com o aumento da saturação por Al e nem nas raízes do anel inferior, na presença de $1,8 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Al (70 % de saturação por alumínio). Os sistemas radiculares dos três cultivares cresceram até o anel basal (Figuras 1, 2 e 3). Entretanto, em função do envelhecimento ocorrido, as raízes presentes no último anel não foram avaliadas.

Rodrigues (1997) avaliou o crescimento de duas variedades de café, uma sensível, o Catuaí Vermelho - H 2077-2-5-99, e outra tolerante o Icatu Vermelho - IAC 4045 em resposta ao Al trocável, em solo com calagem e fertilização na camada superficial e diferentes saturações por Al na subsuperfície. Não foram observados sintomas de toxidez por Al na parte aérea, embora evidenciados nas raízes, caracterizando-se por redução no crescimento, engrossamento e escurecimento de raízes secundárias. No entanto, houve crescimento do sistema radicular nos anéis inferiores em todas as doses de calcário, para as duas variedades de café, mesmo no nível de saturação por Al de 93%.

Silva et al. (1984), trabalhando na identificação de genótipos de sorgo tolerantes ao Al, utilizando vasos com solo adubado e corrigido quanto à acidez no anel superior e sem calagem no anel inferior, observaram que somente dois, dentre os nove genótipos testados, conseguiram emitir raízes até o fundo dos vasos na presença de 82% de saturação por Al. Desta forma, apenas dois genótipos de sorgo foram considerados tolerantes ao Al.



Figura 1 - Distribuição dos sistemas radiculares do Catuaí Vermelho (LCH 2077-2-5-99) em função das diferentes saturações por alumínio no anel superior e da calagem aplicada em todo o solo do vaso.



Figura 2 - Distribuição dos sistemas radiculares do Catuaí Amarelo (LCH 2077-2-12-91) em função das diferentes saturações por alumínio no anel superior e da calagem aplicada em todo o solo do vaso.



Figura 3 - Distribuição dos sistemas radiculares do Icatu Vermelho (UFV 2955) em função das diferentes saturações por alumínio no anel superior e da calagem aplicada em todo o solo do vaso.

Esse comportamento não foi observado no presente trabalho uma vez que os cultivares classificados anteriormente como sensível (Catuaí Vermelho) e tolerantes (Catuaí Amarelo e Icatu Vermelho) (Braccini et al., 1998a) conseguiram emitir raízes até o fundo dos vasos, onde a saturação por Al no início do experimento era de 70%. Entretanto, em diversos trabalhos, principalmente em solução nutritiva, foram observadas diferenças acentuadas no crescimento do sistema radicular de plantas de café na presença de concentrações de Al entre 0 e 24 mg L⁻¹ (Pavan e Bingham, 1982) e 8 mg L⁻¹ de Al (Braccini et al., 1998a).

A presença do alumínio nas camadas inferiores do vaso não prejudicou o crescimento da parte aérea, notando-se pequeno aumento na produção de biomassa seca para o cultivar Catuaí Vermelho (sensível) e para o Icatu Vermelho (tolerante), na ausência de calagem (Figura 4A). Tal resultado deve, entretanto, ser avaliado com cautela, uma vez que o R² das equações ajustadas foi de apenas 0,63. Para o Catuaí Amarelo (tolerante) observou-se aumento da produção de biomassa seca da parte aérea em função das doses de calcário aplicadas no anel superior. Para este cultivar a produção máxima foi alcançada com 6,2 t ha⁻¹ de calcário, e 95% da produção máxima correspondeu a dose de calcário de 2,7 t ha⁻¹. Para os cultivares Catuaí Vermelho e Icatu Vermelho, a produção de biomassa seca da parte aérea decresceu com a aplicação de calcário no anel superior.

A produção de biomassa seca da parte aérea do tratamento adicional foi significativamente menor do que os demais tratamentos para os cultivares Catuaí Vermelho e Icatu Vermelho. Enquanto que, para o Catuaí Amarelo só houve diferença significativa na presença de 4,8 t ha⁻¹ de calcário que correspondeu a uma vez a necessidade de calagem (Quadro 2).

A inconsistência dos resultados descritos até aqui a respeito dos efeitos do Al sobre o crescimento da parte aérea, principalmente para os cultivares Catuaí Vermelho e Icatu Vermelho, provavelmente está relacionada a um desbalanço nutricional em consequência do aumento do pH, bem como outras propriedades do solo que serão discutidas posteriormente.

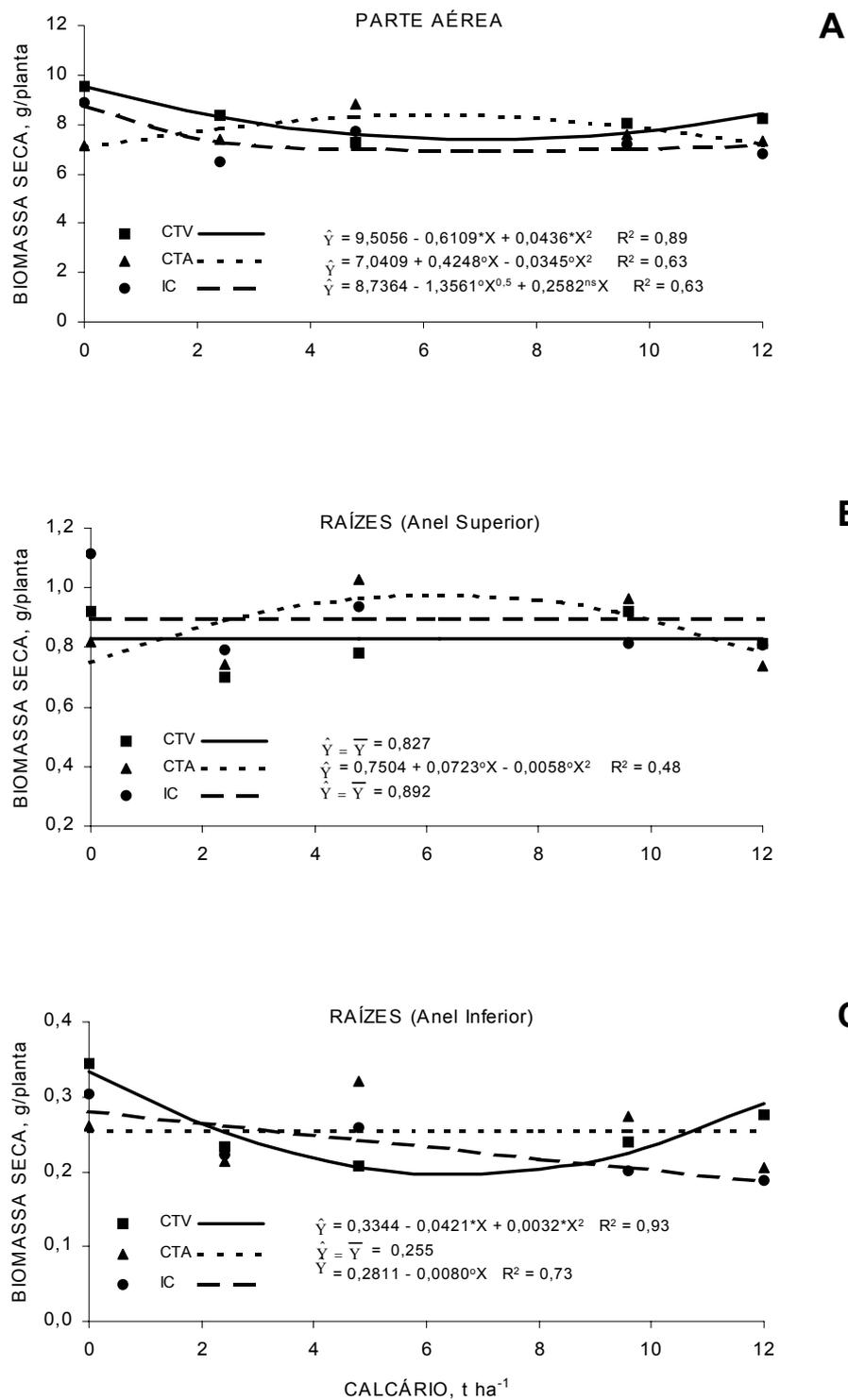


Figura 4 - Produção de biomassa seca da parte aérea (A), e raízes no anel superior (B) e no anel inferior (C) dos cultivares de café Catuaí Vermelho (CTV), Catuaí Amarelo (CTA) e Icatu Vermelho (IC) em função das doses de calcário aplicadas no anel superior.

Resultados semelhantes foram obtidos por Rodrigues (1997) quando os cultivares Catuaí Vermelho e Icatu Vermelho foram cultivados em solo com diferentes saturações por alumínio. A correção da acidez e a adubação do anel superior foram suficientes para manter o crescimento normal da parte aérea. Verificaram também, que a produção de matéria seca da parte aérea, comprimento do caule e aérea foliar não foram alterados pelas diferentes doses de calcário em subsuperfície.

No anel superior não houve variação na produção de biomassa seca de raízes para os cultivares Catuaí Vermelho e Icatu Vermelho, Figuras 4(B) e 4(C). Enquanto para o Catuaí Amarelo ocorreu aumento desta variável em função das doses de calcário aplicadas na superfície, atingindo a produção máxima com $6,2 \text{ t ha}^{-1}$. Esperava-se, em princípio, que o cultivar Catuaí Vermelho (sensível) tivesse o crescimento do sistema radicular reduzido quando a saturação por Al ultrapassasse a capacidade de tolerância do cultivar. Observou-se menor produção de biomassa seca de raízes do anel superior quando o solo foi uniformemente corrigido (Quadro 2).

Com base nos dados do anel inferior, onde, no tratamento com gradiente de calagem, o solo apresentava inicialmente 70% de saturação por Al, observou-se redução no crescimento das raízes dos cultivares Catuaí Vermelho e Icatu Vermelho, Figura 4(C). Para o Icatu Vermelho observou-se decréscimo linear com as doses de calcário, enquanto que para o Catuaí Vermelho obteve-se resposta quadrática. Esta tendência de aumento na produção de biomassa seca de raízes no anel inferior para as maiores doses de calcário aplicadas no anel superior indica maior sensibilidade ao Al. Por outro lado, este cultivar apresentou maior produção de biomassa na ausência de calagem, Figura 4(A). Este comportamento, aparentemente contraditório, pode estar relacionado com maior disponibilidade de micronutrientes no solo, principalmente cobre e zinco, em condições de acidez elevada.

No anel inferior não houve diferença entre o tratamento adicional e cada tratamento de calagem (Quadro 2). Entretanto, a saturação por Al no anel inferior permaneceu elevada com valores entre 49 e 65% (Quadro 3). Pavan et

al. (1982) verificaram redução no crescimento de 45% para as raízes e 34% para a parte aérea do cultivar Catuaí Vermelho, o mesmo que foi utilizado no presente trabalho, após sete meses de cultivo, na presença de 74% de saturação por Al. Em solução nutritiva, na presença de 8 mg L^{-1} de Al, Braccini et al. (1998a) constataram para este cultivar, redução no crescimento da parte aérea e das raízes de 49% e 40%, respectivamente.

Pavan et al. (1982) verificaram que a saturação por Al crítica que produz uma significativa redução no crescimento das raízes de café foi de 25%. Entretanto, redução no crescimento das raízes foi mais bem correlacionada com a atividade de Al^{3+} .

Portanto, no presente trabalho, algumas propriedades do solo como alto teor de matéria orgânica ($4,5 \text{ dag kg}^{-1}$) e alta concentração de P (94 mg dm^{-3}) podem ter contribuído para reduzir a atividade de Al na solução do solo (Quadro 3). A matéria orgânica pode controlar a solubilidade do Al no solo pela complexação organometálica. O grau de amenização da toxicidade de Al depende principalmente da concentração e da estabilidade do complexo formado (Miyazawa et al., 1992).

O cultivar Catuaí Vermelho (sensível) apresentou aumento linear para superfície, Figura 5(A) e comprimento das raízes, Figura 5(C) no anel superior em função do gradiente de calagem. Este comportamento indica maior sensibilidade deste cultivar, uma vez que, continuou respondendo à aplicação de calcário, ou seja, à redução da saturação por alumínio. Resultados semelhantes foram obtidos por Rodrigues (1997) para este cultivar com a redução da saturação por alumínio na subsuperfície. Por outro lado, o Icatu Vermelho (tolerante) não apresentou variação para estas características em função das doses de calcário aplicadas no anel superior.

Quadro 2 - Produção de biomassa seca da parte aérea e raízes nos anéis superior e inferior dos cultivares de café Catuaí Vermelho (CTV), Catuaí Amarelo (CTA) e Icatu Vermelho (IC) em função das doses de calcário aplicadas no anel superior e a comparação entre cada dose de calcário e a calagem uniforme

Doses de calcário	m ⁺	Produção de biomassa seca								
		Parte aérea			Raízes – anel superior			Raízes – anel inferior		
		CTV	CTA	IC	CTV	CTA	IC	CTV	CTA	IC
t ha ⁻¹	%	g/planta								
0	70	9,54**	7,16	8,87**	0,922*	0,820	1,114**	0,345	0,260	0,304
2,4	45	8,38**	7,39	6,48*	0,699	0,742	0,789	0,233	0,214	0,222
4,8	29	7,26*	8,83**	7,73**	0,782	1,026*	0,936*	0,207	0,321	0,258
9,6	0	8,04**	7,59	7,22**	0,918*	0,961*	0,811	0,239	0,273	0,202
12,0	0	8,25**	7,33	6,83*	0,814	0,738	0,809	0,276	0,205	0,188
6,0	13	5,48	6,07	4,70	0,550	0,670	0,638	0,307	0,312	0,275
C.V. (%)		14,1			21,0			29,9		

*, ** médias estatisticamente diferentes da média do tratamento adicional, calagem uniforme, pelo teste t, a 1 e a 5% de probabilidade, respectivamente.

⁺ saturação por alumínio no anel superior e em toda a coluna de solo.

Quadro 3 - Caracterização química das amostras de solo do anel superior e do anel inferior após o cultivo, em função das doses de calcário aplicadas no anel superior e da calagem uniforme

Calcário	M.O. ⁽¹⁾	pH	P ⁽²⁾	K ⁽²⁾	Ca ⁽³⁾	Mg ⁽³⁾	Al ⁽³⁾	Al ⁽⁴⁾	H+Al ⁽⁵⁾	CTC total	V	m	Zn ⁽²⁾	Fe ⁽²⁾	Mn ⁽²⁾	Cu ⁽²⁾
t ha ⁻¹	dag kg ⁻¹		---	mg kg ⁻¹	---	---	cmol _c dm ⁻³	---	---	---	---	%	---	---	---	mg kg ⁻¹
Anel superior																
0	4,45	3,97	101,0	48,0	0,60	0,03	1,80	1,51	11,60	12,35	6,1	70,30	3,50	87,2	4,13	1,60
2,4	4,57	4,50	79,5	62,7	2,03	0,30	0,63	0,53	9,10	11,57	21,6	20,43	3,13	79,8	5,10	1,50
4,8	4,68	4,97	88,2	62,0	3,27	0,60	0,13	0,10	7,80	11,82	34,0	3,20	3,20	67,8	5,27	1,47
9,6	4,39	5,77	89,5	54,0	5,20	1,07	0,00	0,02	3,50	9,89	64,7	0,00	3,33	58,1	5,10	1,13
12,0	4,59	6,27	86,6	55,7	5,87	1,27	0,00	0,03	3,50	10,79	67,6	0,00	2,93	48,8	5,47	1,10
6,0	4,66	5,40	79,9	70,3	4,17	0,83	0,07	0,07	6,70	11,87	43,6	1,27	3,03	59,9	4,50	1,17
Anel inferior																
0	4,71	3,70	96,7	88,7	0,77	0,03	1,93	1,61	11,80	12,83	8,0	65,30	3,80	86,8	5,00	1,50
2,4	4,91	3,70	95,7	84,7	0,80	0,10	1,87	1,63	12,20	13,31	8,3	62,77	2,97	86,0	4,87	1,47
4,8	4,07	3,77	104,2	89,7	0,93	0,10	1,87	1,71	11,90	13,20	9,9	58,90	3,13	75,0	5,07	1,50
9,6	4,64	3,83	107,3	92,3	1,30	0,20	1,73	1,38	11,90	13,60	12,5	50,57	3,00	87,2	5,27	1,53
12,0	4,86	3,83	102,6	89,7	1,30	0,20	1,73	1,31	12,10	13,86	12,7	49,60	3,10	89,7	5,40	1,57
6,0	4,59	4,90	94,13	97,7	4,50	1,00	0,10	0,07	7,30	13,03	44,0	1,70	2,90	60,8	5,13	1,23

⁽¹⁾Método Walkley-Black. ⁽²⁾Extrator Mehlich-1. ⁽³⁾Extrator KCl 1 mol L⁻¹. ⁽⁴⁾ Método do aluminon. ⁽⁵⁾Extrator Ca(CH₃COO)₂ 0,5 mol L⁻¹, pH 7,0.

O cultivar Catuaí Amarelo teve resposta quadrática com aumento das doses de calcário. A dose recomendável para atingir 95% da superfície máxima foi de 4,7 t ha⁻¹ e de 5,2 t ha⁻¹ para atingir 95% do comprimento máximo. Esses valores são próximos da recomendação de necessidade de calagem para atingir 70% de saturação por bases. Por outro lado, este cultivar não apresentou diferença quanto à superfície, Figura 5(B) e comprimento das raízes, Figura 5(D) do anel inferior, apesar da ligeira redução da saturação por Al na subsuperfície (Quadro 3) em consequência da calagem realizada no anel superior. Isto mostra que este cultivar é mais tolerante ao alumínio do que o Catuaí Vermelho.

A superfície, Figura 5(B) e o comprimento das raízes no anel inferior, Figura 5(D) do cultivar Catuaí Vermelho apresentou comportamento semelhante ao da produção de biomassa seca de raízes, Figura 4(C). Ou seja, observou-se maior resposta na presença de alta saturação por Al.

O comportamento do Catuaí Vermelho quanto à superfície e comprimento de raízes foi semelhante àquele obtido por Rodrigues (1997). Quando as características químicas do solo são mais favoráveis na superfície (aumento das doses de calcário) e desfavoráveis na subsuperfície (alta saturação por Al) ocorre maior alocação de raízes na superfície em relação à subsuperfície, desde que não haja acentuada limitação nutricional em doses elevadas de calcário. Portanto, decréscimos na superfície, Figura 5(B) e no comprimento de raízes, Figura 5(D) no anel inferior foram compensados por aumento dessas variáveis no anel superior, Figuras 5(A) e 5(C) não variando o comprimento total e superfície total de raízes em função das doses de calcário.

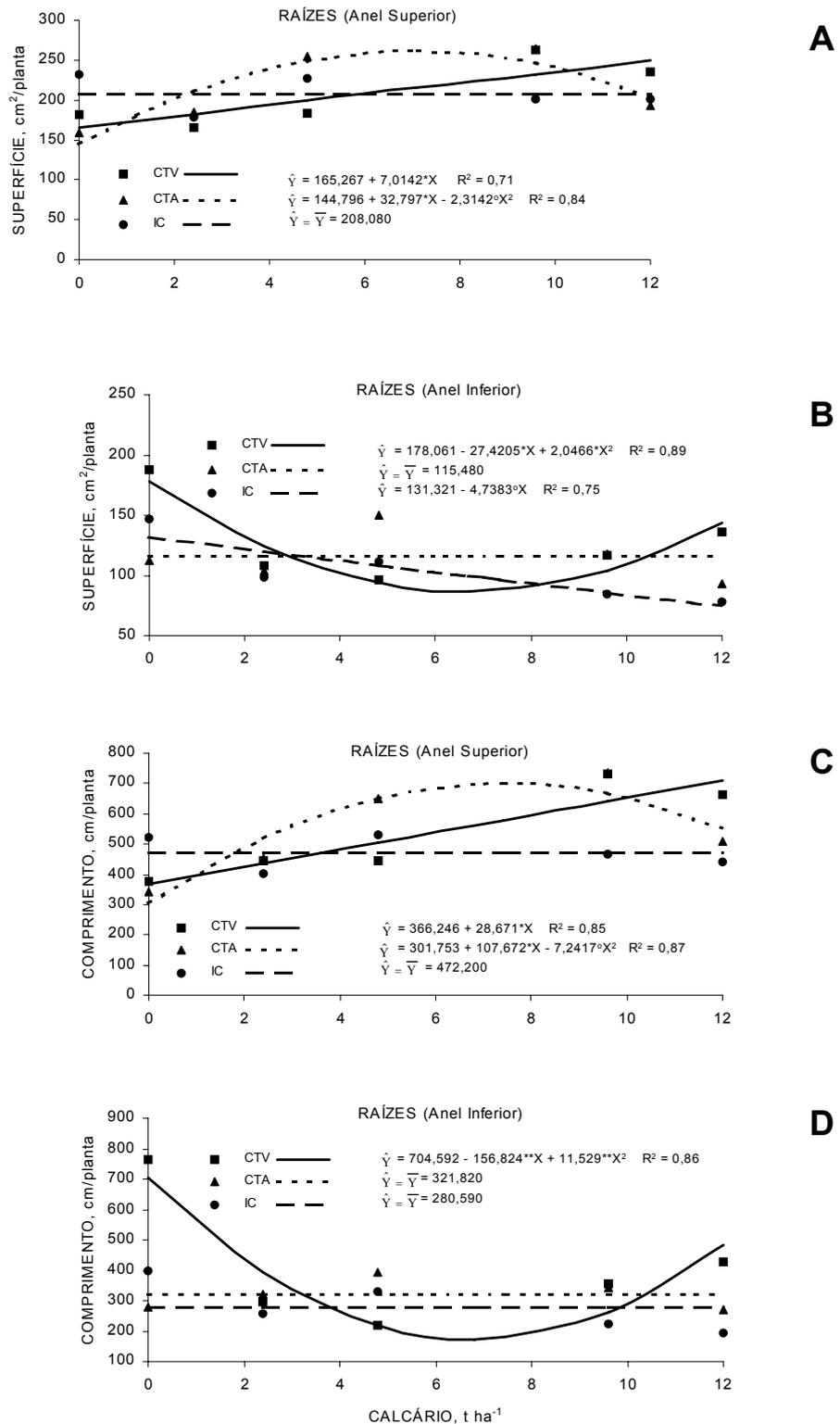


Figura 5 - Superfície de raízes no anel superior (A) e no anel inferior (B), comprimento total de raízes no anel superior (C) e no anel inferior (D) dos cultivares de café Catuaí Vermelho (CTV), Catuaí Amarelo (CTA) e Icatu Vermelho (IC) em função das doses de calcário aplicadas no anel superior.

Quadro 4 - Superfície e comprimento total de raízes nos anéis superior e inferior dos cultivares de café Catuaí Vermelho (CTV), Catuaí Amarelo (CTA) e Icatu Vermelho (IC) em função das doses de calcário aplicadas no anel superior e a comparação entre cada dose de calcário e a calagem uniforme

Doses de calcário	m ⁺	Anel superior			Anel inferior		
		CTV	CTA	IC	CTV	CTA	IC
Superfície de raízes							
t ha ⁻¹	%	----- cm ² /planta -----					
0	70	182,0	159,0	232,7	187,1	112,1*	147,3
2,4	45	165,5	184,1	178,4	107,9*	103,7*	98,4
4,8	29	183,0	253,8	226,3	95,7**	150,5	111,4
9,6	0	263,2	265,0	201,7	116,4*	118,0*	84,8*
12,0	0	234,7	193,4	201,3	135,7	93,1*	78,4*
6,0	13	156,9	195,7	149,3	181,7	174,4	144,1
C.V. (%)			32,6			36,8	
Comprimento de raízes							
		----- cm/planta -----					
0	70	377,0	341,7	520,5	762,3	277,1	399,2
2,4	45	444,1	453,3	402,6	296,8*	322,7	257,1
4,8	29	444,6	648,8	532,4	220,9*	393,3	330,4
9,6	0	729,5	737,6	464,9	354,2	344,0	224,0
12,0	0	661,8	509,6	440,5	426,9	271,9	192,2
6,0	13	421,5	540,1	385,8	620,7	561,7	461,1
C.V. (%)			43,2			51,9	

*, ** médias estatisticamente diferentes da média do tratamento adicional, calagem uniforme, pelo teste t, a 1 e a 5% de probabilidade, respectivamente.

⁺ saturação por alumínio no anel superior e em toda a coluna de solo.

O Catuaí Vermelho apresentou maior comprimento total e superfície total de raízes (944 cm/planta e 334 cm²/planta) em seguida o Catuaí Amarelo (860 cm/planta e 326 cm²/planta) e, por último, o Icatu Vermelho (753 cm/planta e 312 cm²/planta).

Não houve diferença significativa entre o tratamento adicional e cada dose de calcário tanto para superfície quanto para comprimento das raízes presentes no anel superior (Quadro 4). No anel inferior observaram diferenças significativas, mas de forma geral, a calagem em todo o volume de solo aumentou a superfície e o comprimento das raízes.

As relações superfície por biomassa seca de raízes (cm²/g) e comprimento por biomassa seca de raízes dão (cm/g) indicativo de engrossamento e encurtamento das raízes, respectivamente (Figura 6).

O gradiente de saturação por alumínio no anel superior influenciou a eficiência do sistema radicular do Catuaí Vermelho, quanto à produção de raízes finas, afetando o comprimento e a superfície. Este cultivar apresentou aumento linear nas relações superfície/biomassa, Figura 6(A) e comprimento/biomassa das raízes, Figura 6(C) com aplicação de calcário no anel superior. Portanto, as raízes eram mais grossas e curtas na presença de Al. Com a redução da saturação por Al ocorreu maior produção de raízes finas refletindo em aumento de superfície e de comprimento por unidade de peso das raízes. Estes resultados confirmam a maior sensibilidade deste cultivar. Por outro lado, os cultivares tolerantes não apresentaram alterações nestas relações mesmo na presença de 70% de saturação por Al, Figura 6(A), 6(C) e 6(D). Resultados semelhantes foram obtidos por Rodrigues (1997) para os cultivares Catuaí Vermelho e Icatu Vermelho com a redução da saturação por alumínio na subsuperfície.

Comparando a calagem uniforme no vaso e cada dose de calcário (Quadro 5) quanto às relações superfície/biomassa e comprimento/biomassa no anel inferior, observa-se que a calagem afetou essas relações. Maiores valores para o tratamento adicional indica que as raízes eram mais finas e compridas quando toda a coluna de solo foi corrigida. Essas diferenças foram mais acentuadas para o Catuaí Vermelho. Enquanto que para o Catuaí Amarelo e o Icatu Vermelho houve poucas diferenças significativas, confirmando a maior tolerância destes cultivares.

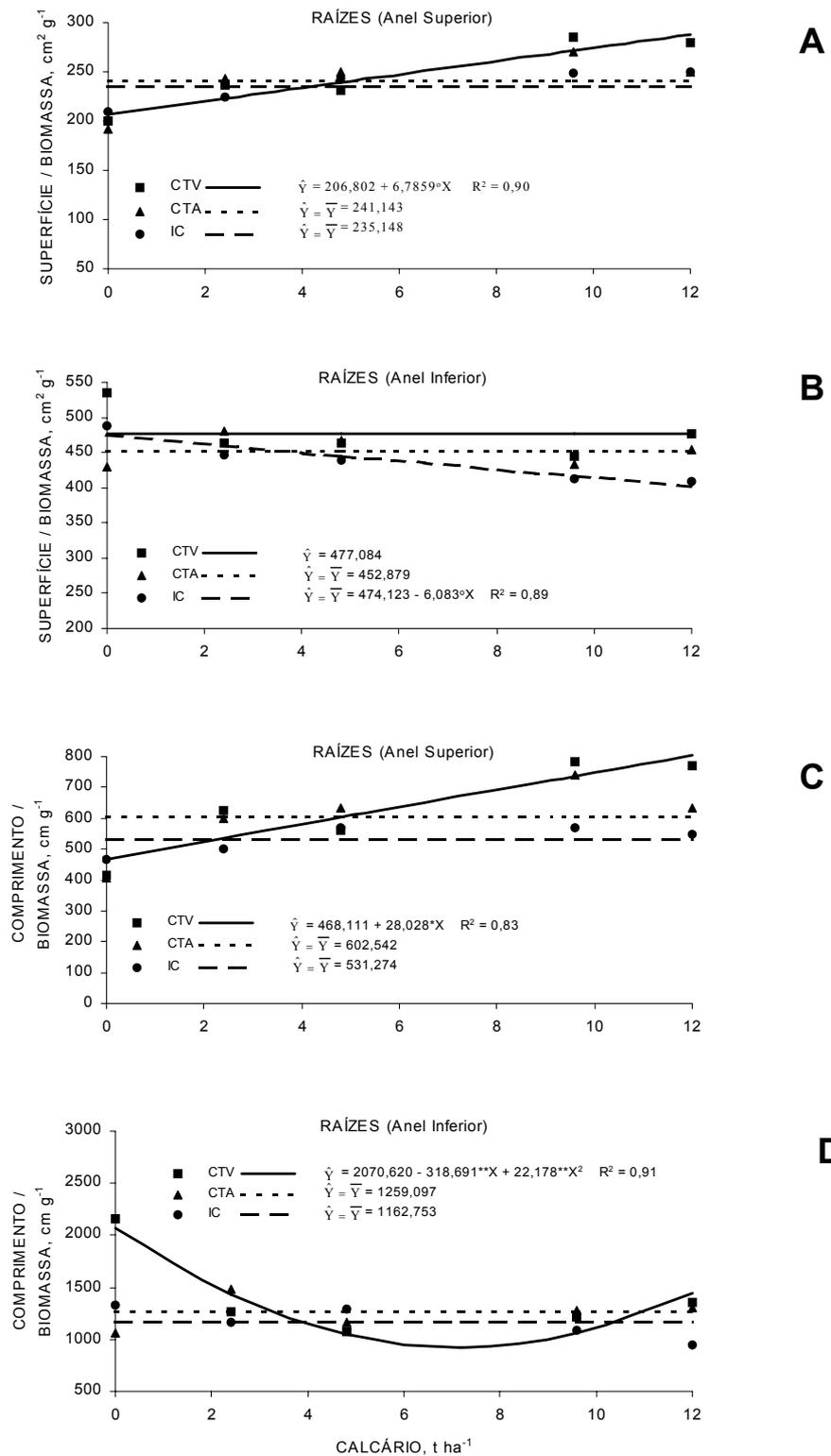


Figura 6 - Relações entre superfície de raízes por biomassa seca de raízes no anel superior (A) e no anel inferior (B), comprimento total de raízes por biomassa seca de raízes no anel superior (C) e no anel inferior (D) dos cultivares de café Catuaí Vermelho (CTV), Catuaí Amarelo (CTA) e Icatu Vermelho (IC) em função das doses de calcário aplicadas no anel superior.

Quadro 5 - Relações entre superfície de raízes por biomassa seca de raízes e comprimento total de raízes por biomassa seca de raízes nos anéis superior e inferior dos cultivares de café Catuaí Vermelho (CTV), Catuaí Amarelo (CTA) e Icatu Vermelho (IC) em função das doses de calcário aplicadas no anel superior e a comparação entre cada dose de calcário e a calagem uniforme

Doses de Calcário	m ⁺	Anel superior			Anel inferior		
		CTV	CTA	IC	CTV	CTA	IC
Superfície de raízes / biomassa seca de raízes							
t ha ⁻¹	%	----- cm ² g ⁻¹ -----					
0	70	199,4*	191,3*	209,5	535,5	429,8*	488,0
2,4	45	236,1	243,9	224,5	464,0*	479,6	446,8
4,8	29	231,2	249,5	243,1	464,2*	467,9	439,5
9,6	0	285,0	270,9	248,9	445,5**	433,7*	411,8
12,0	0	279,3	250,1	249,7	476,3*	453,4*	408,1*
6,0	13	284,1	293,8	229,6	597,2	557,2	509,6
C.V. (%)			37,5			49,8	
Comprimento de raízes / biomassa seca de raízes							
		----- cm g ⁻¹ -----					
0	70	413,4*	408,0*	468,3	2163,7	1058,8	1323,7
2,4	45	625,0	598,1	501,7	1266,6*	1486,1	1167,2
4,8	29	561,8	632,3	569,9	1077,2**	1162,5	1291,4
9,6	0	783,5	742,2	570,8	1215,1*	1282,1	1084,6
12,0	0	769,6	632,0	545,7	1350,7	1305,9	946,8
6,0	13	762,4	812,1	587,3	2078,2	1789,8	1558,3
C.V. (%)			31,2			32,6	

*, ** médias estatisticamente diferentes da média do tratamento adicional, calagem uniforme, pelo teste t, a 1 e a 5% de probabilidade, respectivamente.

⁺ saturação por alumínio no anel superior e em toda a coluna de solo.

Houve diferença significativa entre os cultivares quanto ao teor de Al na parte aérea. Entretanto, os cultivares não apresentaram variação quanto ao teor de Al na parte aérea em função da aplicação de calcário no anel superior. O cultivar Icatu Vermelho apresentou maior teor de Al (786 mg kg^{-1}), em seguida o Catuaí Amarelo (669 mg kg^{-1}) e por último o Catuaí Vermelho (611 mg kg^{-1}). Rodrigues (1997), obteve teores de Al bastante inferiores na parte aérea dos cultivares Icatu Vermelho e Catuaí Vermelho submetidos a calagem uniforme na superfície e doses de calagem em subsuperfície. Nesse trabalho a cultivar Catuaí Vermelho não apresentou variação no teor de Al da parte aérea em função da aplicação subsuperficial de calcário, apresentando um teor médio de 184 mg/kg . A cultivar Icatu Vermelho apresentou um decréscimo de 29% na concentração de Al da parte aérea quando a dose de calcário aplicada à subsuperfície foi aumentada de 0 a $4,1 \text{ t/ha}$. O teor de Al da parte aérea reduziu-se de 207 mg/kg para 145 mg/kg . Tais resultados diferem dos obtidos no presente trabalho.

Comparando a calagem uniforme e a calagem superficial quanto ao teor de Al na parte aérea (Quadro 6), observa-se que não houve diferença significativa. Entretanto para as três cultivares, o conteúdo de Al na parte aérea tendeu a ser menor quando todos os anéis foram corrigidos em relação a qualquer dose de calcário (Quadro 6).

Segundo Pavan & Bingham (1982), a concentração de Al de 300 mg kg^{-1} nas folhas de cafeeiros cultivados em solução nutritiva foi associada com sintomas de toxidez, como clorose e redução da produção de matéria seca. Pavan et al. (1982) observaram os mesmos sintomas, porém com teores na folha da ordem de 225 mg kg^{-1} em solo com diferentes saturações por Al.

Neste trabalho, foram encontrados até 822 mg kg^{-1} de Al na parte aérea e nenhum sintoma de toxidez. Esses resultados podem indicar a presença de algum mecanismo de detoxificação interna como, por exemplo, a compartimentalização do alumínio em determinados sítios, ou formação de quelatos com proteínas e ácidos orgânicos (Taylor, 1991). Comparando os resultados de Rodrigues (1997), com os deste trabalho, conclui-se que o café é mais tolerante ao Al que outras espécies como o sorgo (Silva et al., 1984) e o milho (Bennet et al., 1986).

Quadro 6 - Teor e conteúdo de alumínio na parte aérea, nas raízes nos anéis superior e inferior dos cultivares de café Catuaí Vermelho (CTV), Catuaí Amarelo (CTA) e Icatu Vermelho (IC) em função das doses de calcário aplicadas no anel superior e a comparação entre cada dose de calcário e a calagem uniforme

Doses de Calcário	m ⁺	Parte aérea			Raízes – anel superior			Raízes – anel inferior		
		CTV	CTA	IC	CTV	CTA	IC	CTV	CTA	IC
Teor de alumínio										
t ha ⁻¹	%	----- mg kg ⁻¹ -----								
0	70	635	746	771	3730	3268	4228	8237**	9784**	9072**
2,4	45	554	783	822	3250	5066	3651	8904**	9190**	8474*
4,8	29	641	562	756	3378	4624	3187	8033*	9469**	9004**
9,6	0	554	568	795	3667	4176	4660	7352	8128	7623
12,0	0	671	688	786	3928	4004	3902	8476**	8291*	7363
6,0	13	723	542	757	3606	5159	3520	5359	6072	6024
C.V. (%)		22,9			23,4			15,4		
Conteúdo de alumínio										
		----- mg/planta -----								
0	70	6,06	5,29*	6,94**	3,42	2,69	4,75*	2,84*	2,56	2,78
2,4	45	4,67	5,70*	5,31	2,24	3,73	2,96	2,06	1,94	1,89
4,8	29	4,68	4,94	5,81	2,68	4,78	2,94	1,65	2,94	2,32
9,6	0	4,39	4,28	5,84*	3,38	4,10	3,80	1,77	2,30	1,54
12,0	0	5,49	5,07	5,31	3,37	3,26	3,28	2,32	1,73	1,43
6,0	13	3,96	3,28	3,49	1,99	3,47	2,23	1,65	1,90	1,68
C.V. (%)		27,8			34,4			33,3		

*, ** médias estatisticamente diferentes da média do tratamento adicional, calagem uniforme, pelo teste t, a 1 e a 5% de probabilidade, respectivamente.

⁺ saturação por alumínio no anel superior e em toda a coluna de solo.

Foi observada maior concentração de Al nas raízes do que na parte aérea para os três cultivares (Quadro 6). Resultados semelhantes também foram observados por Rodrigues (1997) e Braccini et al. (1998b). Pavan & Bingham (1982) constataram que com até 4 mg L⁻¹ de Al na solução nutritiva ocorreu maior concentração de Al na parte aérea e acima de 8 mg L⁻¹ ocorreu o contrário, ou seja, maior acúmulo nas raízes.

O teor de alumínio das raízes no anel superior, Figura 7(A) foi menor que o teor nas raízes do anel inferior, Figura 7(B). Os cultivares Catuaí Vermelho e Icatu Vermelho não apresentaram variação quanto ao teor de Al no anel superior em função das doses de calcário. Por outro lado, o Catuaí Amarelo (tolerante) apresentou menor concentração de Al no anel superior na ausência de calagem. Entretanto, a concentração de Al aumentou atingindo o ponto de máximo (4.874 mg kg⁻¹ de Al) com 3,7 t ha⁻¹ de calcário, a partir daí decresceu com o aumento das doses de calcário.

A concentração de Al no anel inferior, Figura 7(B) foi maior do que aquela encontrada em plantas cultivadas em solução nutritiva (4.600 mg kg⁻¹) (Braccini et al., 1998b), entretanto, não foram observados sintomas visíveis de toxidez por este elemento.

A saturação por Al no anel inferior teve pequena redução em função da calagem realizada no anel superior, com valores entre 50 a 65% (Quadro 3). Desta forma, observou-se redução na concentração de Al nas raízes do anel inferior para os cultivares Catuaí Amarelo e Icatu Vermelho, Figura 7(B). Enquanto que o Catuaí Vermelho não apresentou alteração na concentração de Al.

Não houve diferença significativa entre o tratamento adicional, que recebeu 6,0 t ha⁻¹ de calcário em todos os anéis, e cada tratamento de calagem quanto à concentração de Al nas raízes no anel superior (Quadro 6). Mas de forma geral, o Catuaí Amarelo apresentou maior concentração e também maior conteúdo de Al do que os demais cultivares. Este comportamento também foi observado por Braccini et al. (1998b). Em solução nutritiva, este cultivar apresentou maior conteúdo de Al nas raízes (4,03 mg/planta) e pequena redução no crescimento das raízes (15%) na presença de 8 mg L⁻¹ de Al, o que sugere a existência de algum mecanismo de tolerância interna neste cultivar.

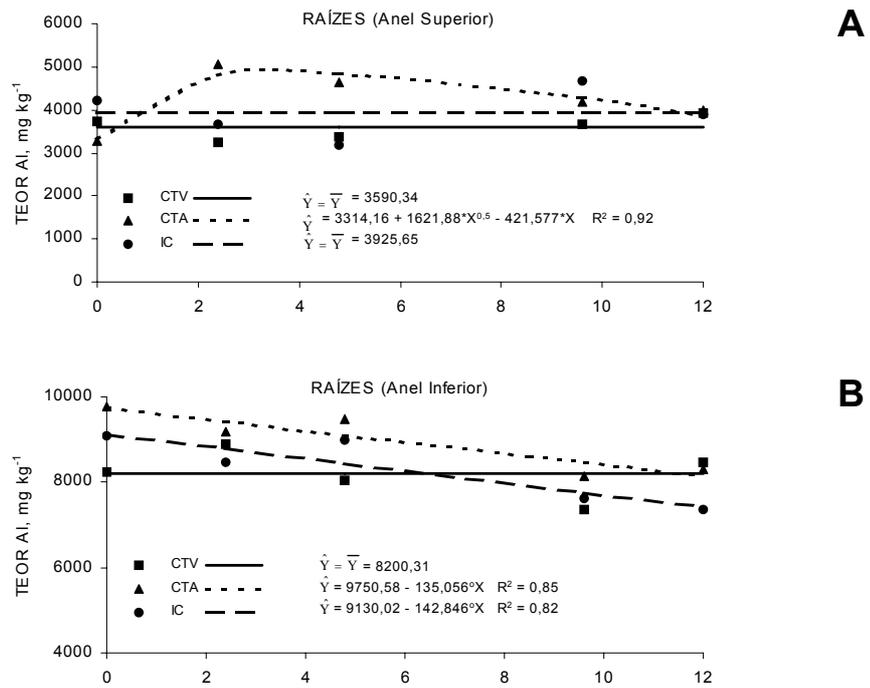


Figura 7 - Teor de alumínio nas raízes no anel superior (A) e no anel inferior (B) dos cultivares de café Catuaí Vermelho (CTV), Catuaí Amarelo (CTA) e Icatu Vermelho (IC) em função das doses de calcário aplicadas no anel superior.

Houve diferença significativa entre o tratamento adicional e os tratamentos de calagem, quanto à concentração de Al no anel inferior, até a dose de 4,8 t ha⁻¹ de calcário (Quadro 6). Entretanto, não ocorreu aumento na produção de biomassa seca das raízes dos cultivares Catuaí Amarelo e Icatu Vermelho (Quadro 2).

De acordo com recomendações do IBC (1987), sempre que a necessidade de calcário ultrapassar 4,0 t ha⁻¹ recomenda-se usar até 4 t num ano e o restante deve ser aplicado em anos posteriores. O efeito prejudicial de uma correção rápida é o aparecimento de graves deficiências de micronutrientes.

Chaves et al. (1984) avaliaram o efeito da calagem na produção de café em dois solos do Paraná, durante oito anos. Em ambos os solos houve aumento significativo nas produções anuais de café e acumuladas apenas com a mais baixa dose de calcário ($2,5 \text{ t ha}^{-1}$). As maiores doses (5 e 10 t ha^{-1}) diminuíram sistematicamente a produção. Isto porque a adição de 10 t ha^{-1} ocasionou uma diminuição sensível nos teores de K e Zn nas folhas, abaixo do mínimo requerido pelo cafeeiro, e um completo desbalanceamento nas proporções entre os cátions trocáveis no solo. A relação entre Ca-K trocáveis que melhor correlacionou com a produção de café foi de 13:1.

No presente trabalho esta proporção foi obtida com a menor dose de calcário ($2,4 \text{ t ha}^{-1}$). A maior dose (12 t ha^{-1}) aumentou a relação Ca-K no anel superior a 41:1. No anel inferior a relação Ca-K ficou abaixo do recomendável para qualquer dose de calcário (Quadro 3).

Embora a calagem possa aumentar consideravelmente a produtividade do cafeeiro em solos de baixa fertilidade, como os do cerrado (Lazzarini et al., 1975), não significa que a cultura seja muito exigente com relação à correção da acidez. Viana et al. (1990), em ensaio de calagem de longa duração, mostraram que, embora o cafeeiro tenha respondido à calagem, a produção máxima foi obtida com 26% de saturação por bases.

Freitas (1998) verificou que as plantas de café, em seu estágio inicial de crescimento, exigem menores doses de calcário que aquelas recomendadas pelos critérios em uso. Isto porque os valores de saturação por bases relativos a 95% da produção máxima de matéria seca total, para os diferentes solos estudados, variaram entre 20 e 40%. Portanto, foram inferiores aos índices de 60 a 70% encontrados na literatura como adequados para o cafeeiro.

A toxidez de Al está relacionada com vários desequilíbrios nutricionais principalmente aqueles envolvendo P e Ca (Foy, 1988; Bennet et al., 1986).

Com a redução da saturação por Al no anel superior ocorreu aumento da concentração de P na parte aérea dos cultivares Catuaí Amarelo e Icatu Vermelho, enquanto que, para o Catuaí Vermelho não houve alteração na concentração de fósforo, Figura 8(A). Apesar do aumento no teor de P com a

aplicação do calcário, os teores encontrados estão abaixo do nível adequado para o cafeeiro que se situa entre 0,12 e 0,19 dag kg⁻¹ (IBC, 1987; Matiello, 1991; Malavolta et al., 1997). Os cultivares tolerantes (Catuaí Amarelo e Icatu Vermelho) apresentaram maior eficiência de utilização de P na parte aérea na presença de alta saturação por Al e decréscimos com a aplicação de calcário ao solo, Figura 8(B).

Em solução nutritiva, Braccini et al. (1998b) constataram que a tolerância do cultivar Catuaí Amarelo ao Al foi associada à maior eficiência no uso do fósforo na presença de Al e à menor precipitação do fósforo nos tecidos radiculares. Efeitos similares de Al na absorção e no transporte de fósforo em cafeeiros foram descritos por Pavan & Bingham (1982) e Londoño & Valencia-Aristizábal (1983).

Não houve diferença significativa entre os cultivares quanto ao teor de P nas raízes, apresentando, em média, 0,07 dag kg⁻¹ no anel superior e 0,11 dag kg⁻¹ no anel inferior. Esses valores são inferiores àqueles obtidos por Braccini et al. (1998b) em solução nutritiva, onde o teor de P nas raízes foi, em média, 0,28 dag kg⁻¹ na ausência e 0,32 dag kg⁻¹ na presença de Al.

Apesar dos baixos teores de fósforo encontrados na parte aérea e nas raízes, a concentração de P no solo foi alta (Quadro 3). Este fato sugere que pode ter ocorrido reações entre P e Ca, com a formação de precipitados de fosfato de cálcio de baixa solubilidade e solubilização do P-Ca pelo extrator. Outra explicação para o fato seria a formação de superfícies recém-precipitadas de Fe-OH e Al-OH, com alto poder de fixação de P, desenvolvidas com a calagem prévia à aplicação de P (Novais et al., 1994).

De acordo com Pavan & Bingham (1982), o suprimento de P nos meios de cultivo ocasiona efeito protetor às injúrias causadas por Al. Isso tem levado muitos pesquisadores a especularem que os efeitos da fitotoxidez por Al podem ser atribuídos diretamente a uma deficiência de P induzida pelo Al.

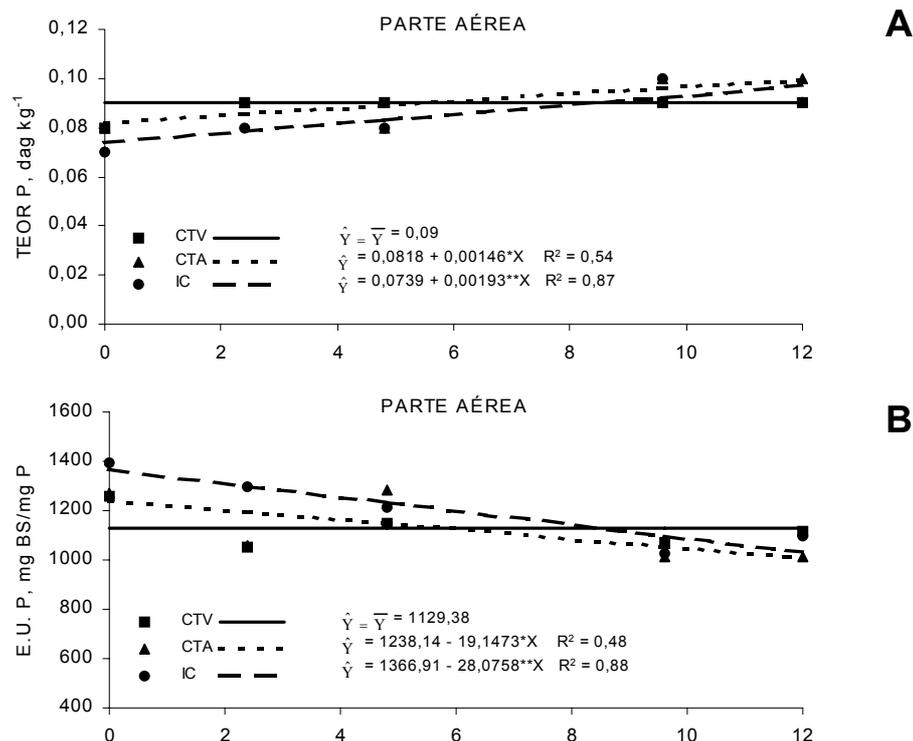


Figura 8 - Teor (A) e eficiência de utilização (B) de fósforo na parte aérea dos cultivares de café Catuaí Vermelho (CTV), Catuaí Amarelo (CTA) e Icatu Vermelho (IC) em função das doses de calcário aplicadas no anel superior.

Houve diferença significativa entre os cultivares quanto ao teor de Ca, Figura 9(A), e quanto à eficiência de utilização de Ca, Figura 9(B) na parte aérea. Todos os cultivares apresentaram resposta quadrática em função das doses de calcário aplicadas no anel superior. O cultivar Icatu Vermelho (tolerante) apresentou menores teores de Ca na parte aérea em todas as doses de calcário, por outro lado, apresentou maior eficiência de utilização de Ca. Os Catuaís tiveram comportamento semelhante, ou seja, aumentos crescentes no teor de Ca na parte aérea e ao mesmo tempo redução na eficiência de utilização de Ca com doses crescentes de calcário.

Os três cultivares tiveram respostas diferentes quanto ao teor de Ca nas raízes do anel superior, Figura 9(C). O Catuaí Vermelho (sensível) apresentou aumento linear, enquanto que para o Icatu Vermelho (tolerante) não houve

alteração no teor de Ca em função das doses de calcário. O Catuaí Amarelo (tolerante) apresentou aumento até a dose de $7,5 \text{ t ha}^{-1}$; a partir daí observou-se decréscimo no teor de Ca nas raízes do anel superior. A mesma tendência de comportamento dos cultivares também foi observada na avaliação de superfície e comprimento das raízes do anel superior, Figuras 5(A) e 5(C).

O tratamento adicional apresentou teores mais elevados de Ca na parte aérea que os demais (Quadro 7). Esse resultado mostra que a calagem apenas no anel superior limitou o suprimento de Ca às plantas. Entretanto, não foram observados sintomas de deficiência em nenhum dos tratamentos. De acordo com Malavolta et al. (1997), para plantas de café adultas o teor de Ca deve estar entre $1,3$ e $1,5 \text{ dag kg}^{-1}$, e Matiello (1991) indica que os sintomas de carência aparecem quando a concentração é inferior a $0,5 \text{ dag kg}^{-1}$. Sendo o Ca um elemento cuja concentração foliar aumenta com a idade, supõe-se que para plantas jovens os níveis críticos de Ca sejam menores que os referidos acima, porém não é provável que atinjam valores da ordem de $0,67 \text{ dag kg}^{-1}$, como o observado para o cultivar Icatu na dose zero de calagem. Tal fato evidencia a importância da calagem como fonte de Ca. Rodrigues (1997) relata teores de $1,13$ e $1,90 \text{ dag kg}^{-1}$ e, $1,24$ e $1,91 \text{ dag kg}^{-1}$ de Ca em folhas superiores e inferiores de plantas dos cultivares Icatu Vermelho e Catuaí Vermelho respectivamente, cultivadas até 6,5 meses de idade em colunas de solo com calagem superficial.

O teor de Ca nas raízes do anel inferior do tratamento adicional foi significativamente maior do que dos demais tratamentos (Quadro 7). Isto porque a calagem causa pouco movimento do Ca e elevação do pH além da camada de solo onde foi aplicada (Chaves et al., 1988).

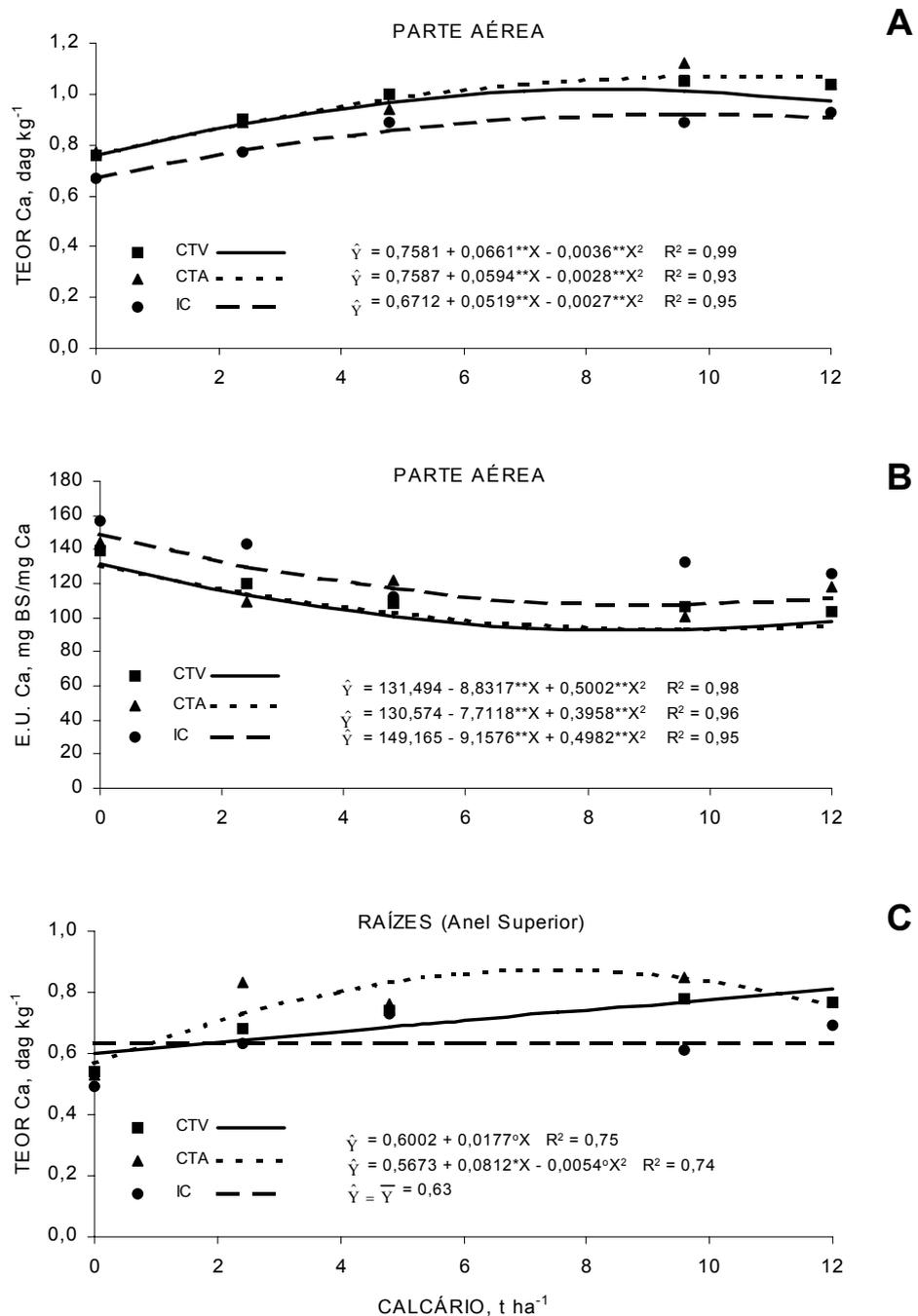


Figura 9 - Teor (A) e eficiência de utilização (B) de cálcio na parte aérea e teor de cálcio nas raízes no anel superior (C) dos cultivares de café Catuaí Vermelho (CTV), Catuaí Amarelo (CTA) e Icatu Vermelho (IC) em função das doses de calcário aplicadas no anel superior.

Quadro 7 - Teor de cálcio na parte aérea e nas raízes nos anéis superior e inferior dos cultivares de café Catuaí Vermelho (CTV), Catuaí Amarelo (CTA) e Icatu Vermelho (IC) em função das doses de calcário aplicadas no anel superior e a comparação entre cada dose de calcário e a calagem uniforme

Doses		Teor de cálcio								
De	m ⁺	Parte aérea			Raízes – anel superior			Raízes – anel inferior		
Calcário		CTV	CTA	IC	CTV	CTA	IC	CTV	CTA	IC
t ha ⁻¹	%	----- dag kg ⁻¹ -----								
0	70	0,76**	0,77**	0,67**	0,54*	0,53**	0,49*	1,56**	1,50**	1,48**
2,4	45	0,90**	0,89**	0,77**	0,68	0,83	0,63	1,63**	1,61**	1,41**
4,8	29	1,00**	0,94**	0,89**	0,74	0,76	0,73	1,56**	1,30**	1,45**
9,6	0	1,05**	1,12**	0,89**	0,78	0,85	0,61	1,78**	1,71**	1,50**
12,0	0	1,04**	1,04**	0,93**	0,77	0,77	0,69	1,48**	1,25**	1,43**
6,0	13	1,46	1,43	1,28	0,85	0,99	0,76	2,83	2,76	2,42
C.V. (%)		4,70			21,0			12,6		

*, ** médias estatisticamente diferentes da média do tratamento adicional, calagem uniforme, pelo teste t, a 1 e a 5% de probabilidade, respectivamente.

⁺ saturação por alumínio no anel superior e em toda a coluna de solo.

De acordo com Marschner (1995), o Al tem uma afinidade de 560 vezes maior por certos fosfolipídios das membranas que o cálcio. Isto indica que, desde que exista quantidade suficiente de cálcio trocável para manter a relação Ca/Al elevada, o crescimento das plantas não é afetado. Smyth & Cravo (1992) encontraram um valor crítico de 0,42 na relação Ca/Al trocáveis para obtenção de máxima produtividade de milho, soja e amendoim. Gama & Kiehl (1999) investigaram a causa da ausência de sintomas de toxidez de Al em plantas de milho, arroz e feijão, cultivados num Podzólico Vermelho-Amarelo do Acre com teor de Al trocável maior que 14 cmol_c dm⁻³ no horizonte B. Esses pesquisadores verificaram que a relação Ca/Al trocáveis foi de 0,48 no horizonte B, onde a saturação por Al era de 59%, prejudicial à maioria das culturas.

No presente trabalho, a relação Ca/Al trocáveis na ausência de calagem foi de 0,33 para o anel superior e 0,40 para o anel inferior (Quadro 3). Entretanto, o cultivar Catuaí Vermelho (sensível) e o Icatu Vermelho (tolerante) apresentaram maior produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes nesta condição.

Desta forma, a amenização da toxidez pelo Ca não parece ser a explicação para o fato, uma vez que, as relações Ca/Al trocáveis são inferiores ao valor crítico encontrado na literatura.

A calagem realizada no anel superior reduziu a concentração de manganês na parte aérea, Figura 10(A), nas raízes do anel superior, Figura 10(B) e nas raízes do anel inferior, Figura 10(C).

Sem aplicação de calcário os teores de manganês na parte aérea foram altos, na faixa de 579 a 646 mg kg⁻¹, sendo os teores mais elevados para os Catuaís do que para o Icatu Vermelho. No entanto, não foram observados sintomas de toxidez por este elemento. De acordo com recomendações do IBC (1987), teores foliares de manganês acima de 400-500 mg kg⁻¹ para o cultivar Bourbon e 700-800 mg kg⁻¹ para o cultivar Mundo Novo podem causar retardamento do crescimento e necrose foliar que inicia no ápice e nos bordos das folhas mais velhas e finalmente desfolha dos cafeeiros. Para o cultivar Catuaí Vermelho, os teores tóxicos de manganês nas folhas foram associados com uma concentração superior a 1.200 mg kg⁻¹ (Pavan & Bingham, 1981).

Houve diferença significativa entre o tratamento adicional até a dose de 4,8 t ha⁻¹ de calcário quanto ao teor de manganês na parte aérea (Quadro 8). De acordo com Matiello (1991) teor de manganês acima de 300 mg kg⁻¹ é considerado excessivo. Os teores considerados adequados variam de 120 a 210 mg kg⁻¹ (Malavolta et al., 1997).

A concentração de manganês nas raízes do anel inferior do tratamento adicional foi significativamente menor do que aquela encontrada nos tratamentos de calagem (Quadro 8). A redução na concentração de manganês com o aumento das doses de calcário foi, provavelmente, devida à oxidação do manganês a um estado de maior valência com o aumento dos valores de pH (Quadro 3).

Houve redução acentuada na concentração de cobre na parte aérea, Figura 11(A), e nas raízes no anel superior, Figura 11(B) e no anel inferior, Figura 11(C) com aplicação de calcário na camada superficial. Comparando a calagem uniforme com a calagem localizada, observa-se que acima de 2,4 t ha⁻¹ de calcário ocorreu redução significativa na concentração de cobre na parte aérea, com valores menores que 5,8 mg kg⁻¹ (Quadro 8). Teor de cobre abaixo de 5 mg kg⁻¹ é considerado deficiente com a presença de sintomas visuais evidentes (Matiello, 1991). De acordo com Malavolta et al. (1997), o teor de cobre adequado para o cafeeiro deve estar na faixa de 11 a 14 mg kg⁻¹. As recomendações do IBC (1987) admitem uma faixa mais ampla, de 8 a 16 mg kg⁻¹.

De qualquer forma, doses acima de 2,4 t ha⁻¹ de calcário aplicadas no anel superior reduziram a concentração de cobre abaixo do nível crítico. Portanto, esta pode ser uma das explicações de ter encontrado maior produção de biomassa seca da parte aérea, Figura 4(A) e das raízes do anel inferior, Figura 4(C) na ausência de calagem para os cultivares Catuaí Vermelho e Icatu Vermelho.

A deficiência de cobre tem se mostrado problemática em cafeeiros jovens, em regiões de solo com alto teor de matéria orgânica (IBC, 1987). Matiello et al. (1997) verificaram sintomas severos de deficiência de cobre em Latossolos Vermelho-Amarelos Húmicos nas áreas de altitude elevada na Zona da Mata de Minas Gerais, com teores de cobre na planta abaixo de 4 mg kg⁻¹. Os sintomas foram relacionados com encurvamento para baixo das folhas mais velhas e também presença de ondulações das folhas mais novas, bem visível na face superior, deixando as nervuras salientes na face inferior.

A causa usual de deficiência de cobre é o não fornecimento adequado de cobre, mas também, pode ser induzida pelo excesso de calagem, excesso de matéria orgânica (Matiello, 1991). No presente trabalho, as concentrações de cobre encontradas no solo estão dentro da faixa considerada adequada para o cafeeiro (1 a 3 mg kg⁻¹). No entanto, a disponibilidade de cobre foi baixa, possivelmente, em função dos altos teores de matéria orgânica ou do aumento do pH (Quadro 3).

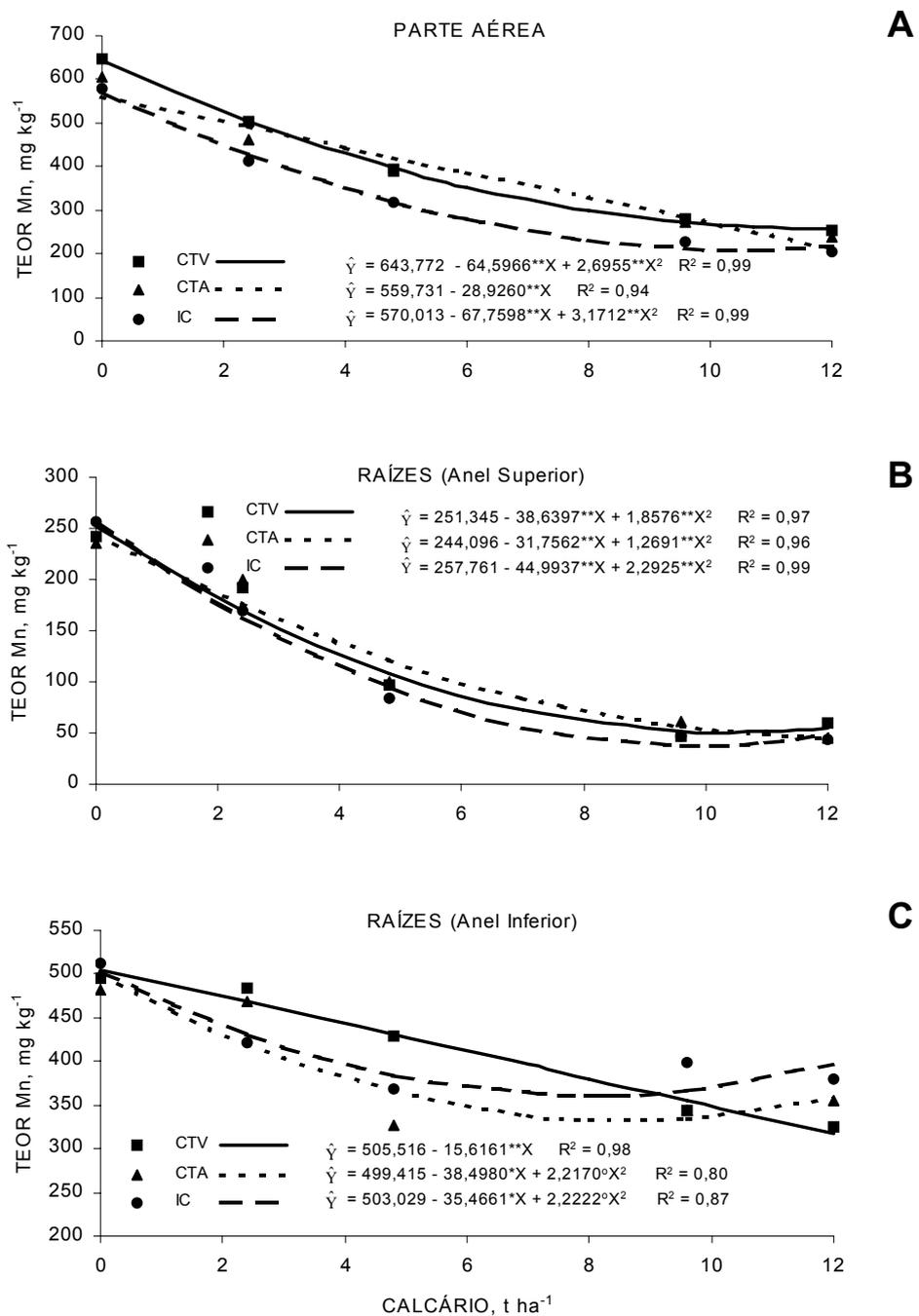


Figura 10 - Teor de manganês na parte aérea (A) e nas raízes no anel superior (B) e no anel inferior (C) dos cultivares de café Catuaí Vermelho (CTV), Catuaí Amarelo (CTA) e Icatu Vermelho (IC) em função das doses de calcário aplicadas no anel superior.

Quadro 8 - Teores de manganês, cobre e zinco na parte aérea e nas raízes nos anéis superior e inferior dos cultivares de café Catuaí Vermelho (CTV), Catuaí Amarelo (CTA) e Icatu Vermelho (IC) em função das doses de calcário aplicadas no anel superior e a comparação entre cada dose de calcário e a calagem uniforme

Doses de calcário	m ⁺	Parte aérea			Raízes – anel superior			Raízes – anel inferior		
		CTV	CTA	IC	CTV	CTA	IC	CTV	CTA	IC
Teor de manganês										
t ha ⁻¹	%	----- mg kg ⁻¹ -----								
0	70	646,5**	604,9**	579,2**	241,6**	235,1**	257,1**	495,3**	482,2**	512,8**
2,4	45	501,5**	460,7**	413,5**	191,3**	200,2**	169,3**	484,7**	468,0**	421,9**
4,8	29	392,2**	388,5**	317,3*	97,2	100,8	84,2	429,2**	326,5**	368,9**
9,6	0	280,2	271,5	227,8	46,8	61,2	46,4	344,2**	344,7**	398,8**
12,0	0	252,2	239,9	205,5	59,2	44,7	43,4	324,5**	354,2**	380,2**
6,0	13	193,7	205,0	203,3	58,2	66,7	62,6	179,7	179,3	189,2
C.V. (%)		16,7			20,4			17,1		
Teor de cobre										
		----- mg kg ⁻¹ -----								
0	70	9,42**	9,53**	9,35**	22,95**	14,48	17,22**	21,32**	19,03	22,57**
2,4	45	10,32**	8,70**	8,38**	14,90	13,02	14,13*	22,75**	22,17*	19,32
4,8	29	5,83	4,62	5,37	11,85	12,75	10,60	22,20**	19,20	16,25
9,6	0	2,60	3,50	3,48	13,48	11,03	10,37	17,33	16,48	15,30
12,0	0	3,37	4,80	3,73	10,63	9,75	9,77	14,73	18,02	14,22
6,0	13	3,40	3,25	3,98	10,95	10,92	9,58	13,42	13,63	14,38
C.V. (%)		28,7			20,8			18,1		
Teor de zinco										
		----- mg kg ⁻¹ -----								
0	70	15,30**	14,57**	13,37**	358,0**	350,7**	317,5**	1248,0**	1154,7**	1070,2**
2,4	45	11,48**	11,77**	10,82**	49,7	48,8	34,5	1005,2**	981,0**	795,0**
4,8	29	11,70**	11,28*	12,07**	43,0	42,5	28,4	865,5**	822,2**	669,2**
9,6	0	10,32*	10,52	10,13*	44,6	40,7	39,6	526,7**	528,2**	535,5**
12,0	0	10,38*	10,22	10,12*	45,1	34,8	44,8	565,5**	597,5**	514,9**
6,0	13	8,42	9,07	8,05	51,7	51,2	30,6	50,0	59,0	50,2
C.V. (%)		9,0			39,3			15,8		

*, ** médias estatisticamente diferentes da média do tratamento adicional, calagem uniforme, pelo teste t, a 1 e a 5% de probabilidade, respectivamente.

⁺ saturação por alumínio no anel superior e em toda a coluna de solo.

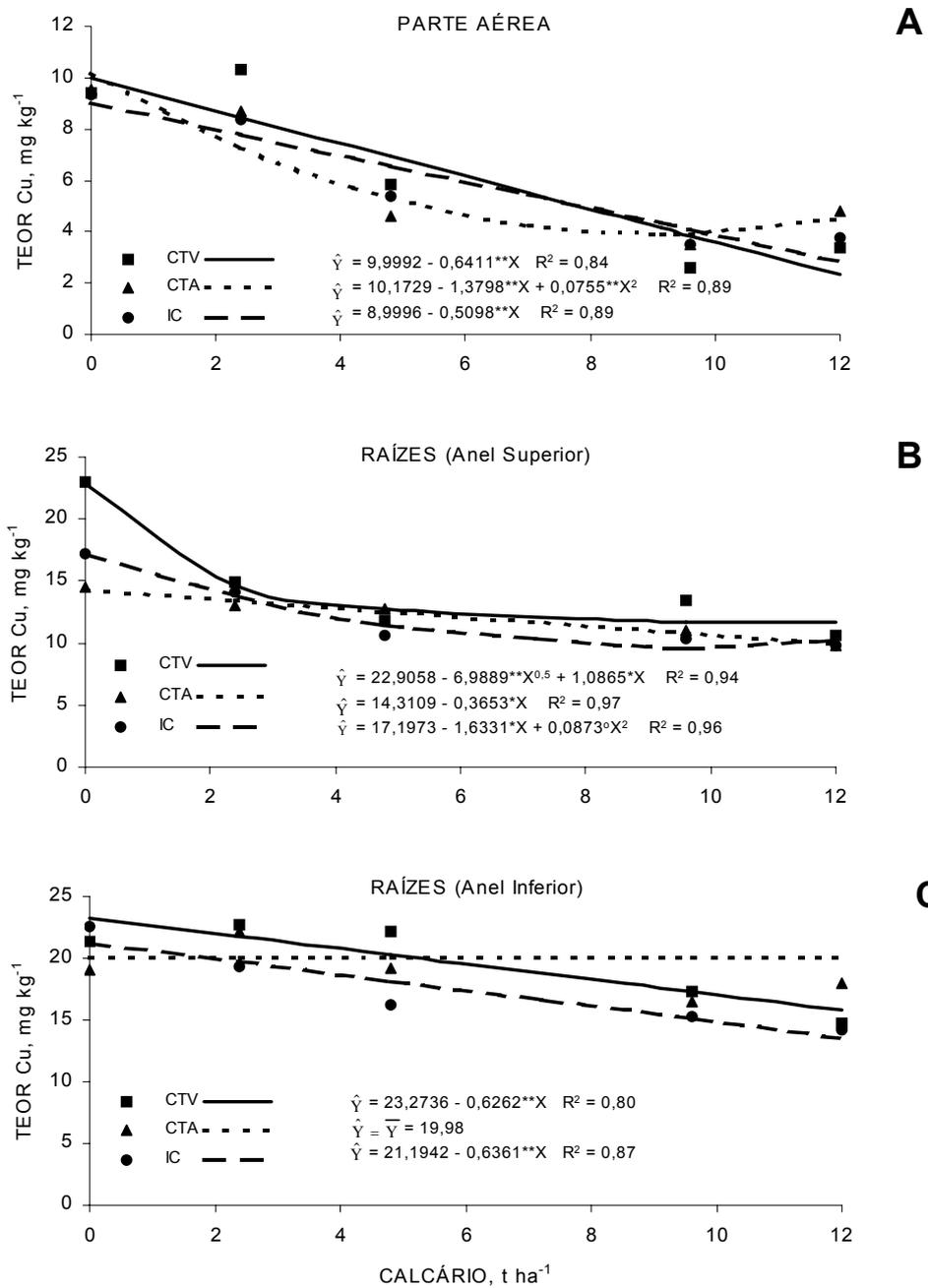


Figura 11 - Teor de cobre na parte aérea (A) e nas raízes no anel superior (B) e no anel inferior (C) dos cultivares de café Catuaí Vermelho (CTV), Catuaí Amarelo (CTA) e Icatu Vermelho (IC) em função das doses de calcário aplicadas no anel superior.

Santo et al. (1998) ressaltam a importância da adubação com micronutrientes na formação de cafeeiros cultivados na região de Barreiras, Bahia. Dos cinco nutrientes avaliados (Zn, B, Cu, Fe e Mn), o cobre foi o que apresentou melhor resposta. A dose de $0,75 \text{ g m}^{-1}$ ($1,9 \text{ kg ha}^{-1}$) representou 60% de aumento na produção da primeira safra.

Resultados semelhantes foram obtidos por Santinato et al. (1998) no plantio de cafeeiros em Latossolo Vermelho-Amarelo Húmico da região de Manhumirim, Minas Gerais. Sete micronutrientes (Zn, B, Cu, Fe, Mn, Co e Mo) foram aplicados via solo representando o tratamento completo e, sucessivamente foi feita a retirada de cada um, com a finalidade de avaliar a importância de cada micronutriente na produção do cafeeiro. Observou-se acréscimo de 31% sobre a produtividade em função da aplicação de todos os micronutrientes. Na exclusão de cada micronutriente, houve drástica redução na produção com a falta de cobre. Neste caso a produção foi 39% menor do que a da testemunha (sem aplicação de micronutrientes).

Santo et al. (1998) ressaltam a importância da adubação com micronutrientes na formação de cafeeiros cultivados na região de Barreiras, Bahia. Dos cinco nutrientes avaliados (Zn, B, Cu, Fe e Mn), o cobre foi o que apresentou melhor resposta. A dose de $0,75 \text{ g m}^{-1}$ ($1,9 \text{ kg ha}^{-1}$) representou 60% de aumento na produção da primeira safra.

Resultados semelhantes foram obtidos por Santinato et al. (1998) no plantio de cafeeiros em Latossolo Vermelho-Amarelo Húmico da região de Manhumirim, Minas Gerais. Sete micronutrientes (Zn, B, Cu, Fe, Mn, Co e Mo) foram aplicados via solo representando o tratamento completo e, sucessivamente foi feita a retirada de cada um, com a finalidade de avaliar a importância de cada micronutriente na produção do cafeeiro. Observou-se acréscimo de 31% sobre a produtividade em função da aplicação de todos os micronutrientes. Na exclusão de cada micronutriente, houve drástica redução na produção com a falta de cobre. Neste caso a produção foi 39% menor do que a da testemunha (sem aplicação de micronutrientes).

Observou-se redução acentuada na concentração de zinco na parte aérea, Figura 12(A) e nas raízes no anel superior, Figura 12(B) e no inferior, Figura 12(C) em função do gradiente de calagem. Acima de 4,8 t ha⁻¹ de calcário os teores estavam abaixo do nível crítico, que varia de 11 a 20 mg kg⁻¹ de acordo com Matiello (1991). Entretanto, Malavolta et al. (1997) consideram que os teores adequados de zinco devem estar entre 15 e 20 mg kg⁻¹. Desta forma, apenas na ausência de calagem a concentração de zinco na parte aérea estava próxima de 15 mg kg⁻¹, Figura 12(A).

A calagem realizada em todo o volume de solo reduziu significativamente a concentração de zinco na parte aérea, com valores entre 8 e 9 mg kg⁻¹, em relação à calagem localizada (Quadro 8). Resultados semelhantes foram obtidos por Chaves et al. (1984) em dois solos do Paraná. Foram avaliadas doses crescentes de calcário, que variaram entre 0 e 10 t ha⁻¹, sobre a produção e estado nutricional do cafeeiro. O tratamento com 10 t ha⁻¹ reduziu a concentração de zinco abaixo do nível crítico.

Houve redução acentuada nos teores de zinco nas raízes no anel superior com a aplicação de 2,4 t ha⁻¹ de calcário, a partir desta dose as variações foram pequenas, Figura 12(B). A calagem uniforme reduziu significativamente a concentração de zinco no anel superior em relação à ausência de calagem (Quadro 8). Os demais tratamentos não diferiram do tratamento adicional.

A calagem localizada afetou a disponibilidade de zinco no anel inferior, Observou-se redução na concentração de zinco nas raízes no anel inferior, com decréscimos de 1248 a 565 mg kg⁻¹ para o Catuaí Vermelho e de 1070 a 515 mg kg⁻¹ para o Icatu Vermelho, Figura 12(C).

Comparando a concentração de zinco nas raízes no anel inferior quando toda a coluna de solo foi corrigida em relação à concentração deste elemento quando apenas a parte superior foi corrigida, observa-se que houve redução de até 25 vezes no teor de zinco (Quadro 8). De acordo com Marschner (1995), para cada aumento de uma unidade de pH a disponibilidade de zinco no solo reduz em até 30 vezes. Portanto, em condições de elevada acidez do solo, essa deve ser corrigida, mas sempre com o cuidado de que essa correção não reduza a disponibilidade de outros nutrientes.

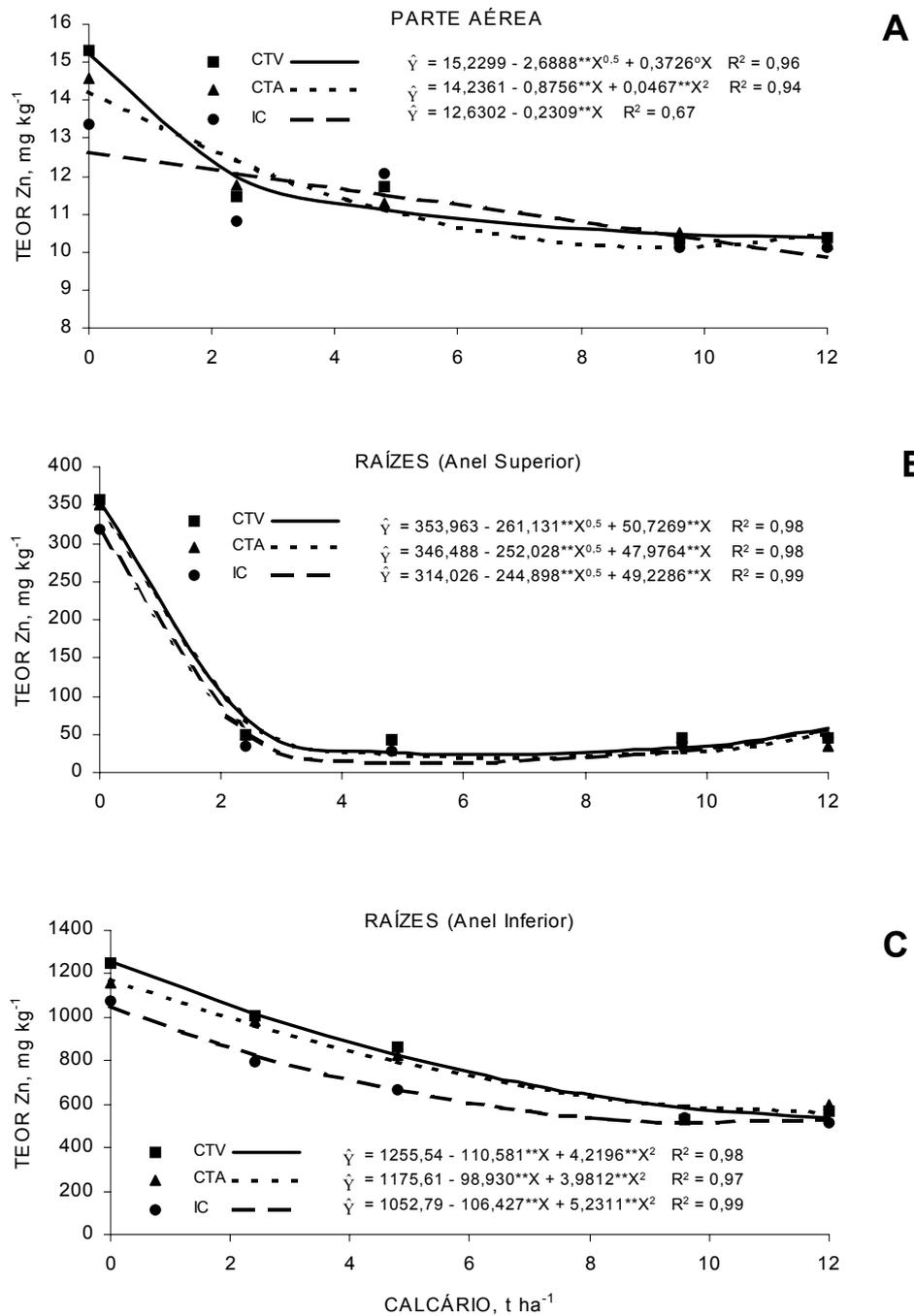


Figura 12 - Teor de zinco na parte aérea (A) e nas raízes do anel superior (B) e do anel inferior (C) dos cultivares de café Catuaí Vermelho (CTV), Catuaí Amarelo (CTA) e Icatu Vermelho (IC) em função das doses de calcário aplicadas no anel superior.

CONCLUSÕES

1. Tanto o cultivar previamente classificado como sensível (Catuaí Vermelho – UFV 2147) quanto os classificados como tolerantes (Catuaí Amarelo – UFV 2149 e Icatu Vermelho – IC 4045), emitiram raízes no anel inferior na presença de 70% de saturação por Al.

2. No estágio inicial de crescimento o cafeeiro é uma cultura pouco exigente em correção do solo.

3. A elevada saturação por alumínio reduziu o comprimento e a superfície das raízes no anel superior do cultivar Catuaí Vermelho, refletindo em maior engrossamento e encurtamento das raízes, indicando maior sensibilidade.

4. Na ausência de calagem houve maior produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes para os cultivares Icatu Vermelho e Catuaí Vermelho em função da maior absorção de Cu e Zn.

5. O cafeeiro mostrou-se mais sensível à carência de micronutrientes, induzidas pelas doses elevadas de calcário, do que à toxidez de alumínio.

6. A calagem realizada em toda a coluna de solo implicou em menor absorção de Cu e de Zn e, conseqüentemente, menor produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes para os três cultivares de café.

LITERATURA CITADA

ALVAREZ V., V.H. Caracterização química de solos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1985. 77p.

BENNET, R.J.; BREEN, C.M. & FEY, M.V. Aluminium toxicity and induced nutrient disorders involving the uptake and transport of P, K, Ca and Mg in *Zea mays* L. South Afr. J. Plant Soil, 3:11-17, 1986.

- BRACCINI, M.C.L.; MARTINEZ, H.E.P.; PEREIRA, P.R.G.; SAMPAIO, N.F.; SILVA, E.A.M. Tolerância de genótipos de cafeeiro ao alumínio em solução nutritiva. I. Crescimento e desenvolvimento da parte aérea e sistema radicular. R. Bras. Ci. Solo, 22:435-442. 1998a.
- BRACCINI, M.C.L.; MARTINEZ, H.E.P.; PEREIRA, P.R.G.; SAMPAIO, N.F.; PEREIRA, A.A. Tolerância de genótipos de cafeeiro ao alumínio em solução nutritiva . II. Teores de P, Ca e Al e eficiência ao P e Ca. R. Bras. Ci. Solo, 22:443-450. 1998b.
- BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solo e material vegetal. R. Ceres, 21:73-85, 1974.
- CHAVES, J.C.D.; PAVAN, M.A. & IGUE, K. Respostas do cafeeiro à calagem. Pesq. Agropec. Bras., 19: 573-582. 1984.
- CHAVES, J.C.D.; PAVAN, M.A. & MIYAZAWA, M. Redução da acidez subsuperficial em coluna de solo. Pesq. Agropec. Bras., 23: 469-476, 1988.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 4ª aproximação. Lavras, 1989. 159p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2 ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
- FOY, C.D. Plant adaptation to acid, aluminum-toxic soils. Commun. Soil Sc. Plant Anal., 19: 959-987, 1988.
- FREITAS, J.A.D. Determinação da necessidade de calagem para o crescimento inicial do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. 99 p. (Tese de Doutorado).
- GAMA, J.R.N.F. & KIEHL, J.C. Influência do alumínio de um Podzólico Vermelho-Amarelo do Acre sobre o crescimento das plantas. R. Bras. Ci. Solo, 23:475-482, 1999.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ. A moderna cafeicultura nos cerrados. Rio de Janeiro, IBC/GERCA, 1987. 148 p.
- JACKSON, M.L. Analisis quimico de suelos. 2 ed. Barcelona, Omega, 1970.
- KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. Annual Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol., 46:237-260, 1995.

- LAZZARINI, W.; MORAES, I.R.P.; CERVELINI, S.G.; TOLEDO, S.V.; FIGUEIREDO, I.J.; REIS, J.A.; CONAGIN, A. & FRANCO, C.M. Cultivo do café em Latossolo Vermelho-Amarelo na região de Batatais. *Bragantia*, 34:229-239, 1975.
- LONDOÑO, M.E.A. & VALENCIA-ARISTIZÁBAL, G. Toxicidade de alumínio em plantas de café. *Cenicafé*, 34:61-97, 1983.
- MALAVOLTA, E. & MOREIRA, A. Nutrição e adubação do cafeeiro adensado. Piracicaba, POTAFOS, 1997. 16 p. (Informações Agronômicas, 80)
- MALAVOLTA, E. & LIMA FILHO, O.F. Estudos sobre a nutrição mineral do cafeeiro. LVI. Qual a saturação por bases mais adequada para *Coffea arabica* em produção? Piracicaba, POTAFOS, 1997. 16 p. (Informações Agronômicas, 80)
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2 ed. Piracicaba, POTAFOS, 1997. 319 p.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London, 889p., 1995.
- MATIELLO, J.B. O café: do cultivo ao consumo. São Paulo, Globo, 1991. 319 p.
- MATIELLO, J.B.; BARROS, U.V. & BARBOSA, C.M. Efeitos da deficiência de cobre e sua correção em cafeeiros jovens na Zona da Mata de Minas. Piracicaba, POTAFOS, 1997. 16 p. (Informações Agronômicas, 76)
- MIYAZAWA, M.; CHIERICE, G.O. & PAVAN, M.A. Amenização da toxicidade de alumínio às raízes do trigo pela complexação com ácidos orgânicos. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:209-215. 1992.
- NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. & BARROS, N.F. Fósforo. In: Curso de especialização por tutoria à distância. Brasília, ABEAS, 1994. 133 p.
- PASSO, R.R. & RUIZ, H.A. Tolerância dos cafeeiros conilon e catuaí à toxidez causada pelo alumínio e manganês. *R. Ceres*, 42:45-52, 1995.
- PAVAN, M.A. & BINGHAM, F.T. Toxidez de metais em plantas. I. Caracterização de toxidez de manganês em cafeeiros. *Pesq. Agrop. Bras.*, 16:815-821, 1981.
- PAVAN, M.A. & BINGHAM, F.T. Toxidez de alumínio em cafeeiros cultivados em solução nutritiva. *Pesq. Agrop. Bras.*, 17:1293-1302, 1982.

- PAVAN, M.A.; BINGHAM, F.T. & PRATT, P.F. Toxicity of aluminum to coffee in ultisols and oxisols amended with CaCO_3 , MgCO_3 , and $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:1201-1207, 1982.
- 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, 1996a. 285p. (Boletim Técnico, 100).
- RAIJ, B. van; COSTA, W.M.; TOSHIO, I.; SERRA, J.R.M. & GUERREIRO, G. Calagem e adubação nitrogenada e potássica para o cafeeiro. *Bragantia*, 55:347-355. 1996b.
- RODRIGUES, L.A. Crescimento e composição mineral na parte aérea e nas raízes de duas variedades de café em resposta à calagem na subsuperfície do solo. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1997. 89p. (Tese de Mestrado).
- ROSSIELLO, R.O.P.; ARAÚJO, A.P.; MANZATTO, C.V.; FERNANDES, M.S. Comparação dos métodos fotoelétrico e da interseção na determinação de área, comprimento e raio médio radicular. *Pesq. Agrop. Bras.*, 30:633-638, 1995.
- SANTINATO, R.; BARROS, U.V.; MATIELLO, J.B. & BARBOSA, C.M. Adubação de micronutrientes Zn, B, Cu, Fe, Mn, Co e Mo no plantio do cafeeiro em solo LVH. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 24., Poços de Caldas, 1998. Anais. Rio de Janeiro, MAA/SDR/PROCAFÉ, 1998. p. 105-106.
- SANTO, J.E.; SANTINATO, R.; OCTOVIANI, F.C. & SILVA, V.A. Doses de zinco, boro, cobre, ferro e manganês na formação de cafeeiros cultivados em solo LVA fase arenosa, sob irrigação por pivô central em Mimoso do Oeste – Barreiras-BA. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 24., Poços de Caldas, 1998. Anais. Rio de Janeiro, MAA/SDR/PROCAFÉ, 1998. p. 97-98.
- SILVA, J.B.; NOVAIS, R.F. & SEDIYAMA, C.S. Identificação de genótipos de sorgo tolerantes à toxicidade de alumínio. *R. Bras. Ci. Solo*, 8:77-83, 1984.
- SMYTH, T.J. & CRAVO, M.S. Aluminum and calcium constraints to continuous crop production in a brazilian amazon Oxisol. *Agron. J.*, 84:843-850, 1992.
- TAYLOR, G.J. Current views of the aluminum stress response; the physiological basis of tolerance. *Cur. Top. Plant Biochem. Physiol.*, 10:57-93, 1991.
- VIANA, A.S.; MATA, J.M. & FIORAVANTE, J.M.M. Estudo de níveis de saturação por bases (V%) e modo de calagem e gessagem na formação e

condução de cafeeiro em solo LED, fase cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 16^o, Espírito Santo do Pinhal, 1990. Anais. Rio de Janeiro, MAARA/PROCAFÉ, 1990. p. 135-139.

RESUMO E CONCLUSÕES

Foram conduzidos quatro experimentos em laboratório e em casa de vegetação com o objetivo de estudar a tolerância genótipos de café ao alumínio.

No primeiro experimento, sementes de vinte e seis genótipos de café foram submetidas à ausência e presença de Al, na concentração de 45 mg L^{-1} , pela técnica do papel-solução e avaliado o comprimento da raiz principal aos quarenta e dois dias. Os genótipos foram agrupados em quatro classes de tolerância, pela técnica multivariada de análise de agrupamento, em função do percentual de redução no comprimento da raiz principal.

A técnica do papel-solução foi adequada para detectar diferenças entre os genótipos de cafeeiro. Quatro genótipos foram classificados como sensíveis ao Al, dentre eles três progênies de Catimor (UFV 2877, UFV 3869 e UFV 3880) e um Caturra Vermelho (UFV 534). O Mundo Novo (UFV 2150), o Icatu Vermelho (IAC 4042) e o Robusta (UFV 514), pertenceram à classe moderadamente sensível. O Icatu Vermelho (IAC 4045) foi o genótipo mais tolerante ao Al enquanto que a grande maioria foi classificada como moderadamente sensível.

No segundo experimento, vinte e cinco genótipos foram avaliados quanto à tolerância ao Al em função da inibição no crescimento da parte aérea e das raízes e pelo teste de coloração com hematoxilina. Avaliou-se, também, a alocação do Al em cortes de extremidades de raízes. Após 35 e 75 dias de cultivo

em solução nutritiva, na ausência e na presença de Al, na concentração de 8 mg L^{-1} , foi avaliado o comprimento da raiz principal e, aos 80 dias, a produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes.

Os resultados expressos em percentagem de inibição causada pelo Al no comprimento da raiz principal e na produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes, foram analisados pela técnica multivariada de análise discriminante e os genótipos separados em três classes. Seis genótipos foram classificados como sensíveis (UFV 2877, UFV 2859, UFV 3880, IAC 4040, H 464-5 e UFV 514) e apenas três foram tolerantes ao Al (IAC 4045, IAC 4782 e H 418-3). Os demais apresentaram tolerância intermediária. O teste de coloração com hematoxilina não se caracterizou como um método de discriminação promissor para selecionar genótipos de café tolerantes ao Al. Para o Icatu (IAC 4042), que apresentou maior intensidade de coloração com hematoxilina, o acúmulo de Al ocorreu nas células epidérmicas e em várias camadas de células do córtex. No genótipo mais tolerante, IAC 4045, o Al acumulou-se apenas nas células epidérmicas, sugerindo a existência de mecanismo de exclusão.

O terceiro experimento foi conduzido com o objetivo de avaliar a relação entre alteração do pH da rizosfera e tolerância ao Al, de cinco genótipos, na presença e ausência de calagem. As mudas de café cresceram em caixas plásticas durante 90 dias. Após este período, as tampas foram removidas e uma fina camada de agar contendo indicador foi derramada sobre a superfície do solo. Quando o solo foi corrigido, observou-se o desenvolvimento da coloração amarela próximo às raízes, indicando abaixamento do pH. Observaram-se variações de 0,2 e 0,3 unidades de pH entre o solo e a rizosfera. Entretanto, na presença de Al, não houve diferença entre pH do solo e da rizosfera, indicando que alteração no pH da rizosfera não parece ser o mecanismo de tolerância ao Al em cafeeiros, uma vez que os genótipos sensíveis e tolerantes apresentaram comportamento semelhante.

O quarto experimento teve como objetivo avaliar o crescimento da parte aérea e das raízes e a composição mineral de três cultivares de café, em função de

diferentes saturações por Al na camada superficial e elevada acidez subsuperficial em colunas de solo. Objetivou-se, ainda, comparar o efeito da calagem superficial e da calagem uniforme em colunas de solo. A acidez do solo do anel superior foi neutralizada com doses de CaCO_3 e MgCO_3 (0; 2,4; 4,8; 9,6 e $12,0 \text{ t ha}^{-1}$) para reduzir a saturação por Al de 70 para 45, 29, 0 e 0%, respectivamente. Os tratamentos adicionais receberam aplicação de $6,0 \text{ t ha}^{-1}$ de calcário em toda a coluna de solo.

Após oito meses de cultivo foram avaliados a produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes, o comprimento e a superfície das raízes em cada anel. No tecido vegetal, foram determinados as concentrações de Al, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu e Zn.

Tanto o cultivar sensível ao Al (Catuaí Vermelho – UFV 2147) quanto os tolerantes (Catuaí Amarelo – UFV 2149 e Icatu – IAC 4045) emitiram raízes no anel inferior na presença de 70% de saturação por Al. A elevada saturação por Al reduziu o comprimento e a superfície das raízes no anel superior do cultivar Catuaí Vermelho. A calagem reduziu a concentração de Cu, Mn e Zn na planta. Desta forma, a produção de biomassa da parte aérea e das raízes dos cultivares Catuaí Vermelho e Icatu foi maior sem a correção da acidez do solo. Quando toda a coluna de solo foi corrigida, a produção de biomassa seca da parte aérea e das raízes foi menor para os três cultivares de café. O cafeeiro mostrou-se mais sensível à carência de micronutrientes, principalmente de Cu e Zn do que à toxidez de alumínio.