

LUCIANA APARECIDA RODRIGUES

**CRESCIMENTO E COMPOSIÇÃO MINERAL NA PARTE AÉREA E
NAS RAÍZES DE DUAS VARIEDADES DE CAFÉ EM RESPOSTA À
CALAGEM NA SUBSUPERFÍCIE DO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do curso de Fitotecnia, para obtenção do título de “*Magister Scientiae*”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
NOVEMBRO - 1997
LUCIANA APARECIDA RODRIGUES

**CRESCIMENTO E COMPOSIÇÃO MINERAL NA PARTE AÉREA E
NAS RAÍZES DE DUAS VARIEDADES DE CAFÉ EM RESPOSTA À
CALAGEM NA SUBSUPERFÍCIE DO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Curso de Fitotecnia, para obtenção do título de “*Magister Scientiae*”.

APROVADA: 12 de março de 1997

Prof. Víctor Hugo Alvarez V.

Prof. Paulo Cezar Rezende Fontes

Prof. Paulo Roberto Pereira

Prof. Roberto de Aquino Leite

Prof^ª. Hermínia Emília Prieto Martinez
(Orientadora)

A Deus, esperança incontestável...
À minha pequena Laura.
Ao Silvaldo, meu esposo e, antes de tudo, companheiro.
À Esther, minha mãe, por colocar-me à luta.
Ao Paulo, meu pai, pelo exemplo de caráter.
A Sílvia, Silvânia e Eliana, minhas irmãs, pela imagem.
Aos meus irmãos Paulo Antonio e Roseane e meus sobrinhos, por fazerem parte
da minha grande e gostosa família.
Àqueles que acreditaram, confiaram, e principalmente me ajudaram a chegar
até aqui.
A todos estes, dedico!!!

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização dos cursos de graduação e de pós-graduação e pelas bolsas de alimentação e moradia concedidas durante a graduação.

À professora Hermínia Emília Prieto Martinez, pela confiança, pela paciência, pelos incentivos, pelos ensinamentos e, principalmente, pelo carinho e pela amizade de tantos anos.

Ao amigo e estudante de iniciação científica Sebastião Marcos de Mendonça, pelo interesse em aprender e trabalhar para a realização desta tese.

A todos os funcionários dos Departamentos de Fitotecnia e Solos, especialmente aos que mais freqüentemente me ajudaram: Mara, Domingos Sávio e Vicente Madaleno, cujas dicas, cujos serviços e cuja amizade foram indispensáveis para execução dos trabalhos e, principalmente, para a vida acadêmica diária.

Aos professores Roberto Ferreira de Novais, Júlio Cesar Lima Neves, Victor Hugo Alvarez Venegas, Paulo Cezar R. Fontes, Paulo Roberto Pereira e Roberto de Aquino Leite, pelas sugestões, pelos ensinamentos e pelos exemplos de profissionalismo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

(CAPES), pelas bolsas concedidas durante a graduação, o aperfeiçoamento e a pós-graduação.

Aos amigos e colegas da graduação e da pós-graduação dos departamentos de Fitotecnia, Solos e Fitopatologia, pela convivência, pelos auxílios e pela amizade.

Às amigadas duradouras conquistadas em Viçosa, que certamente continuarão sendo cultivadas, pelos fortes laços que nos unem, e não serão esquecidas.

Às amigadas duradouras conquistadas fora de Viçosa, que tiveram participação ativa no decorrer da vida e que, direta ou indiretamente, contribuíram não somente para minha profissão, mas também para a vida: Abadia, Sturari, Raul, Carolina, Elza, Lineu e Lineu Jr.

A todos aqueles a quem dediquei esta tese.

BIOGRAFIA

Luciana Aparecida Rodrigues, filha de Paulo Rodrigues de Souza e Esther Marchiori de Souza, nasceu em 28 de julho de 1965, em São Benedito da Cachoeirinha, Estado de São Paulo.

Concluiu o primeiro grau na Escola Estadual de Primeiro Grau Capitão Antonio Justino Falleiros, Ituverava, Estado de São Paulo, e o segundo grau na Escola Estadual de Primeiro e Segundo Grau Dr. João Marciano de Almeida, Franca, Estado de São Paulo.

Em 1985, ingressou no curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa. Foi bolsista de Iniciação Científica no Departamento de Solos, de julho de 1990 a agosto de 1992, sob a orientação do professor Roberto Ferreira de Novais e da professora Hermína Emília Prieto Martinez. Colou grau em agosto de 1992.

De agosto de 1992 a março de 1994, fez o curso de Aperfeiçoamento no Departamento de Fitotecnia, na mesma Universidade, sob a orientação da professora Hermína Emília Prieto Martinez.

Em março de 1994, iniciou o curso de mestrado, sob a orientação da professora Hermína Emília Prieto Martinez, defendendo tese em março de 1997.

CONTEÚDO

EXTRATO	viii
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1. Preparo do solo e dos vasos.....	14
3.2. Preparo das plantas.....	17
3.3. Colheita e análise de crescimento.....	18
3.4. Análise de nutrientes no material vegetal	19
3.5. Análise estatística.....	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
4.1. Sintomas de toxidez de alumínio	21
4.2. Matéria seca, comprimento e superfície de raízes	24
4.3. Distribuição percentual da matéria seca, do comprimento e da superfície das raízes no anel superior	31
4.4. Relações comprimento e superfície de raízes/produção de matéria seca de raízes.....	34

4.5. Área foliar, comprimento de caules e produção de matéria seca da parte aérea	38
4.6. Relações entre matéria seca da parte aérea/matéria seca de raízes, comprimento de raízes/matéria seca de parte aérea e superfície de raízes/matéria seca de parte aérea	40
4.7. Teor de alumínio	43
4.8. Teores de macronutrientes e eficiência de utilização de P e Ca	49
4.9. Teores de micronutrientes	63
5. RESUMO E CONCLUSÕES	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
APÊNDICE	78

EXTRATO

RODRIGUES, Luciana Aparecida, M.S., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 1997. **Crescimento e composição mineral na parte aérea e nas raízes de duas variedades de café em resposta à calagem na subsuperfície do solo.** Professora Orientadora: Hermínia Emília Prieto Martinez. Professores Conselheiros: Roberto Ferreira de Novais e Cláudio Horst Bruckner.

Foram avaliados, em casa de vegetação, o crescimento e a aquisição de nutrientes por duas variedades de cafeeiros, uma sensível e outra tolerante ao alumínio (Al), (Catuaí e Icatu), em solo com calagem e fertilização na superfície e com sete doses de calcário na subsuperfície (0,0; 0,49; 1,7; 2,9; 4,1; 6,6; e 9,3 t/ha). Cultivaram-se as plantas até 6,5 meses de idade, em solo contido em colunas de PVC, subdivididas em três anéis. Nos dois anéis inferiores (12 a 34 cm de profundidade) as saturações de Al variaram de 93 a 0%. O peso da matéria seca da parte aérea, o comprimento de caule e a área foliar das duas variedades não foram alterados com a aplicação do calcário, evidenciando que a correção da camada superficial possibilitou o crescimento normal da parte aérea. Altas saturações de Al nos anéis inferiores não afetaram a produção de matéria seca total de raízes, mas alteraram a distribuição das raízes em profundidade. Altas saturações de Al propiciaram menores percentuais de peso de matéria seca, comprimento e superfície de raízes nos anéis inferiores, que foram compensados

por maiores percentuais no anel superior. As relações comprimento/peso da matéria seca das raízes e superfície das raízes/peso da matéria seca das raízes da variedade Catuaí aumentaram com a aplicação de calcário ao solo dos anéis inferiores, evidenciando sua maior sensibilidade ao Al. O mesmo não ocorreu com a variedade Icatu, tolerante ao Al. A aplicação de calcário na subsuperfície aumentou os teores de Ca e Mg na parte aérea e nas raízes; aumentou o teor de P e diminuiu o de K nas folhas superiores em ambas as variedades; diminuiu a eficiência de utilização de Ca em ambas as variedades e de P na variedade Icatu; e promoveu o decréscimo no teor de Al na parte aérea da variedade Icatu e nas raízes da variedade Catuaí. Os teores de Ca, Mg, P, K, Mn, Zn, Cu e Fe das plantas mantiveram-se em níveis normais para ambas as variedades, indicando que a adubação e a correção da acidez da camada superficial do solo foram eficientes para manter a planta nutrida e o crescimento normal da parte aérea, independente do teor de alumínio na subsuperfície do solo.

ABSTRACT

RODRIGUES, Luciana Aparecida, M.S., Universidade Federal de Viçosa, November 1997. **Growth and mineral composition of two varieties of coffee in response to lime application in the under layers of the soil.** Adviser: Prof. Hermínia Emília Prieto Martinez. Committee members: Prof. Roberto Ferreira de Novais and Prof. Claudio Horst Bruckner.

The growth and the nutrient uptake of two varieties of coffee, an Al-sensible (Catuaí) and an Al-tolerant (Icatu), were evaluated in response to seven doses of lime applicated in the under layers of the soil (12 to 34 cm deep). The upper layers (0 - 12 cm deep) received lime and fertilizers according to technical recomendations to coffee. The plants of coffee were growth during 6,5 months in columns of soil, contained in three connected cylinders of PVC (0-12 cm, 12-22 cm and 22-34 cm). The average level of Al saturation in the two under layers ranged of 93 to 0 % with the treatments. The dried weight of the shoots, the lenght of the stalks and the leaf area of both varieties were not significantly altered with the treatments, indicating that the fertilization of the upper layer of the soil could sustain normal growth of the shoot. The total dried weight of the roots was not affected by the high Al saturation in the under layers of the soil, contained in the two cylinders of the basis. However the high Al saturation in the under layers of the soil affected the root distribution along the three PVC cylinders. There were decreases in the percents of dried matter, lenght and root

surface allocated in the under layers of the soil when Al concentrations in these layers were increased. At the same time, there were corresponding increases of that characteristics in the upper layer of the soil. Root length/root dried matter and root surface/root dried matter relationships increased with the increase of under layers lime application to the sensible variety Catuaí, but did not show any change to the tolerant one Icatu. For both varieties, increases of lime doses applied to the under layers of the soil resulted in increases of Ca and Mg contents of shoot and roots; increases of P and decreases of the Ca utilization efficiency. For the Icatu variety increases of under layers liming results in decreases of the Al roots contents. Ca, Mg, P, K, Mn, Zn, Cu and Fe whole plant contents were maintained on normal levels, showing that the fertilization and the pH correction of the upper layer of the soil were enough to sustain the nutrition of the plants and the normal growth of the shoots.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a cultura do cafeeiro constitui importante fonte de divisas e de empregos, particularmente no Estado de Minas Gerais. Todavia, a maioria dos plantios de café neste estado localiza-se em latossolos de baixa fertilidade natural, com teores elevados de alumínio e com deficiência de cálcio e magnésio na superfície e subsuperfície, como, por exemplo, as regiões do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, onde a cafeicultura tem se expandido nos anos recentes (MATIELLO, 1991).

A correção do alumínio trocável e a aplicação de fertilizantes nos cafezais são práticas recomendadas para que se obtenham boas produtividades nesses solos. A adubação e a aplicação do calcário no horizonte superficial dos solos são práticas comumente utilizadas para aumentar a produção do cafeeiro, mas não se sabe até que ponto estas práticas mantêm o crescimento e a produção normal da planta ou se existe resposta diferencial entre variedades de cafeeiro cultivadas em solos ácidos.

A inviabilidade técnica e econômica da aplicação de corretivos nas camadas mais profundas do perfil limita a calagem à camada de incorporação, que abrange a profundidade de 0 a 20 cm, permanecendo teores elevados de alumínio nas camadas inferiores do solo (FOY, 1974), os quais podem causar toxidez às raízes. A toxidez de Al, verificada em muitas espécies sensíveis a este

elemento, aliada a baixas concentrações de Ca, impede o aprofundamento de raízes no solo e, com isso, reduz o volume de solo explorado pelas raízes, diminuindo o crescimento da parte aérea e a produção, acarretando, ainda, morte de plantas por falta de água, nas épocas de veranico.

No campo, porém, algumas variedades de cafeeiro possuem a capacidade de aprofundar suas raízes nos solos ácidos, evidenciando uma certa tolerância ao alumínio. Essa variabilidade quanto à tolerância ao alumínio é responsável pelas divergências encontradas na literatura, a respeito de quanto o alumínio pode ser considerado prejudicial à cultura (PAVAN et al., 1982; PAVAN e BINGHAM, 1982; MARTINEZ e MONNERAT, 1991). BRACCINI et al. (1996) identificaram variedades de cafeeiro tolerantes e sensíveis ao Al, em solução nutritiva, sendo necessário validar seus resultados em condições de campo, uma vez que é possível que apenas a correção superficial seja suficiente para o crescimento e o desenvolvimento inicial da cultura.

Existem vários métodos de diagnóstico de toxidez de Al. As medidas de alongação de raízes geralmente são citadas como bons indicadores de toxidez (SILVA et al., 1984a, b; BOUDOT et al., 1994; BRACCINI, 1995; BRACCINI et al., 1996). O Al que se acumula preferencialmente no sistema radicular, sendo pequena a quantidade translocada para a parte aérea (MARTINEZ e MONNERAT, 1991), acarreta a inibição do crescimento radicular (CLARKSON, 1966), principalmente devido aos distúrbios na divisão celular e à desorganização da membrana plasmática na região apical da raiz (TAYLOR, 1988). De acordo com RENGEL (1992), quatro a seis horas de exposição de raízes ao Al são suficientes para reduzir a mitose e a alongação das raízes, em espécies sensíveis ao elemento.

PAVAN e BINGHAM (1982) observaram que os primeiros sinais de toxidez por Al foram caracterizados por retardamento no crescimento radicular, aumento no diâmetro de raízes, diminuição no número de raízes laterais por unidade de raiz principal, redução na absorção de Ca, Mg e P e aumento na absorção de K e Al em cafeeiros cultivados em solução nutritiva, em presença do elemento.

O presente trabalho objetivou avaliar o crescimento das raízes e da parte aérea e a aquisição de nutrientes por duas variedades de cafeeiro sensível e tolerante ao alumínio, em solo com níveis de saturação do elemento na subsuperfície.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O café é produto de grande importância na economia mundial, tanto nos países em desenvolvimento quanto nos países desenvolvidos. O Brasil está entre os maiores exportadores mundiais de café, sendo produzido numa área de 2,4 milhões de hectares (SILVA e COSTA 1995). As maiores produções, no Brasil, ocorrem nos estados de Minas Gerais, Espírito Santo, São Paulo e Paraná.

A expansão da cafeicultura levou a plantios em áreas marginais, como os solos sob cerrados. Desses plantios, 40% encontram-se localizados em latossolos, os quais apresentam, entre outras características, baixas saturações de bases, elevada acidez, altos teores de alumínio (Al) e excesso de manganês (MALAVOLTA, 1986; MATIELLO, 1991).

A toxidez do Al é um importante fator limitante do crescimento das culturas em solos ácidos. De acordo com MATIELLO (1991), teores de Al acima de 0,3 cmol c/kg no solo já são prejudiciais ao cafeeiro.

Segundo RAIJ (1991), os solos podem ser naturalmente ácidos devido à pobreza de materiais de origem desprovidos de bases e às condições de pedogênese que favoreçam a remoção de elementos químicos do solo. Além disso, os solos cultivados podem ter sua acidez aumentada por erosão, por extração de cátions básicos pelas culturas e por lixiviação. De acordo com WRIGTH (1989), a quantidade de Al na solução do solo depende do pH, do tipo

e da quantidade de minerais primários e secundários contendo Al e das reações de complexação com constituintes orgânicos. Nesses solos, com níveis tóxicos de Al solúvel, ocorre redução da penetração de raízes, aumentando a probabilidade de injúria em períodos secos. Também em solos alcalinos a toxidez por aluminato (ânion) tem sido reportada (FOY, 1971).

Segundo BOUDOT et al. (1994) e FURLANI (1989), entre as espécies inorgânicas monoméricas de Al consideradas tóxicas encontram-se Al^{3+} , $AlOH^{+2}$, $Al(OH)_2^+$ e $Al(OH)_4^-$. PAVAN e BINGHAM (1982) e PAVAN et al. (1982) demonstraram que o crescimento de plantas de café e as concentrações de Al foram melhor associadas com a atividade do Al^{3+} . Segundo WRIGHT (1989), $Al-SO_4$, $Al-F$ e complexos orgânicos de Al não são tóxicos.

Os efeitos tóxicos do alumínio no crescimento das plantas são atribuídos à sua influência sobre vários processos bioquímicos e fisiológicos (MARSCHNER, 1995). Entretanto, parte destes efeitos ainda não está totalmente esclarecida. Segundo o mesmo autor, o crescimento radicular é o maior indicador da sensibilidade das plantas à toxidez de Al. Esse fato foi constatado por PAVAN e BINGHAM (1982) e MARTINEZ e MONNERAT (1991), que observaram que o primeiro efeito da toxidez de Al em cafeeiro ocorreu sobre o crescimento do sistema radicular, iniciando-se com a inibição do crescimento apical, seguida de descoloração (ou amarelecimento) do ápice e de engrossamento das raízes laterais, tornando-as curtas, grossas e em menor número (forma coralóide). Nas espécies arbóreas, as raízes também podem se apresentar coralóides, mas esses sintomas específicos nem sempre são observados. As raízes ficam pequenas, necrosadas e com coloração marrom-escura. A formação de raízes secundárias e o modelo das ramificação também são modificados (BOUDOT et al., 1994).

Sintomas de toxidez por alumínio também ocorrem na parte aérea dos cafeeiros. As folhas jovens apresentam-se menores, cloróticas, com pequenos pontos necróticos na margem e enrolamento típico, enquanto as folhas velhas apresentam clorose marginal que progride para o centro do limbo. Estes sintomas

foram associados com 300 mg/kg de Al nas folhas (PAVAN e BINGHAM, 1982).

Nas células, um dos primeiros sinais do estresse por Al, segundo FURLANI (1989), é a desorganização da membrana plasmática. As células da coifa das raízes tornam-se vacuoladas com a interrupção da função do aparelho de Golgi e do desenvolvimento de plastídeos, sofrendo alteração na estrutura nuclear e perdas de citoplasma, com subsequente desintegração da célula. As células epidérmicas, endodérmicas e corticais afetadas pelo alumínio rapidamente se autolizam, tornando-se desorganizadas. As regiões meristemáticas das raízes primárias laterais desorganizam-se a ponto de tornar difícil a distinção entre a coifa e os elementos vasculares. Segundo o autor, o desaparecimento de figuras mitóticas em pontas de raízes, sem todavia cessar a mitose, foi associado com a desintegração e expulsão do nucléolo do núcleo e com a inibição do crescimento celular. Esses efeitos indicam que o Al atua tanto indiretamente, no processo metabólico associado com a divisão celular, como diretamente, na replicação de DNA durante a interfase do processo de divisão celular. A interação Al-DNA aumenta a rigidez da dupla hélice e inibe a atividade de replicação.

Rasmusen (1968), citado por SILVA et al. (1984a), encontrou maior concentração de Al no ápice e nos pontos de crescimento das raízes laterais, justamente onde a endoderme se apresenta na forma de protoderme, não estando presentes, ainda, as estrias de Caspary, que limitam a passagem de íons pelo apoplasto, do córtex em direção ao sistema vascular. RENGEL (1992) comenta que o Al prejudica também o alongamento celular. O alongamento da célula ocorre como resposta ao afrouxamento da parede, devido à quebra das pontes cruzadas de Ca entre os ácidos urônicos nas substâncias pécticas que se localizam nas camadas externas da parede celular. O Al atua no lugar dos íons de Ca^{2+} . Os íons de H^+ que deslocariam os íons de Ca^{2+} dos ácidos urônicos não conseguem fazê-lo com o Al, falhando em induzir o afrouxamento da parede celular, prejudicando o alongamento da célula.

Outro fator envolvido no processo é a redução da atividade da hexoquinase na presença de Al (ANDERSON, 1988). Essa enzima é

responsável pela fosforilação de açúcares na formação de polissacarídeos da parede celular. Segundo Clarkson (1965), citado por FOY et al. (1978), a destruição das células da região meristemática apical da raiz principal impede a produção de compostos orgânicos (hormônios) que controlam ou restringem o crescimento das raízes laterais próximas à região apical. RENGEL (1992) cita que o Al promove a redução da síntese e do transporte de citocininas nos meristemas da raiz, afeta a direção do movimento das auxinas, que é dependente de Ca, favorecendo o transporte acrópeto em vez do basípeto, e aumenta o ácido abscísico que inibe o canal de Ca^{2+} e, provavelmente, também o do K^+ .

Os efeitos negativos do Al na modificação dos padrões de absorção e metabolismo de nutrientes dependem da espécie vegetal, do cultivar, das condições experimentais e do grau do estresse devido ao Al. Cada mineral apresenta efeitos variados na síndrome de toxidez por Al.

MARTINEZ e MONNERAT (1991) observaram redução linear de P nas folhas de cafeeiro com o aumento do Al na solução nutritiva. De acordo com FURLANI (1989), plantas estressadas com Al revelam acúmulo de P nas raízes e diminuição na parte aérea. Aparentemente ocorre uma reação de contínua adsorção - precipitação que reduz a entrada de P nas raízes e o subsequente transporte para a parte aérea. O Al pode, ainda, alterar a hidrólise de ATP (via inibição na ATPase) e, ou, a esterificação de fosfatos e, ou, a hidrólise de monoésteres do ácido fosfórico. Esses efeitos podem ocasionar distúrbios significativos nos processos enzimáticos de raízes expostas ao Al.

FURLANI (1989) relata que existe uma similaridade entre os sintomas de toxidez de alumínio e de deficiência de cálcio em raízes. Segundo MARSCHNER (1995), o alumínio causa um cancelamento das funções do cálcio na planta devido à inibição da absorção deste elemento, que poderia ser resultado da competição ou do bloqueio de sítios de ligação pelo Al. RENGEL (1992) questiona a possibilidade de ocorrer ligação do Al nos canais do Ca ou simplesmente de ocorrer modificações conformacionais que tornariam o canal iônico ineficiente. No entanto, a adição de Ca à solução nutritiva contendo íons de Al não alterou a atividade do Al^{3+} para um nível não tóxico ao cafeeiro

(PAVAN, 1982). De acordo com HUANG et al. (1992), a tolerância de algumas espécies ao Al pode estar associada à sua capacidade de manter a absorção de Ca em presença de Al. Os autores observaram que em cultivares de trigo tolerantes ao Al não houve alteração na absorção e no transporte de Ca no ápice das raízes, mas o cultivar sensível diminuiu muito a absorção quando ambos foram cultivados em presença de 5 a 20 $\mu\text{mol/L}$ de AlCl_3 .

Segundo MARSCHNER (1995), o cálcio é responsável pela regulação da estabilidade e permeabilidade da membrana plasmática, pelo balanço cátion-aniônico no processo de osmorregulação e pela integridade de parede celular. Nas plantas deficientes em cálcio ocorrem perdas de solutos de baixo peso molecular, perda da compartimentalização celular e desintegração da parede celular, o que afeta a absorção de íons e o crescimento radicular (extensão celular).

FURLANI (1989) cita que ocorre redução das concentrações de Mg e K nas raízes e na parte aérea de plantas, acarretadas pela inibição específica na absorção destes elementos pelas raízes de plantas estressadas pelo Al.

O estresse por Al afeta a absorção e assimilação do N em plantas, reduzindo principalmente a atividade da enzima redutase do nitrato. A toxidez exerce ainda efeito sobre a fixação do nitrogênio (FURLANI, 1989). Conforme RENGEL (1992), altas concentrações de Al no meio de crescimento das plantas afetam a simbiose Rhizobium-leguminosa, devido à redução da formação de pêlos radiculares na planta hospedeira, à nodulação e à atividade da nitrogenase.

O Al interfere na absorção e no transporte de Fe (ANDERSON, 1988). LEMOS FILHO (1982) observou clorose típica de deficiência de Fe em folhas de sorgo cultivado em presença de Al; entretanto, Grime e Hodgson (1969), citados por FOY (1974), informaram que pequenas quantidades de Al podem melhorar a distribuição e a utilização do Fe na planta devido ao desacoplamento do Fe pelo Al nos sítios de ligação.

O Al pode desempenhar papéis fundamentais na fisiologia de plantas adaptadas a solos ácidos (BARROS e NOVAIS, 1990). Já foi observado estímulo no crescimento de raízes em algumas espécies de plantas quando

submetidas a baixas concentrações de Al. Entretanto, ainda não é claro o mecanismo pelo qual pequenas quantidades de Al trazem benefício ao crescimento da planta. Uma possível explicação, segundo Grime e Hodgson (1969), citados por FOY (1974), é a solubilidade e disponibilidade do ferro, resultado da hidrólise do alumínio a baixo pH. A resposta positiva seria devida ao desacoplamento do ferro pelo Al nos sítios de ligação dentro da planta; desse modo, o Al ajudaria a melhorar a distribuição e utilização do Fe. Porém, existe muita controvérsia com relação a este efeito. De acordo com MARSCHNER (1995), concentrações entre 0,2 e 0,5 mg/L de Al na solução do solo ou em solução nutritiva estimulam o crescimento de plantas de beterraba, milho e algumas leguminosas.

MARTINEZ e MONNERAT (1991), trabalhando com solução nutritiva, observaram efeito benéfico na produção de matéria seca das variedades de café Caturra e Mundo Novo cultivadas em presença de 0,074 mmol/L e 0,0185 mmol/L de Al, respectivamente, diferindo dos resultados obtidos por PAVAN e BINGHAM (1982) nas mesmas condições experimentais. Os autores observaram que 0,074 mmol/L reduziu em 22, 30 e 27% do crescimento de parte aérea, raízes e produção de Catuaí vermelho. Possivelmente, as diferenças encontradas entre os autores anteriormente citados, dentre outros fatores, devam-se às características intrínsecas das variedades utilizadas.

De acordo com BOUDOT et al. (1994), os fatores que amenizam a toxidez provocada pelo Al podem ser divididos em químicos e biológicos. Dentre os fatores químicos é citado a diminuição da toxidez de Al por ligantes aniônicos orgânicos e inorgânicos e espécies não-tóxicas de Al: hidroxilas, fluoretos, sulfatos, fosfatos, matéria orgânica e sílica. Segundo HUDSON e EVANS (1995), os mecanismos considerados como amenizadores dos efeitos do Al nas plantas são: efeitos da solução; codeposição interna de Al e Si na planta; e efeitos no citoplasma e na atividade enzimática. Provavelmente, a grande quantidade de Si presente nos latossolos interfere nas respostas de plantas à toxidez de Al, quando diferentes substratos são usados.

Outro fator químico a ser considerado é a diminuição da toxidez de Al devido à competição com outros elementos. Cátions divalentes não-tóxicos são mais eficientes do que os monovalentes, seguindo a seguinte ordem de classificação: $\text{Ca} \cong \text{Mg} \cong \text{Sr} \gg \text{K} = \text{Na}$.

Dentre os fatores biológicos, preconiza-se a hipótese de que as micorrizas podem proteger as árvores contra toxidez de Al. No entanto, foi descoberto que o Al é tóxico para um grande número de fungos micorrízicos. Outro fator biológico incluído por BOUDOT et al. (1994) são os chamados efeitos hereditários. Plantas de mesma espécie podem exibir diferentes capacidades de resistência à toxidez de Al. Para cafeeiros, autores como MARTINEZ e MONNERAT (1991) e BRACCINI (1995) constataram essas diferenças entre variedades.

Estudos sobre os mecanismos de tolerância são difíceis, uma vez que a resposta da planta à toxidez por Al pode ser alterada em função não somente da tolerância característica de cada espécie ou genótipo, e do meio de crescimento, mas, também, devido à atuação da planta sobre este meio. Por isso, a seleção de genótipos de plantas, quanto à tolerância ao Al, pode variar em diferentes substratos. Segundo FURLANI (1989), a resposta diferencial entre espécies e entre variedades de uma mesma espécie pode ocorrer porque a intensidade dos sintomas nem sempre correlaciona-se com a concentração crítica do Al no meio de crescimento (solo ou solução nutritiva), podendo depender de fatores como: pH do meio, formação de precipitados insolúveis, efeitos protetores de outros íons, força iônica da solução e presença de quelatos ligantes, além da variabilidade genética inter ou intra-específica quanto à tolerância ao alumínio.

Segundo KOCHIAN (1995), se a toxidez de Al ocorrer como um resultado das interações do Al no apoplasma, o conhecimento da especiação do Al na rizosfera ou no meio onde se encontram as raízes é de importância primária. Entretanto, se a toxidez de Al é resultado de interações simplásmicas do Al, então a situação é mais complexa, porque pode ser necessário conhecer quais espécies de Al são transportadas através da membrana plasmática das células das raízes, assim como quais são as espécies tóxicas de Al no citossol.

TAYLOR (1991) dividiu tolerância ao Al em mecanismo de tolerância interna e mecanismo de exclusão. O mecanismo de tolerância interna abrange quelatização no citossol, por ácidos orgânicos, proteínas ou outros ligantes orgânicos, compartimentalização no vacúolo, evolução de enzimas tolerantes ao Al e elevação da atividade enzimática. O mecanismo de exclusão abrange imobilização dos íons de Al na parede celular, permeabilidade seletiva da membrana plasmática, exsudação de agentes quelantes ligantes, exsudação de fosfato, efluxo de Al e indução pela planta a uma barreira de pH na rizosfera ou no apoplasma radicular.

Um fator importante que deve ser considerado quando se faz seleção de genótipos quanto a tolerância ao Al é, além da concentração de nutrientes, a fonte de aplicação. De acordo com BARBER (1971), a absorção diferencial de cátions ou de ânions pela plantas pode modificar o pH rizosférico. Quando são absorvidos mais cátions que ânions, H^+ e ácidos orgânicos são liberados pelas raízes para equilibrar a carga; caso contrário, são liberados mais HCO_3^- que promovem o aumento do pH da rizosfera. MOORE (1971) explica que esse processo ocorre devido à necessidade de manutenção da neutralidade elétrica e ao balanço de cátion-ânion nos tecidos da planta.

Segundo MARSCHNER (1991), o pH da rizosfera pode diferir do pH da massa do solo por mais de duas unidades, podendo ir de 6 para 4, colocando, dessa forma, o Al na forma disponível na rizosfera. GAHOONIA (1993) observou que o pH dos solos próximo às raízes de gramínea fertilizada com NH_4^+ reduziu de 6,8 para 4,4. Segundo ROY et al. (1988), a maior tolerância de algumas espécies pode estar relacionada à sua capacidade de usar o NO_3^-N em presença de NH_4^+N e aumentar o pH do meio de crescimento ou da rizosfera. Assim, é possível que as plantas tolerantes possam criar uma barreira de pH na interface solo-raiz que limita ou facilita a entrada de Al no apoplasma. Segundo KOCHIAN (1995), não têm sido apresentadas evidências convincentes para suportar esse modelo, isto porque tem-se verificado que as variações do pH em nível rizosférico correm mais nas regiões de raízes maduras e não nos ápices radiculares que são os sítios de toxidez de Al.

MARTINEZ e MONNERAT (1991), trabalhando com alumínio em diferentes variedades de café, em solução nutritiva, sugeriram que a maior tolerância ao Al da variedade Mundo Novo ocorre em razão de esta variedade possuir maior capacidade de aumentar, dentro de certos limites, a área de absorção de nutrientes por meio da emissão de raízes laterais e por reter o alumínio nas folhas inferiores, ocasionando assim uma menor concentração no sistema radicular. SILVA et al. (1984b), estudando genótipos de sorgo tolerantes ao alumínio, observou que os genótipos mais tolerantes emitiram raízes até o fundo do vaso, mesmo no tratamento em que a calagem foi apenas superficial, permanecendo alta saturação de Al nas camadas inferiores do solo. No entanto, os autores verificaram maior acúmulo de raízes na superfície. Dessa forma, pode ocorrer alteração na resposta das plantas, dependendo, também, da localização do Al no solo. Tal fato permite a afirmativa de que a localização da calagem pode também interferir nas respostas à toxidez de Al pelas plantas.

Trabalhos de pesquisa têm demonstrado que a aplicação do calcário nas lavouras de café tem elevado a produtividade em até 70% (COSTA et al., 1995), mostrando que a calagem é fundamental a essa cultura em solos ácidos, visando a correção da acidez e a neutralização do Al trocável do solo. No entanto, ela se restringe, normalmente, à camada arável do solo (em torno de 0 a 20 ou de 0 a 30 cm de profundidade). Com isso, a presença de baixos teores de Ca^{2+} e elevados teores de Al^{3+} nas camadas mais profundas do solo pode determinar perdas de safra, principalmente em regiões susceptíveis à ocorrência dos chamados “veranicos”, uma vez que conduzem ao menor aprofundamento do sistema radicular, refletindo em menor volume de solo explorado e, conseqüentemente, limitando a absorção de água e nutrientes pela planta. De acordo com BOUDOT et al. (1994), o Al está associado à baixa absorção de água e nutrientes, como o Ca e Mg, também o Fe e ânions como SO_4^{2-} , H_2PO_4^- , Cl^- e NO_3^- , levando à baixa elongação das raízes. Tudo isso demonstra a multiplicidade de fatores que envolvem a toxidez do Al nas plantas. Embora existam muitos estudos nessa área, muito ainda deve ser feito para se chegar a conclusões definitivas sobre a síndrome de toxidez de Al nas plantas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento, realizado em casa de vegetação do Departamento de Fitotecnia da UFV, Viçosa, MG, constou de um delineamento em blocos ao acaso, em esquema fatorial 7x2 (sete doses de calcário na subsuperfície e duas variedades de café), com quatro repetições.

Cultivaram-se duas variedades de cafeeiro, uma sensível e outra tolerante a Al (BRACCINI et al., 1996), em colunas de PVC de 20 cm de diâmetro, subdivididas em três anéis, correspondendo a três camadas de solo, de 0 a 12, 12 a 24 e 24 a 34 cm de espessura. Corrigiu-se a acidez e adubou-se o solo da camada superior de todos os vasos. O solo dos dois anéis inferiores (12 a 34 cm altura) recebeu sete doses de calcário, que resultaram em diferentes saturações de Al.

3.1. Preparo do solo e dos vasos

Utilizaram-se amostras de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, da região de Viçosa, MG, coletado à profundidade de 5 a 20 cm, com as seguintes características: frações granulométricas de 19% de areia grossa; 10% de areia fina; 3% de silte; 68% de argila (muito argiloso); densidade aparente de

1,1 kg/dm³; capacidade de campo de 0,338 kg/kg; saturação de alumínio (m) de 93%; e saturação de bases (V) de 6,6%.

O solo, após seco ao ar e à sombra, foi peneirado em peneira de 4 mm de malha e dividido em porções de 3,77 e 6,9 dm³, correspondentes aos anéis superiores e inferiores (intermediário + inferior), respectivamente. As porções de solo dos anéis superiores receberam 8,8 t/ha de CaCO₃ + MgCO₃ (relação estequiométrica 4:1) correspondendo a 1,9 vez a necessidade de calagem, segundo a COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS (1989). As porções de solo destinadas aos anéis inferiores receberam a calagem diferencial (mistura de CaCO₃ + MgCO₃ na relação estequiométrica 4:1), correspondente a 0,0; 0,49; 1,71; 2,92; 4,15; 6,58 e 9,30 t/ha. Essas doses de calcário corresponderam a 0,0; 0,1; 0,37; 0,64; 0,9; 1,45 e 2,0 vezes a necessidade de calagem, segundo a COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS (1989), para atingir 60% da saturação de bases.

Após a aplicação do calcário, cada parte de solo foi umedecida com água deionizada até atingir 80 kg/kg de sua capacidade de campo. Após 24 dias de incubação em sacos plásticos, quando o pH do solo, monitorado diariamente, manteve-se constante, o solo foi seco ao ar e à sombra, destorroado e peneirado em peneira de 4 mm de malha. Subamostras foram submetidas à análise química (Quadro 1).

Todas as porções de solo correspondentes aos anéis superiores receberam a seguinte adubação: P - 434 mg/kg, K - 150 mg/kg, N - 50 mg/kg, S - 40 mg/kg, B - 0,81 mg/kg, Cu - 1,33 mg/kg, Fe - 1,55 mg/kg, Mn - 3,66 mg/kg, Mo - 0,15 mg/kg e Zn - 4,0 mg/kg. Os nutrientes foram adicionados nas formas: K₂SO₄, KH₂PO₄, NH₄H₂PO₄, CaH₂PO₄, H₃BO₃, CuSO₄.5H₂O, FeCl₃.6H₂O, MnCl₂.4H₂O, NaMoO₄.2 H₂O e ZnSO₄.7H₂O.

Os vasos constituídos de colunas de PVC foram subdivididos em três anéis unidos por fita de polietileno, tendo como fundo uma placa de isopor de 2 cm de espessura. Primeiramente, foram colocados nos vasos 6,91 dm³ de solo,

Quadro 1 - Caracterização química das amostras de solo dos anéis inferiores (intermediário + inferior) e do anel superior (A. sup), após incubação com as diferentes doses de calcário (t/ha)

	DOSES DE CALCÁRIO (t/ha)							
	0,0	0,49	1,7	2,9	4,1	6,6	9,3	A. Sup 8,8
m%	93,3	79,5	50,4	26,8	9,4	0,0	0,0	0,0
Carbono (dag/kg)	3,5	3,4	3,5	3,2	3,4	3,2	3,1	3,1
P (mg/dm ³) ^a	2,8	2,6	2,7	2,5	2,7	2,7	2,6	2,5
K (mg/dm ³) ^a	8,0	9,0	7,0	10,0	9,0	7,0	8,0	9,0
pH (H ₂ O, 1:25)	3,9	4,1	4,4	4,7	5,0	5,6	6,2	5,9
Ca (cmol c/dm ³) ^b	0,22	0,57	1,41	2,28	3,07	4,81	6,71	4,1
Mg (cmol c/dm ³) ^b	0,44	0,09	0,25	0,42	0,59	0,96	1,30	1,0
SB (cmol c/dm ³)	0,3	0,7	1,7	2,7	3,8	5,8	8,1	5,1
H+Al (cmol c/dm ³) ^c	7,5	7,3	6,7	6,0	5,7	4,8	4,0	5,4
V (%)	6,6	9,1	18,6	27,3	35,9	53,0	72,2	49,0
Acidez trocável (cmol c/dm ³) ^b	2,2	2,0	1,7	1,3	1,0	0,25	0,0	0,0
Al trocável (cmol c/dm ³) ^{b,d}	1,5	1,0	0,6	0,3	0,2	0,02	0,0	0,0

^aExtrator Mehlich 1 (VETTORI, 1969).

^bExtrator KCl 1 mol/L (VETTORI, 1969).

^cExtrator Ca(OAc)₂ 0,5 mol/L pH 7,0.

^dMétodo do aluminon.

correspondente aos anéis inferiores (com as diferentes doses de calcário), e, logo em seguida, foram adicionados 3,77 dm³ de solo, correspondente ao anel superior.

3.2. Preparo das plantas

Como variedade tolerante utilizou-se a Icatu 4045 (cruzamento intra-específico de *C. canephora* e *C. arabica*), de sementes provenientes da fazenda experimental da EPAMIG - Patrocínio, MG. A variedade sensível utilizada foi a linhagem Catuaí 2147-H-2077-2-5-99 (cruzamento interespecífico de *C. arabica*), de sementes provenientes de Viçosa, MG.

Retirou-se o pergaminho das sementes, procedendo-se à germinação em rolos de papel e germinador, até o ponto de palito de fósforo (38 dias). Nesse estágio, selecionaram-se as plântulas quanto ao tamanho, as quais foram transplantadas para os vasos já contendo o solo incubado com as diferentes doses de calcário nos anéis inferiores e com o solo do anel superior adubado. Cada vaso recebeu três plantas. Quando o primeiro par de folhas estava completamente expandido, esse número foi reduzido, por meio de desbaste, para duas plantas por vaso.

A umidade do solo foi mantida próxima a 80 kg/kg da capacidade de campo, por meio de irrigações diárias.

Aos 130 dias do plantio, pulverizaram-se as mudas com diethion (Ethion 500 CNDA) a 0,5 mL p.a./L, para controle de mosca-branca (espécie não identificada).

3.3. Colheita e análise de crescimento

Com o objetivo de avaliar sintomas de toxidez por Al, realizaram-se observações aos seis meses e meio após o plantio. Nessa época foram colhidos dois blocos dos experimentos, permanecendo os dois restantes por mais dez dias.

Na colheita, a parte aérea foi dividida em três partes: folhas superiores (FS), folhas inferiores (FI) e caules (C). Cada parte foi enxaguada por imersão rápida em água deionizada e seca em papel-toalha.

Por ocasião da colheita, determinaram-se a área foliar (média das duas plantas por vaso), por meio do integrador “Área meter”, modelo 3100, e o comprimento médio dos caules.

As raízes das plantas foram divididas por anéis e, posteriormente, separadas do solo por peneiramento em peneira de 2 mm de malha, catação manual e lavagem com jatos de água. Enxugaram-se as raízes em papel-toalha e o peso da matéria fresca total de cada anel foi determinado; observaram-se também os sintomas visuais de toxidez por Al nas raízes.

Das raízes de cada anel, retiraram-se amostras de aproximadamente 1,5 a 2,0 g de matéria fresca, que foram acondicionadas em vidros de 100 ml de capacidade, contendo água deionizada e Tolueno a 5%, para posterior estimativa do comprimento total radicular pelo método da intercepção de linhas descrito por TENNANT (1975).

A porção restante das raízes e da parte aérea foi seca em estufa de circulação forçada de ar, a 70 °C, por 72 horas, para determinação do peso da matéria seca, e posteriormente moída em moinho tipo Wiley, com peneira de 20 malhas por polegada quadrada.

Calculou-se a superfície radicular segundo BÖHN (1979), pela fórmula: $SR=2\pi RC$, sendo R o raio das raízes (cm), calculado pela fórmula $R = (PF/\pi C)^{1/4}$, em que PF corresponde ao peso da matéria fresca das raízes (g) e C ao comprimento da raízes (cm). Nessa fórmula, pressupõe-se que a raiz apresenta densidade específica igual a 1 g/cm³ e forma cilíndrica. Para avaliação da distribuição percentual das raízes nos anéis, o peso da matéria seca, o

comprimento e a superfície das raízes do anel superior foram transformados em percentuais do total estimado por vaso. Calcularam-se, também, as relações entre parte aérea/raízes (g/g), comprimento de raízes/matéria seca de parte aérea (cm/g), superfície de raízes/matéria seca de parte aérea (cm²/g), comprimento de raízes/matéria seca de raízes (cm/g) e superfície de raízes/matéria seca de raízes (cm²/g).

3.4. Análise de nutrientes no material vegetal

Amostras de 500 mg do material vegetal moído foram submetidas à digestão nítrico-perclórica (proporção 4:1) (GANJE e PAGE, 1974) e analisadas quanto aos teores de Ca, Mg, P, K e Al, na parte aérea e nas raízes, e Mn, Fe, Cu e Zn, na parte aérea. A concentração de Ca, Mg, Al, Mn, Fe, Zn e Cu foi determinada por espectrofotometria de absorção atômica; a de K, por fotometria de chama; e a de P, por colorimetria pelo método do azul de molibdênio, tendo ácido ascórbico como agente redutor (BRAGA e DEFELIPO, 1974).

As concentrações de Ca, Mg, K, e P foram expressas em dag/kg, e as de Al, Mn, Fe, Cu e Zn, em µg/kg. Para P e Ca calculou-se a eficiência de utilização (EFU) pela seguinte fórmula: $EFU = [(matéria\ seca(g))^2 / (conteúdo\ do\ nutriente\ (g))]$.

3.5. Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância, usando-se o programa SAEG (Sistema de Análise Estatística e Genética, EUCLYDES, 1983). Ajustaram-se os modelos de regressão linear, quadrático, quadrático base raiz quadrada e cúbico aos dados. A escolha dos modelos foi feita, inicialmente, com base no coeficiente de determinação (R²), descartando-se aqueles com R² inferior a 50%. Em seguida, testaram-se os coeficientes dos modelos com base no

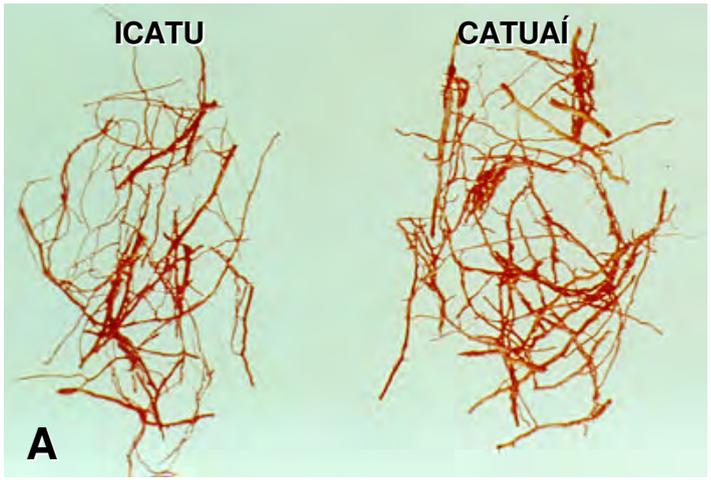
quadrado médio do resíduo da análise de variância até o nível de 10% de probabilidade pelo teste F ($F = [(t^2 * \text{Quadrado Médio do Resíduo Independente da Regressão}) / (\text{Quadrado Médio do Resíduo da ANOVA} / \text{Número de Repetições})]$). Finalmente, para dois ou mais modelos com coeficientes significativos, a seleção foi feita com base no maior R^2 ajustado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Sintomas de toxidez de alumínio

Não foram observados sintomas de toxidez de Al na parte aérea. Observaram-se sintomas mais severos de toxidez nas raízes desenvolvidas nos anéis inferiores, com o aumento da saturação de Al no solo. Esses sintomas caracterizaram-se por engrossamento e encurtamento de raízes (Figura 1A, B e C). As raízes das plantas cultivadas com 0% de saturação de Al (maiores doses de calcário) e as raízes do anel superior (onde houve adubação e calagem) apresentaram-se filiformes, com superfície externa lisa, mais longas e claras. Embora os sintomas de toxidez tenham se apresentado nas duas variedades, na variedade Catuaí eles foram mais evidentes (Figura 1A). Sintomas similares em raízes de cafeeiros, devido à toxidez por Al, são relatados por diferentes autores (PAVAN e BINGHAM, 1982; LONDOÑO e VALENCIA, 1983; MARTINEZ e MONNERAT, 1991; BRACCINI, 1995).

Segundo MARSCHNER (1995), os efeitos tóxicos do Al no crescimento das plantas são atribuídos à sua influência sobre vários processos bioquímicos e fisiológicos, e o crescimento radicular é o maior indicador da sensibilidade das plantas à toxidez de Al.



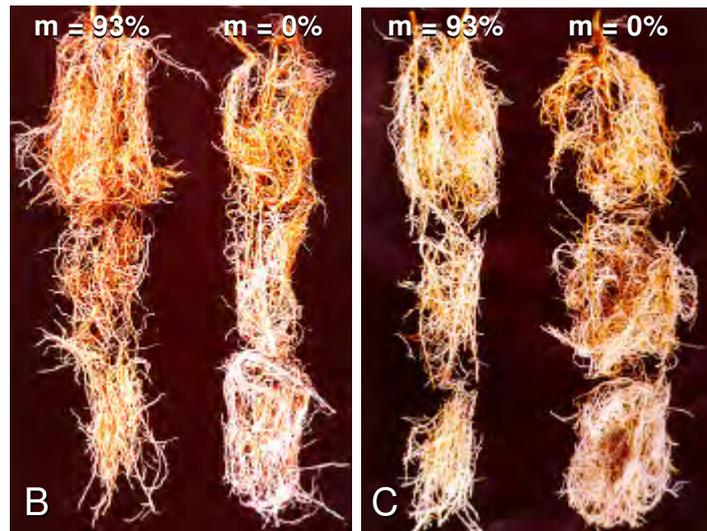


Figura 1 - (A) Aspecto morfológico das raízes das variedades Icatu e Catuaí, cultivadas com 93% de saturação de Al no anel inferior. (B) e (C) Distribuição das raízes da variedade Icatu e Catuaí nos três anéis de PVC, cultivadas a 93 e 0% de saturação de Al.

O Al pode prejudicar o alongamento celular, por impedir o afrouxamento da parede celular, por se ligar em lugar do Ca^{2+} aos ácidos urônicos (RENGEL, 1992) e também por reduzir a atividade da hexoquinase, que é a enzima responsável pela fosforilação de açúcares na formação de polissacarídeos de parede celular (ANDERSON, 1988). O Al destrói as células da região meristemática apical da raiz principal, impedindo a produção de compostos orgânicos (hormônios) que controlam ou restringem o crescimento das raízes laterais próximas da região apical.

A adubação e a correção da acidez do solo no anel superior foi eficiente para manter o crescimento da parte aérea, mas não foi capaz de amenizar os efeitos tóxicos do Al quando este elemento se encontrava em contato direto com as raízes, como ocorreu nos anéis inferiores, nas menores doses de calcário aplicadas.

Apesar dos sintomas de toxidez de Al observados, os sistemas radiculares das duas variedades desenvolveram-se até o anel basal, mesmo no nível de saturação de Al ($m = 93\%$) (Figura 1B e C). SILVA et al. (1984b), 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. Esse resultado evidencia a validade da metodologia empregada, uma vez que, no caso do sorgo, os genótipos que aprofundaram o sistema radicular até o fundo dos vasos eram aqueles considerados como mais tolerantes ao Al. No entanto, SILVA et al. (1984b), utilizando a mesma metodologia para o cultivo da soja, observaram que o aprofundamento do sistema radicular não foi limitante à adaptação aos solos ácidos, ricos em Al. Já HANSON (1991), avaliando a tolerância de cultivares de soja ao Al, verificou redução de até 64% no aprofundamento de raízes de soja no horizonte B com alta saturação de Al.

Com base nos resultados obtidos, o aprofundamento do sistema radicular não parece ser limitante do cultivo do cafeeiro em subsolos ácidos, ricos em Al, quando o horizonte superficial foi corrigido, muito embora, em trabalhos em solução nutritiva tenham sido verificadas diferenças marcantes no crescimento

do sistema radicular em presença de Al (PAVAN e BINGHAM, 1982; MARTINEZ e MONNERAT, 1991; BRACCINI, 1995; BRACCINI, et al. 1996). Cultivando cafeeiro em solos, PAVAN et al. (1982) verificaram que o crescimento das raízes foi negativamente influenciado pela saturação de Al no solo, ocorrendo diminuição do crescimento das raízes. Todavia, os autores não comentam se essa diminuição do crescimento radicular ocorreu também em profundidade.

4.2. Matéria seca, comprimento e superfície de raízes

Não foi observada alteração na produção de matéria seca total de raízes com as doses de calcário aplicadas nos anéis inferiores (Figura 2). Contudo, a quantidade de matéria seca das raízes no anel superior (Figura 2B e Figura 1B e C) decresceu com a aplicação do calcário ao solo subsuperficial, para as duas variedades. Na variedade Icatu houve redução linear de 22,8% na produção de matéria seca de raízes do anel superior até a aplicação de 9,3 t/ha de calcário na subsuperfície, enquanto para a variedade Catuaí a redução foi de 26,2%, com ponto de mínimo em 5,9 t/ha de calcário na subsuperfície.

Nos anéis inferiores não houve variação na produção de matéria seca de raízes com a aplicação do calcário em subsuperfície (Figura 2C), e a variedade Catuaí produziu mais que a Icatu.

Na maior dose de calcário (9,3 t/ha) ocorreu maior produção de matéria seca de raízes no anel superior que nos anéis inferiores, para ambas as variedades. A produção de matéria seca é uma característica comumente utilizada nas análises de plantas cultivadas em condições de estresse de Al. BRACCINI (1995) observou redução de até 47% na produção de matéria seca de raízes de variedades de cafeeiros cultivadas em presença de Al, em solução nutritiva.

$$IC \ Y = \bar{Y} = 1129,07$$

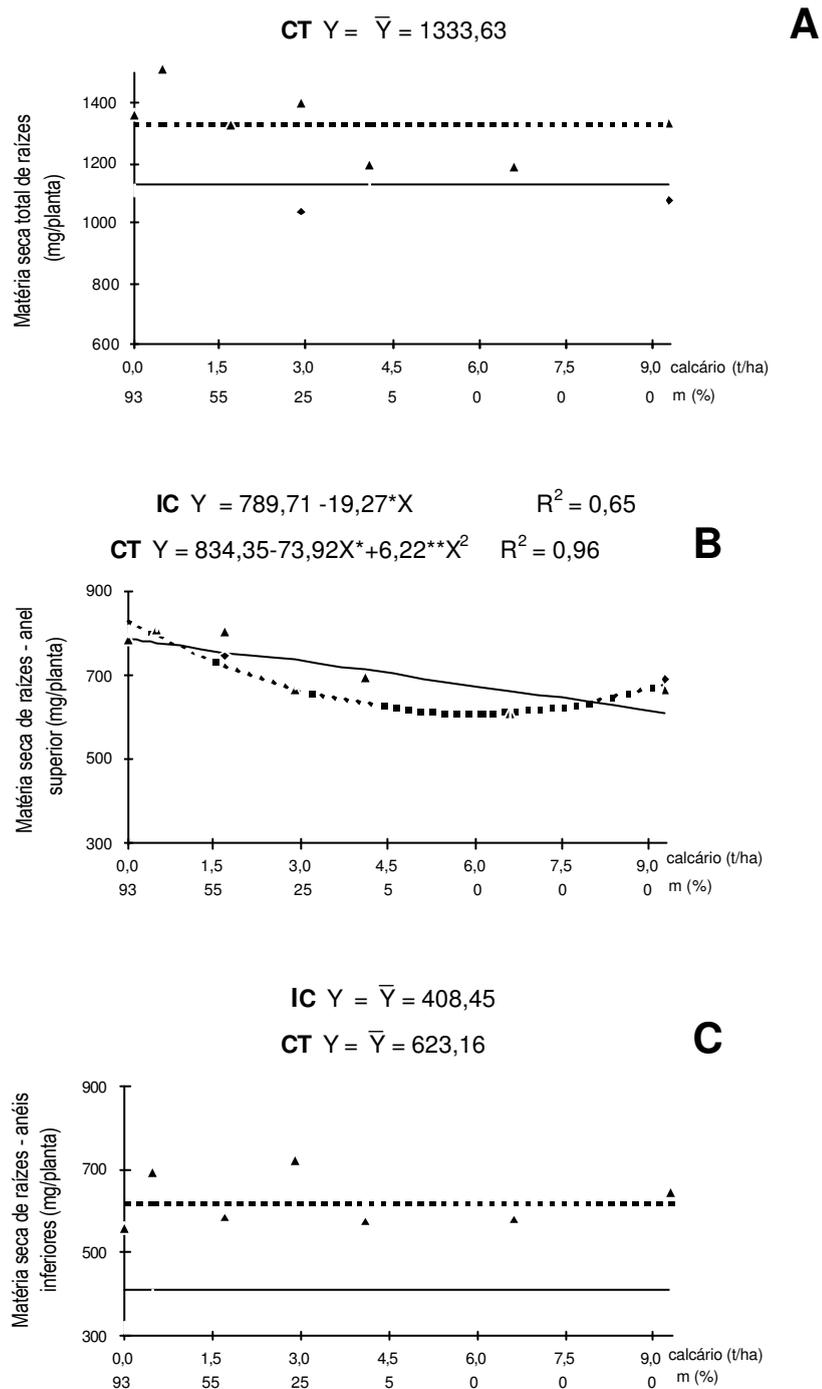


Figura 2 - Estimativa da produção de matéria seca de raízes de plantas de duas variedades de cafeeiro, — Icatu (IC) e --- Catuaí (CT), em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 12 a 34 cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Matéria seca total de raízes, B - Matéria seca de raízes no anel superior e C - Matéria seca de raízes nos anéis inferiores.

SILVA et al. (1984a e 1984b) não conseguiram diferenciar os genótipos pela produção de matéria seca das raízes e pela produção de matéria seca da parte aérea, mas conseguiram a diferenciação entre genótipos para o sorgo.

Em geral, pequenas doses de calcário proporcionaram aumento no comprimento total das raízes (Figura 3A), e doses maiores de calcário, correspondentes à saturação de Al próxima de 0%, diminuíram o comprimento de raízes. Tais resultados sugerem que pequenas doses de calcário estimulam mais o crescimento das raízes que altas doses, mesmo havendo pequena saturação de Al no solo.

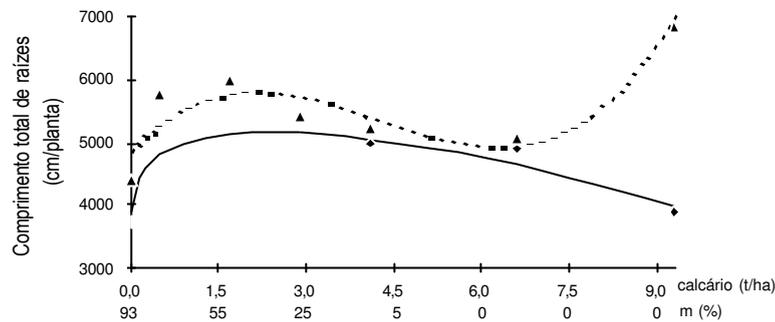
Houve reduções nos comprimentos das raízes alocadas no anel superior (Figura 3B), para as duas variedades, com a calagem na subsuperfície. Na variedade Icatu o decréscimo linear foi de 33%. Na variedade Catuaí o decréscimo foi de 38%, atingindo esse ponto de mínimo com a aplicação de 2,39 t/ha de calcário ao solo subsuperficial. Doses maiores de calcário resultaram em aumento de até 31% na variedade Catuaí, em relação ao comprimento observado nesse ponto de mínimo.

Nos anéis inferiores (Figura 3C), a aplicação do calcário no solo e conseqüente diminuição da saturação de Al promoveram aumento no comprimento de raízes. Na variedade Icatu, o aumento máximo foi de 130,4% com a aplicação de 3,6 t/ha de calcário no solo, decrescendo 20,8% a partir desta dose, até a aplicação de 9,3 t/ha de calcário. Para a variedade Catuaí, houve aumento linear de 80,8% no comprimento de raízes com a aplicação do calcário ao solo. Na variedade Icatu, o incremento máximo no comprimento de raízes nos anéis inferiores foi atingido com 3,6 t/ha de calcário, valor correspondente a 16,7% de saturação de Al e 31,9% de saturação de bases; dosagens maiores que estas não foram eficientes para aumentar o comprimento das raízes, podendo indicar certa tolerância desta variedade a solos com baixa saturação de Al e baixa saturação de bases. Por outro lado, a variedade Catuaí continuou respondendo à aplicação de calcário, ou seja, à redução da saturação de Al até a última dose aplicada, indicando maior sensibilidade da planta ao Al e, também, maior resposta à saturação de bases.

IC $Y = 3896,4 + 1649,21 \cdot X^{1/2} - 531,91 \cdot X$ $R^2 = 0,63$

CT $Y = 4831,76 + 1027,97 \cdot X - 317,35 \cdot X^2 + 24,89 \cdot X^3$ $R^2 = 0,82$

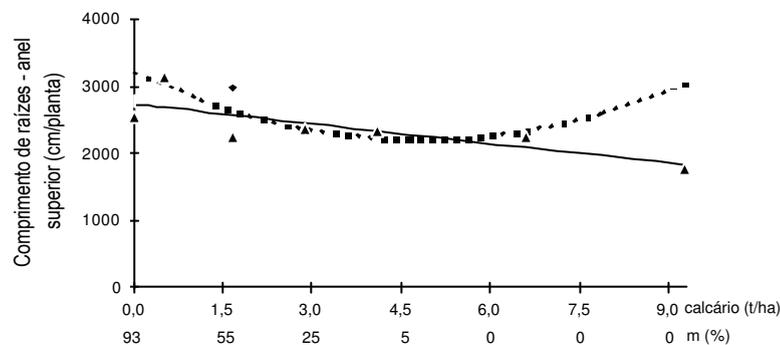
A



IC $Y = 2720,94 - 96,67 \cdot X$ $R^2 = 0,61$

CT $Y = 3240,23 - 461,99^{ns} X + 42,73 X^{2**}$ $R^2 = 0,70$

B



IC $Y = 1188,38 + 1626,8 \cdot X^{1/2} - 428,55^{ns} X$ $R^2 = 0,88$

CT $Y = 2271,42 + 447,60 X^{**}$ $R^2 = 0,73$

C

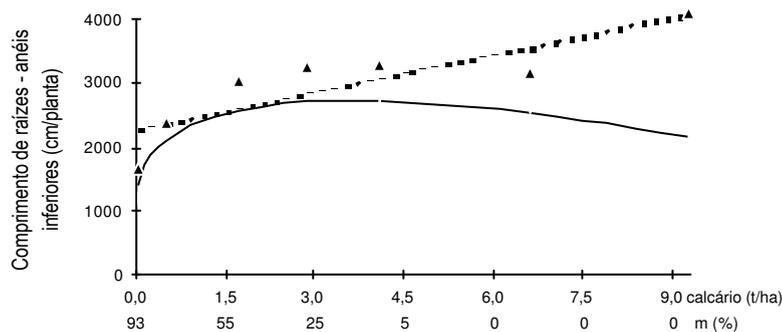


Figura 3 - Estimativa do comprimento de raízes de plantas de duas variedades de cafeeiro, — Icatu (IC) e ---- Catuai (CT), em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 12 a 34 cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Comprimento total raízes, B - Comprimento de raízes no anel superior e C - Comprimento de raízes nos anéis inferiores.

Considerando-se os resultados dos três anéis conjuntamente, observa-se que o decréscimo no comprimento de raízes do anel superior foi compensado por

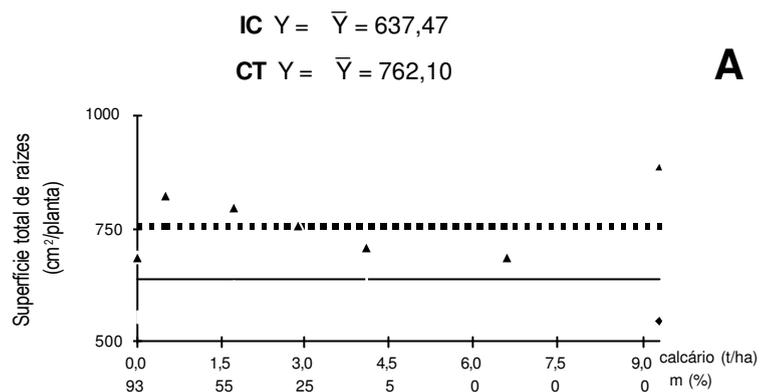
maior comprimento de raízes nos anéis inferiores, à medida que se aplicou mais calcário nestes anéis (Figura 1B e C).

Autores como PAVAN e BINGHAM (1982), MARTINEZ e MONNERAT (1991) e BRACCINI (1995), trabalhando com cafeeiro em solução nutritiva contendo Al, avaliaram o comprimento da raiz principal, mas não o comprimento total (raiz principal, raízes laterais e secundárias), o que é uma informação importante, uma vez que o comprimento e a superfície total de raízes estão diretamente relacionados com a absorção de nutrientes.

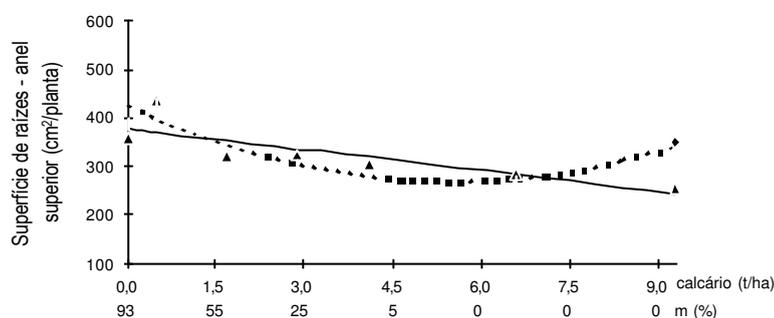
A superfície total de raízes não variou com a aplicação do calcário no solo, para ambas as variedades (Figura 4A). A variedade Icatu apresentou menores valores de superfície total, de produção de matéria seca total e de comprimento total de raízes que a variedade Catuaí, em todas as doses de calcário aplicadas, evidenciando ser característica da variedade Catuaí apresentar maior proliferação de raízes que a variedade Icatu, apesar de apresentar menor porte.

No anel superior (Figura 4B), nas duas variedades, observou-se redução da superfície de raízes com a aplicação do calcário ao solo subsuperficial. Na variedade Icatu, a redução linear foi de 36%; na variedade Catuaí a redução máxima de 36,5% ocorreu com a aplicação de 5,4 t/ha de calcário ao solo (0% de saturação de Al).

Verificou-se aumento na superfície de raízes nos anéis inferiores, para as duas variedades, com a aplicação do calcário na subsuperfície, com conseqüente diminuição da saturação do Al (Figura 4C). Para a variedade Icatu, o aumento máximo foi de 69% e ocorreu com a dose de 3,2 t/ha de calcário. Doses maiores de calcário proporcionaram redução de até 20% na superfície de raízes. Para a variedade Catuaí o aumento na superfície de raízes dos anéis inferiores foi linear e de 44,4%.



IC $Y = 379,13 - 14,687X^{**}$ $R^2 = 0,70$
CT $Y = 429,89 - 56,89X + 5,14X^2^{**}$ $R^2 = 0,84$
B



IC $Y = 211,16 + 158,68X^{1/2*} - 43,97^{ns}X$ $R^2 = 0,76$
CT $Y = 359,14 + 17,06X^{**}$ $R^2 = 0,66$
C

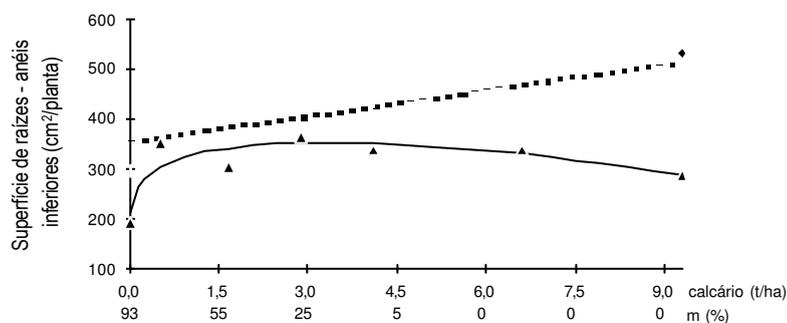


Figura 4 - Estimativa da superfície de raízes de plantas de duas variedades de cafeeiro, — Icatu (IC) e ---- Catuaí (CT), em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 15 a 37 cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Superfície total de raízes, B - Superfície de raízes no anel superior e C - Superfície de raízes nos anéis inferiores.

O incremento máximo na superfície de raízes dos anéis inferiores, para a variedade Icatu, foi obtido com a saturação de Al de 21,71% e 29,5% de saturação de bases, indicando que pequenas saturações de Al ou saturações de bases propiciam maior superfície de raízes, não ocorrendo o mesmo para a variedade

Catuaí, que apresentou aumentos lineares com o aumento das doses de calcário aplicadas no solo e a conseqüente diminuição da saturação de Al.

Nos anéis inferiores, as raízes da variedade Catuaí apresentaram evidente afinamento e alongamento, em função do aumento nas doses de calcário aplicadas, e conseqüente diminuição da saturação de Al. Essa resposta é concordante com os resultados observados para comprimento e superfície de raízes (Figuras 3 e 4), o que demonstra a maior sensibilidade da variedade Catuaí à saturação de Al no solo. Tais resultados validam aqueles obtidos em solução nutritiva, visando a seleção de variedades de café tolerantes ao Al, por BRACCINI et al. (1996) e PAVAN e BINGHAM (1982). Estes últimos, trabalhando com a variedade Catuaí vermelho em solução nutritiva, em presença de Al, observaram também redução no crescimento radicular, aumento no diâmetro de raízes e diminuição no número de raízes laterais por unidade de raiz principal. De acordo com WRIGHT (1989), o crescimento radicular é severamente restringido pela injúria causada pelo Al. Os meristemas radiculares e as raízes laterais engrossam e as radículas são reduzidas. As raízes danificadas pelo Al exploram apenas um volume limitado de solo e são ineficientes na absorção de nutrientes e água.

O principal fator determinante da forma e do tamanho do sistema radicular é a atividade da extremidade das raízes. Estas aumentam em comprimento, por meio do crescimento de células localizadas em regiões imediatamente anteriores ao seu ápice (GLASS, 1989). Rasmusen (1968), citado por SILVA et al. (1984a), encontrou maior concentração de Al no ápice e nos pontos de crescimento das raízes laterais. O Al pode entrar no simplasto e, mais facilmente, atuar nas zonas de crescimento das raízes. Segundo FURLANI (1989), as regiões meristemáticas das raízes primárias laterais desorganizam-se a ponto de tornar difícil a distinção entre a coifa e os elementos vasculares. O desaparecimento de figuras mitóticas em pontas de raízes, sem todavia cessar a mitose, foi associado com a desintegração e expulsão do nucléolo do núcleo e com a inibição do crescimento celular; esses efeitos indicam que o Al atua tanto indiretamente, no processo metabólico associado com a divisão celular, como diretamente, na replicação de DNA durante a interfase do processo de divisão celular.

4.3. Distribuição percentual da produção de matéria seca, do comprimento e da superfície das raízes no anel superior

Ocorreram variações na distribuição percentual de matéria seca de raízes em profundidade nas colunas de PVC (vasos), em função do aumento das doses de calcário aplicadas ao solo da subsuperfície. Menor proporção de quantidade de matéria seca de raízes foi alocada no anel superior, em relação aos anéis inferiores, com a aplicação do calcário ao solo da subsuperfície (Figuras 1B, 1C e 5A).

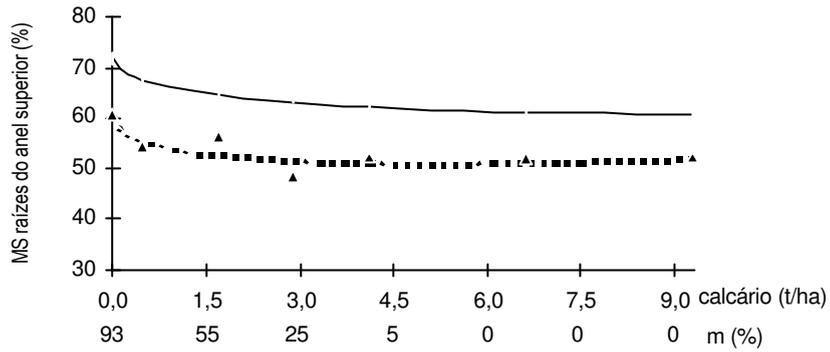
Sem a aplicação de calcário ao solo (93% de saturação de Al e 6,6% de saturação de bases), 72,0 e 60,5% da produção de matéria seca das raízes das variedades Icatu e Catuaí concentraram-se no anel superior, enquanto os 28 e 39,4% restantes distribuíram-se nos anéis inferiores. A aplicação do calcário e a conseqüente diminuição da saturação de Al permitiram maior alocação de raízes nos anéis inferiores, reduzindo o percentual de produção de matéria seca de raízes do anel superior em 15,4%, para a variedade Icatu, e em 15,2%, para a variedade Catuaí, respectivamente em 9,3 e 5,3 t/ha de calcário aplicado ao solo.

A distribuição percentual do comprimento e da superfície de raízes em profundidade, nas colunas de PVC (Figura 5B e C), alterou-se com a aplicação do calcário ao solo, de maneira semelhante àquela verificada para produção de matéria seca de raízes. A alta saturação de Al no solo e a baixa saturação de bases (sem calagem) propiciaram maiores percentuais de comprimento e superfície de raízes no anel superior que nos anéis inferiores. O aumento das

$$\text{IC } Y = 72,0 - 7,08^{**} X^{1/2} + 1,3^{ns} X \quad R^2 = 0,97$$

$$\text{CT } Y = 60,6 - 8,19^{**} X^{1/2} + 1,79^{ns} X \quad R^2 = 0,73$$

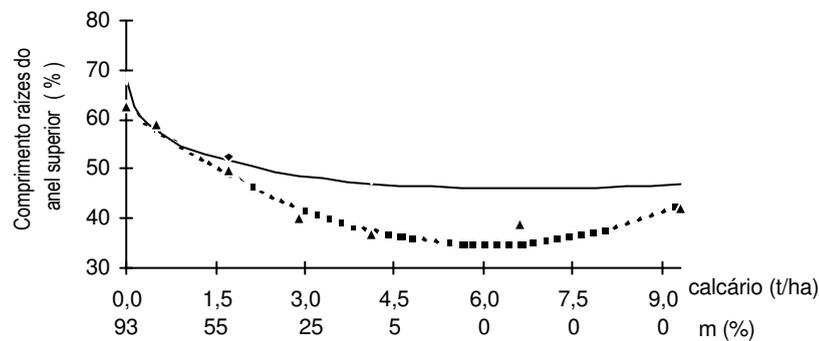
C



IC $Y = 68,5 - 17,54^{**} X^{1/2} + 3,41^{ns} X$ $R^2 = 0,93$

CT $Y = 62,5 - 9,06^{*} X + 0,8^{**} X^2$ $R^2 = 0,97$

B



IC $Y = 65,14 - 13,56^{**} X^{1/2} + 2,53^{ns} X$ $R^2 = 0,97$

CT $Y = 56,5 - 6,42^{ns} X + 0,52^{**} X^2$ $R^2 = 0,95$

C

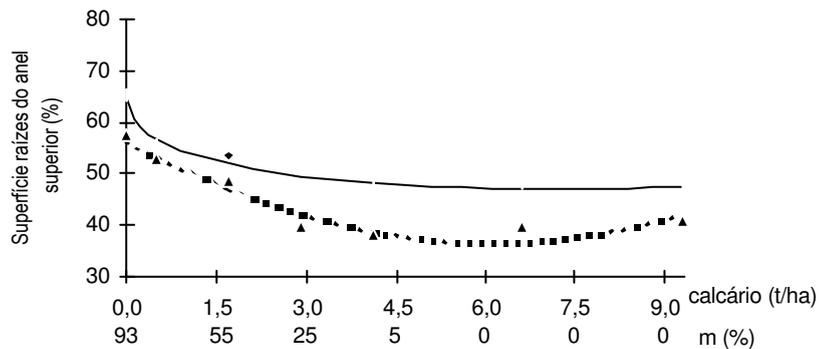


Figura 5 - Estimativa do percentual de raízes no anel superior de plantas de duas variedades de cafeeiro, — Icatu (IC) e ---- Catuaí (CT), em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 12 a 34 cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Matéria seca (%), B - Comprimento de raízes (%) e C - Superfície de raízes (%).

doses de calcário promoveu redução do comprimento e da superfície de raízes no anel superior e aumento percentual nos anéis inferiores. No anel superior, o decréscimo no comprimento de raízes foi de 32,4 e 43,7%, para as variedades Icatu

e Catuaí, com as doses de 6,6 e 6,1 t/ha de calcário aplicado na subsuperfície, respectivamente. Para superfície de raízes, o decréscimo foi de 28,0 e 34,5% com a aplicação de 7,3 e 6,1 t/ha de calcário ao solo, para as variedades Icatu e Catuaí. Os menores percentuais observados no anel superior, para produção de matéria seca, comprimento e superfície de raízes, foram obtidos com doses de calcário correspondentes a 0% de saturação de Al.

A variedade Icatu apresentou menor amplitude de variação no percentual de comprimento e superfície de raízes alocado ao longo da coluna de PVC. Esses resultados evidenciam a capacidade da variedade Icatu de manter uniforme a distribuição das raízes em profundidade sob condições adversas, enquanto a variedade Catuaí, em solos com alta saturação de Al, nos anéis inferiores, apresenta maior percentual de comprimento e superfície de raízes no anel superior; e, com a aplicação do calcário, o maior percentual passa a ocorrer nos anéis inferiores. Resultados análogos a estes foram verificados para soja e sorgo cultivados em situação semelhante (SILVA et al., 1984a, b).

Observou-se que, para a variedade Catuaí, tanto em valores absolutos quanto em valores percentuais, a produção de matéria seca, o comprimento e a superfície de raízes, alocados no anel superior, atingem um ponto de mínimo, com percentuais de saturação de Al no solo da subsuperfície entre 5,2 e 0% (Figura 5). Doses maiores de calcário fazem com que as raízes tendam a se concentrar na camada superficial. Isso evidencia que esta variedade necessita ser cultivada dentro de limites mais estreitos de calagem, para que se obtenha uma distribuição ótima do sistema radicular ao longo do perfil do solo. Os resultados evidenciam sua maior sensibilidade ao Al^{3+} e também a doses supra-ótimas de calcário.

De acordo com RUSSEL (1977), as raízes respondem a fatores adversos do meio, como localização de água e nutrientes, relações com microrganismos, relações alelopáticas, entre outras, podendo, em condições de campo, apresentar crescimento compensatório; isto é, se alguma parte do sistema radicular estiver exposta a condições desfavoráveis, as partes que não estiverem expostas a estas condições aumentam o crescimento, como forma de compensar a redução do crescimento radicular nas áreas desfavoráveis, como ocorreu no presente trabalho.

4.4. Relações comprimento e superfície de raízes/produção de matéria seca de raízes

Para avaliar o comprimento e a superfície de raízes, isolando as características típicas de cada variedade de café e visando quantificar o encurtamento e o engrossamento das raízes, observados visualmente, analisaram-se os valores relativos de comprimento de raízes/produção de matéria seca (ms) de raízes (cm/g) e superfície de raízes/matéria seca de raízes (cm²/g) (Figuras 6 e 7).

No comprimento total de raízes/matéria seca de raízes, observou-se que não houve resposta da variedade Icatu à aplicação do calcário no solo, enquanto a variedade Catuaí apresentou incremento de 39,5% nessa relação, ou seja, as raízes tornaram-se mais compridas com a redução da saturação de Al na subsuperfície.

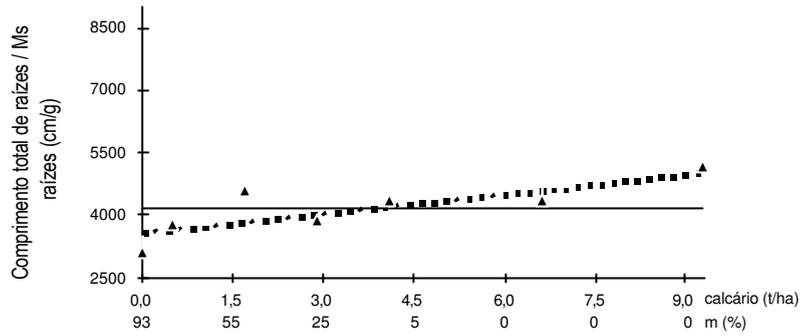
No anel superior não ocorreram variações no comprimento de raízes/matéria seca de raízes para ambas as variedades, sendo os seus valores estimados iguais (Figura 6B). Nos anéis inferiores, a variedade Icatu também não apresentou variação na relação comprimento de raízes/matéria seca de raízes (média de 5.649,7 cm/g). A variedade Catuaí, por sua vez, apresentou incremento de 79,8% com a aplicação do calcário ao solo. Sem calagem (93% saturação de Al e 6,6% de saturação de bases), a variedade Catuaí apresentou 34,8% de comprimento de raízes/matéria seca de raízes a menos que a variedade Icatu. A partir da aplicação de 6,2 t/ha de calcário no solo, a variedade Catuaí passou a apresentar valores maiores de comprimento de raízes/matéria seca de raízes que

$$\text{IC } Y = \bar{Y} = 4152,65$$

$$\text{CT } Y = 3623,88 + 453,5^{**}X$$

$$R^2 = 0,65$$

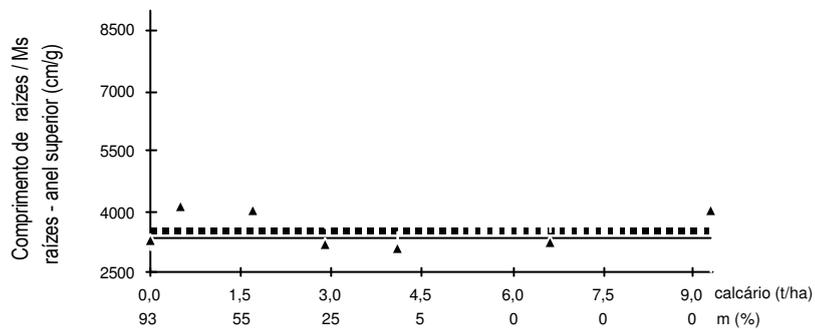
A



$$IC Y = \bar{Y} = 3318,78$$

$$CT Y = \bar{Y} = 3570,74$$

B



$$IC Y = \bar{Y} = 5649,65$$

$$CT Y = 3689,35 + 315,16^{**} X \quad R^2 = 0,74$$

C

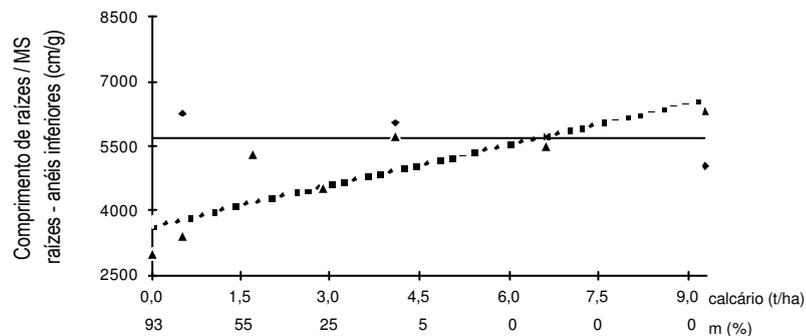


Figura 6 - Estimativa da relação comprimento de raízes por produção de matéria seca de raiz de plantas de duas variedades de cafeeiro, —Icatu (IC) e --- Catuaí (CT), em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 12 a 34cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Comprimento total de raízes/produção de matéria seca total de raízes, B - Comprimento de raízes no anel superior/produção de matéria seca de raízes do anel superior e C - Comprimento de raízes dos anéis inferiores/produção de matéria seca de raízes dos anéis inferiores.

$$IC Y = \bar{Y} = 567,94$$

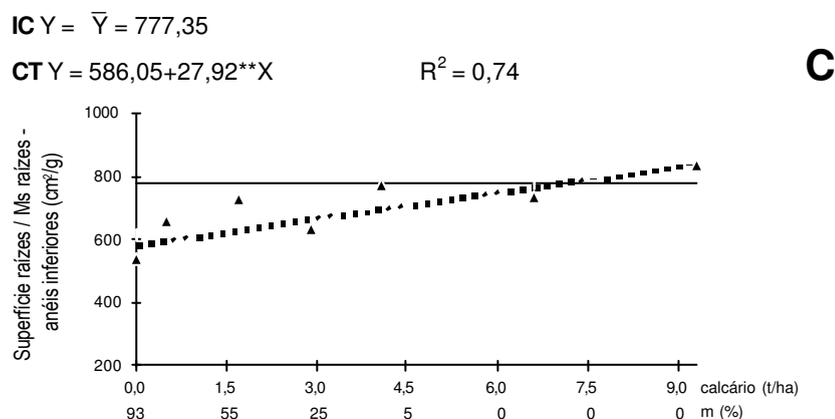
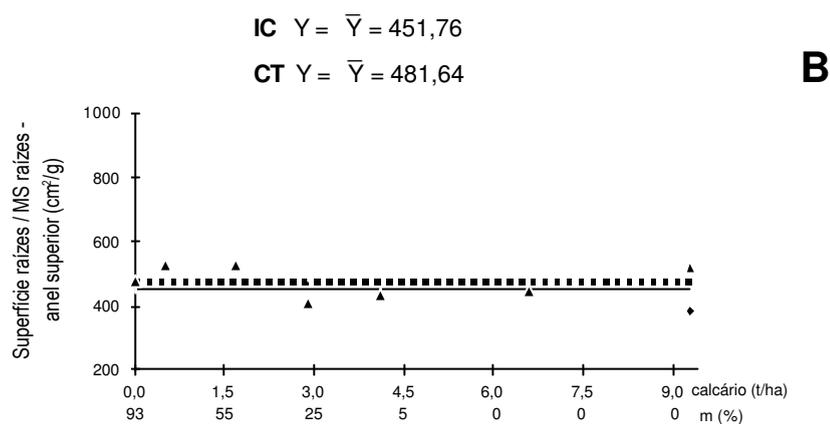
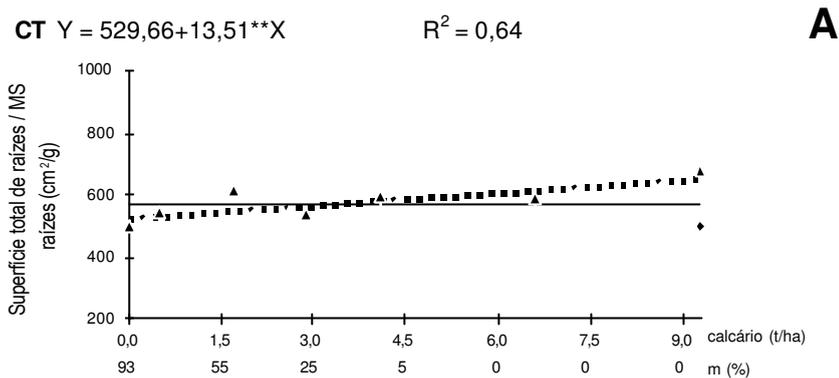


Figura 7 - Estimativa da relação superfície de raízes por produção de matéria seca de raízes de plantas de duas variedades de cafeeiro, — Icatu (IC) e ---- Catuaí (CT), em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 12 a 34 cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Superfície total de raízes/produção de matéria seca total de raízes, B - Superfície de raízes no anel superior/produção de matéria seca de raízes do anel superior e C - Superfície de raízes dos anéis inferiores/produção de matéria seca de raízes dos anéis inferiores.

os da variedade Icatu. Esta dose de calcário corresponde a 0% de saturação de Al.

A resposta para superfície total de raízes/matéria seca de raízes (Figura 7) foi semelhante à observada para comprimento total raízes/matéria seca de raízes. A variedade Icatu não apresentou alterações na superfície total/matéria seca de raízes com a aplicação de calcário ao solo (média de 567,9 cm²/g raízes). A variedade Catuaí apresentou aumento linear de 23,7%. Esta variedade passou a apresentar superfície total/matéria seca de raízes maior que o observado para a variedade Icatu com a aplicação de 2,8 t/ha de calcário no solo (dose correspondente a 28,4% de saturação de Al e 26,6% de saturação de bases).

No anel superior não houve variação na superfície de raízes/matéria seca de raízes com a aplicação do calcário na subsuperfície, em ambas as variedades (Figura 7B). As variedades Icatu e Catuaí apresentaram, em média, 451,8 e 481 cm²/g de raízes, respectivamente.

Nos anéis inferiores, a variedade Icatu não apresentou alterações significativas na relação superfície de raízes/matéria seca de raízes com a aplicação do calcário ao solo (média de 777,4 cm²/g raízes) (Figura 7C). A variedade Catuaí apresentou aumentos lineares de 44,3%. As raízes da variedade Catuaí apresentaram-se mais curtas e grossas, o que afeta diretamente a superfície radicular, sendo este o sintoma típico de toxidez por Al também observado em cafeeiros por PAVAN (1982), MARTINEZ e MONNERAT (1991) e BRACCINI (1995). Com 93% de saturação de Al, as raízes da variedade Icatu encontravam-se mais finas e mais compridas (conseqüentemente, maior superfície de raízes) que a variedade Catuaí, evidenciando a menor sensibilidade da variedade Icatu ao Al. Esse resultado demonstra que, estando o Al diretamente em contato com as raízes, seus efeitos são mais acentuados nas variedades sensíveis.

Sem a calagem (93% saturação de Al e 6,6% de saturação de bases), a variedade Icatu apresentou 24,7% de superfície/matéria seca de raízes a mais que a variedade Catuaí nos anéis inferiores. Somente com a aplicação de 6,8 t/ha de calcário (0% de saturação de Al), a variedade Catuaí passou a apresentar valores maiores que a Icatu. Essa resposta, no entanto, poderia estar sendo influenciada

também pela saturação de bases, uma vez que nessa dose de calcário a saturação de bases foi de 54,9%.

Segundo FURLANI (1989), o aparecimento de sintomas de toxidez de Al nem sempre está correlacionado com a concentração crítica de Al no meio de crescimento (solução do solo ou solução nutritiva). Outros fatores, como pH do meio, formação de precipitados insolúveis, efeitos protetores de outros íons, força iônica da solução, presença de quelatos ligantes, espécie vegetal ou mesmo genótipo, podem atuar na modificação da resposta da planta ao Al.

É importante salientar que as respostas observadas nas relações comprimento de raízes/matéria seca de raízes e superfície de raízes/matéria seca de raízes confirmam os resultados de encurtamento e engrossamento das raízes observados visualmente, que são os principais sintomas de toxidez de Al nas plantas, mostrando ser essas análises fundamentais nesse tipo de estudo.

4.5. Área foliar, comprimento de caules e produção de matéria seca da parte aérea

Área foliar, comprimento de caules e produção de matéria seca da parte aérea não foram alterados com as diferentes doses de calcário em subsuperfície, para as duas variedades (Figura 8A, B e C). MARTINEZ e MONNERAT (1991), trabalhando com níveis crescentes de Al em solução nutritiva, verificaram que, a partir de 4 mg/L de Al na solução, o cafeeiro apresentava encurtamento de internódios, redução do tamanho de folhas, leve clorose e, ainda, redução da área foliar e da produção de matéria seca da parte aérea. De acordo com PAVAN e BINGHAM (1982), a variedade Catuaí apresentou 22% de redução no crescimento da parte aérea quando cultivada em solução nutritiva com 0,79 mmol/dm³ de Al. A não-alteração das características da parte aérea, no presente trabalho, indica que a correção da acidez e a adubação no anel superior

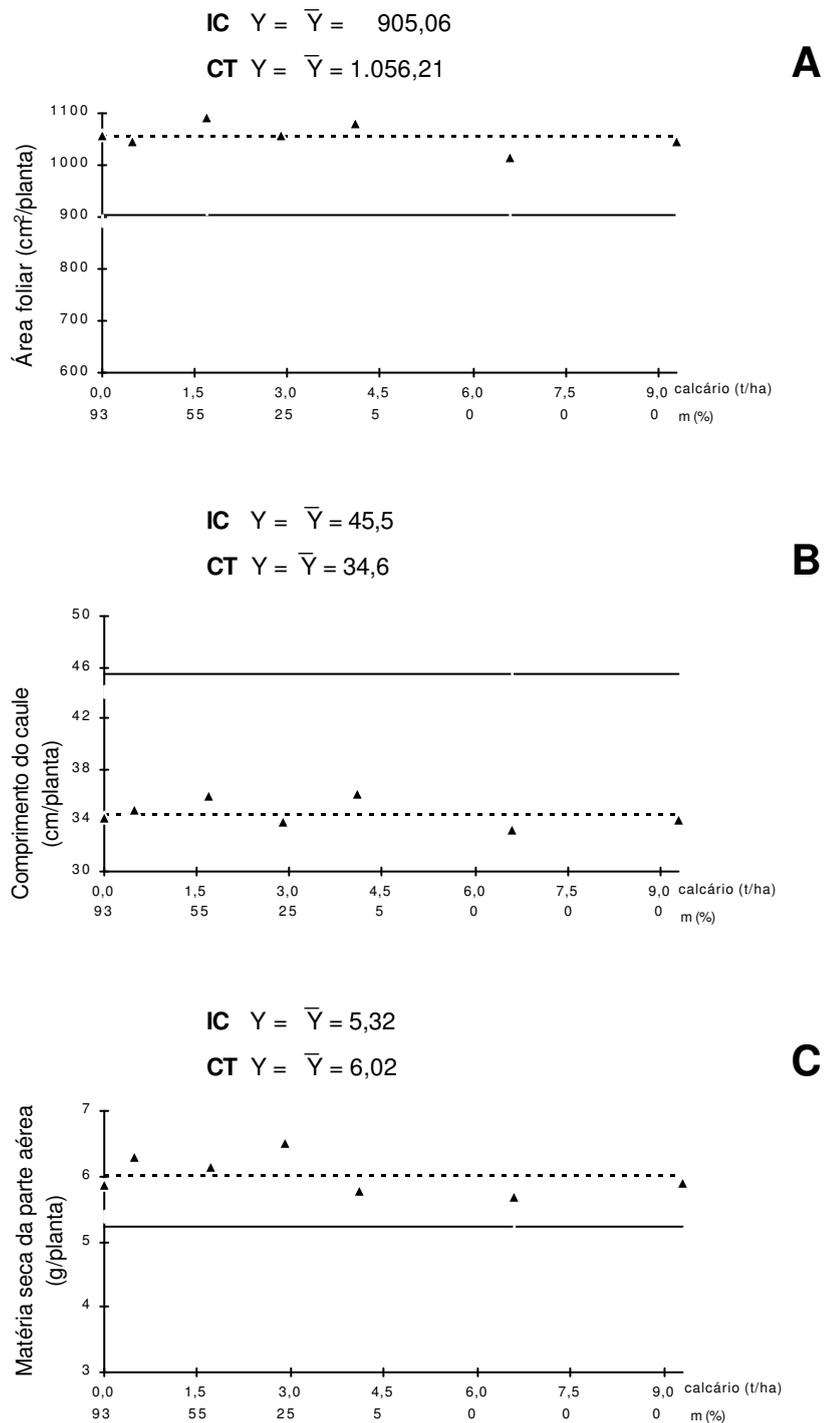


Figura 8 - Estimativa do crescimento da parte aérea de plantas de duas variedades de cafeeiro, — Icatu (IC) e ---- Catuaí (CT), em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 12 a 34 cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Área foliar, B - Comprimento de caule e C - Matéria seca da parte aérea.

dos vasos foram suficientes para manter o crescimento normal da parte aérea. Resultados similares foram obtidos por SILVA et al. (1984a), avaliando respostas de sorgo quanto à tolerância ao Al, em condições semelhantes às do presente trabalho. Os autores observaram que a metodologia utilizada possibilitou minimizar as interações entre Al e outros elementos, como P e Ca, evitando a avaliação da toxidez de Al por meio de distúrbios metabólicos ocasionados pelas irregularidades no suprimento de elementos essenciais.

O comprimento estimado de caules da variedade Icatu foi de 45,5 cm, valor este significativamente maior que o da variedade Catuaí (34,6 cm) e semelhante ao que se observa no campo, devido ao maior porte das plantas dessa variedade. Apesar disso, a área foliar e a matéria seca da parte aérea da variedade Catuaí foram significativamente maiores que as da variedade Icatu.

4.6. Relações entre matéria seca da parte aérea/matéria seca de raízes, comprimento de raízes/matéria seca de parte aérea e superfície de raízes/matéria seca de parte aérea

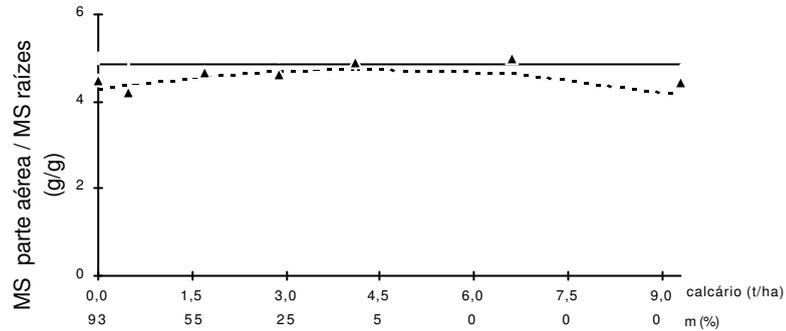
A relação da matéria seca (ms) de parte aérea/raízes (g/g) não foi alterada com as doses de calcário aplicado ao solo subsuperficial para a variedade Icatu (valor médio estimado de 4,84 g/g) (Figura 9A). A variedade Catuaí apresentou aumento, com um valor máximo de 4,85 g/g na dose de 5,2 t/ha de calcário aplicado no solo. Esse resultado indica que, para uma mesma produção de matéria seca de parte aérea, foi necessária uma maior produção de matéria seca de raízes, quando as plantas foram cultivadas em saturações de Al muito altas ou muito baixas.

MARTINEZ e MONNERAT (1991) e PAVAN e BINGHAM (1982) observaram que a relação raízes/parte aérea elevou-se linearmente com o aumento da concentração de Al na solução nutritiva, mostrando maior alocação percentual de fotoassimilados nas raízes quanto maior o nível externo de Al.

IC $Y = \bar{Y} = 4,84$

CT $Y = 4,29 + 0,23^{ns}X - 0,0219^{*/}X^2 \quad R^2 = 0,68$

A



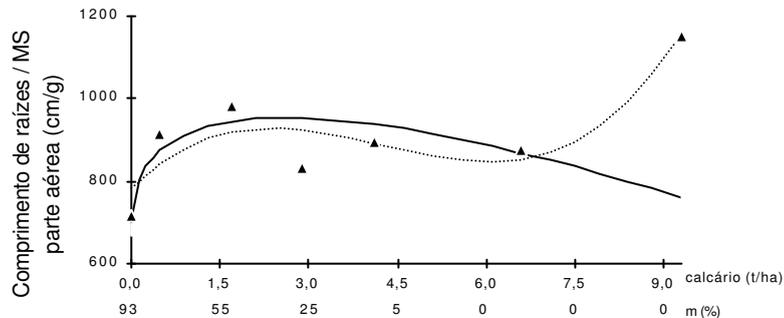
IC $Y = 705,87 + 307,40^{**}X^{1/2} - 95,01 * X$

$R^2 = 0,57$

CT $Y = 782,37 + 141,11 * X - 41,566 * X^2 + 3,3^{**}X^3$

$R^2 = 0,79$

B



IC $Y = \bar{Y} = 118,46$

CT $Y = 119,24 + 9,55^{ns}X - 3,56^{ns}X^2 + 0,31 * X^3$

$R^2 = 0,80$

C

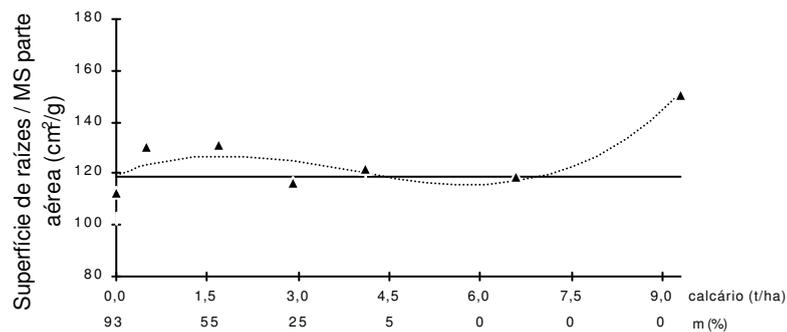


Figura 9 - Estimativa da relação parte aérea/raiz e raiz/parte aérea em plantas de duas variedades de cafeeiro, — Icatu (IC) e ---- Catuaí (CT), em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 12 a 34 cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Matéria seca de parte aérea por matéria seca de raízes, B - Comprimento de raízes por matéria seca de parte aérea e C - Superfície de raízes por matéria seca da parte aérea.

Uma alta relação parte aérea/raízes, segundo PAVAN e BINGHAM (1982), sugere que a massa radicular é eficiente na absorção de água e nutrientes, suportando, assim, o bom crescimento da parte aérea.

Uma vez que o comprimento e a superfície de raízes variaram com as doses de calcário aplicadas ao solo e apresentaram distúrbios detectados visualmente, optou-se por fazer, também, as relações comprimento de raízes/matéria seca de parte aérea (cm/g) e superfície de raízes/ matéria seca de parte aérea (cm²/g) (Figura 9B e C).

Na avaliação da relação comprimento de raízes/matéria seca de parte aérea, observou-se que a variedade Icatu apresentou aumento de 34,9% da dose zero até a dose 2,0 t/ha de calcário no solo (correspondendo a 45% de saturação de Al e 20,4% de saturação de bases). A partir deste ponto, doses maiores de calcário proporcionaram decréscimo de até 20% na relação comprimento de raízes/matéria seca de parte aérea. Na variedade Catuaí, a resposta na relação comprimento de raízes/matéria seca de parte aérea ocorreu de forma cúbica. Inicialmente, houve aumento de 18,7% da dose zero até a dose de 2,3 t/ha de calcário aplicado ao solo, mas aplicações de calcário próximas a 6,4 t/ha ao solo proporcionaram pequena queda na relação comprimento de raízes/matéria seca de parte aérea, apresentando um ponto de mínimo. A partir deste ponto, ocorreu aumento novamente nesta relação, de até 24,7%, com a última dose de calcário aplicada.

Na relação superfície de raízes/matéria seca de parte aérea, a variedade Icatu não apresentou variações com a aplicação de calcário ao solo subsuperficial, ficando, em média, com 118,5 cm²/g. A variedade Catuaí apresentou as mesmas variações observadas na relação comprimento de raízes/matéria seca de raízes.

Na variedade Catuaí, as menores relações comprimento e superfície de raízes/matéria seca de parte aérea, observadas entre 4,5 e 6,8 t/ha de calcário aplicado ao solo subsuperficial, corresponderam a menor comprimento e superfície de raízes para manter o crescimento da parte aérea. Doses maiores de

calcário promoveram aumento na relação, indicando a sensibilidade desta variedade também a um excesso de calagem.

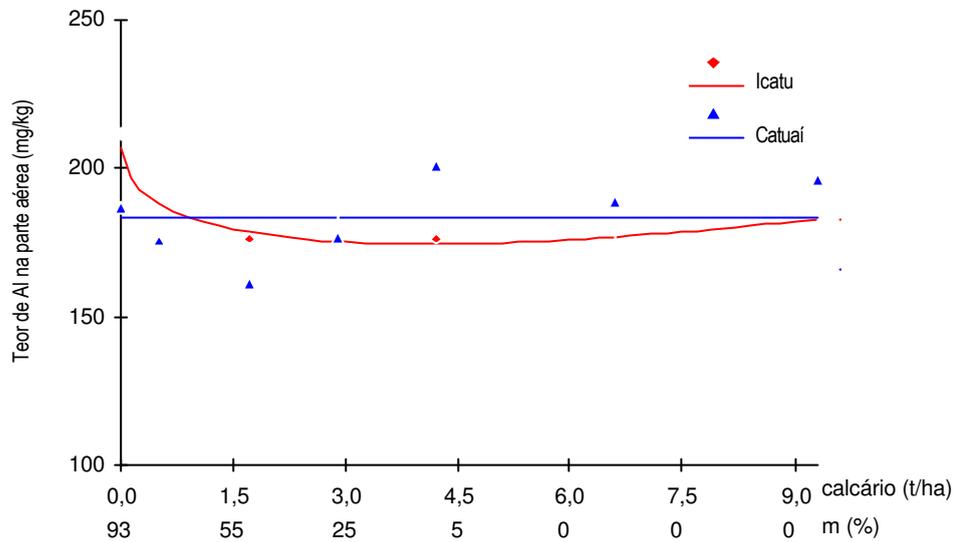
Sob condições de deficiência nutricional, a proporção de biomassa entre raízes e parte aérea aumenta. Quando os nutrientes estão em suprimento adequado, ocorre maior alocação de matéria seca para a parte aérea (para a maioria das espécies). O desenvolvimento da raiz axial principal, a iniciação das ramificações laterais e sua taxa de alongamento podem ser reduzidos (GLASS, 1989). No presente trabalho, o suprimento de nutrientes pelo anel superior e a compensação no crescimento das raízes neste anel, quando o solo dos anéis inferiores se encontravam com alta saturação de Al, deveriam manter a relação raiz/parte aérea em níveis relativamente estáveis. Essa estabilidade foi maior na variedade Icatu, demonstrando maior ajuste desta variedade às condições adversas para manter a mesma produção de parte aérea, ou seja, menores variações nas características avaliadas com as doses de calcário utilizadas, enquanto a variedade Catuaí apresentou grandes variações no comprimento e na superfície de raízes para manter a produção da parte aérea inalterada.

4.7. Teor de alumínio

A variedade Catuaí não apresentou variação no teor do Al na parte aérea em função da aplicação do calcário ao solo dos anéis inferiores, permanecendo, em média, com 183,7 mg/kg de Al (Figura 10A). Sem o uso de calagem subsuperficial (93% de saturação de Al), a variedade Icatu apresentou maior teor de Al na parte aérea (207,0 mg/kg) que a variedade Catuaí (183,7 mg/kg). A aplicação de 4,1 t/ha do calcário ao solo subsuperficial reduziu o teor de Al na variedade Icatu em 29%. Segundo PAVAN e BINGHAM (1982), 300 mg/kg de Al nas folhas de cafeeiros cultivados em solução nutritiva foram associados com os sintomas de toxidez, como clorose e redução da matéria seca ou da área foliar. PAVAN et al. (1982) observaram os mesmos sintomas, porém com teores da

Icatu $Y = 206,97 - 31,77X^{*/1/2} + 7,85^{ns}X$ $R^2 = 0,81$
 Catuaí $Y = \bar{Y} = 183,72$

A



Icatu $Y = \bar{Y} = 3173,42$
 Catuaí $Y = 4213,7 - 124,482^{**}X$ $R^2 = 0,69$

B

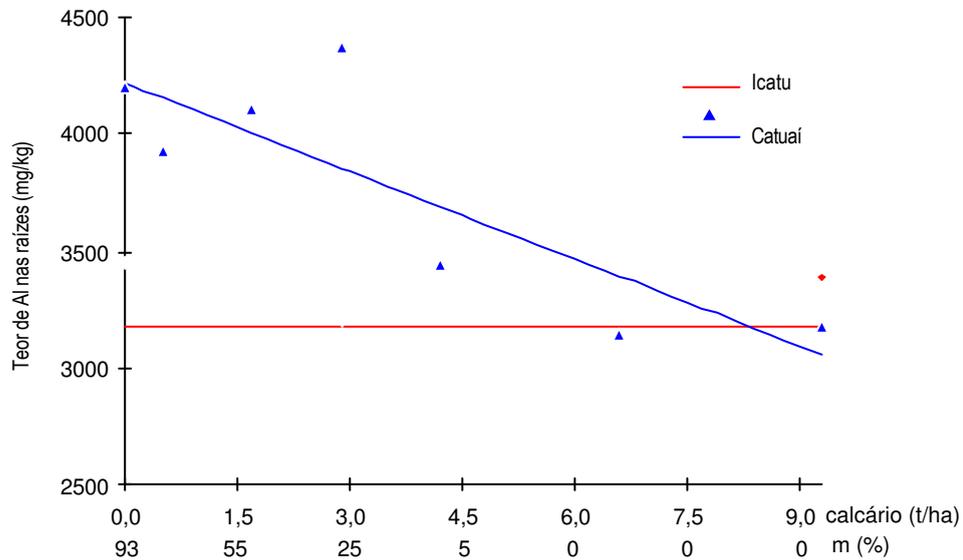


Figura 10 - Estimativa do teor Al em plantas de duas variedades de cafeeiro, Icatu e Catuaí, em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 12 a 34 cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Parte aérea e B - Raízes.

ordem de 225 mg/kg de Al nas folhas de plantas cultivadas em solos com alta saturação de Al. No presente trabalho, foram encontrados até 207 mg/kg de Al na parte aérea, sem que ocorressem sintomas de toxidez.

Nas raízes (Figura 10B), a variedade Icatu não apresentou variações no teor de Al com a aplicação de calcário ao solo nos anéis inferiores. O teor médio de Al observado foi de 3.173,42 mg/kg. Na variedade Catuaí, houve decréscimo linear de 27% no teor de Al das raízes, que reduziu de 4.213,7 para 3.056,0 mg/kg quando a saturação passou de 93 para 0%. Esta variedade apresentou valores de Al inferiores aos apresentados para a variedade Icatu, com a aplicação de 8,4 t/ha de calcário ao solo dos anéis inferiores. Esta dose de calcário corresponde a zero por cento de saturação de Al no solo.

Foi observada maior concentração de Al nas raízes que na parte aérea (Figura 10), para ambas as variedades, em todas as doses de calcário utilizadas. Respostas semelhantes também foram observadas em cafeeiro por BRACCINI (1995) e MARTINEZ e MONNERAT (1991), concordando com WAGATSUNAGA (1984), que afirma ser o Al um elemento de baixa mobilidade na planta, sendo preferencialmente acumulado nas raízes. A variedade Catuaí apresentou maiores sintomas de toxidez de Al nas raízes, decorrentes do maior acúmulo do elemento nesse compartimento, uma vez que a concentração na parte aérea apresentou-se estável em todas as doses de calcário aplicadas.

A variedade Icatu mostrou-se mais tolerante ao Al, por manter os teores deste elemento nas raízes estável e em níveis bastante inferiores aos observados na variedade Catuaí. O transporte de Al para a parte aérea, na variedade Icatu, também foi limitado, e os teores encontrados foram semelhantes aos observados para a variedade Catuaí. No entanto, em níveis de saturação de Al superiores a 77% a restrição ao transporte do elemento para a parte aérea parece ter sido reduzida, havendo aumento das concentrações de Al nos tecidos.

Os resultados sugerem que há diferenças entre as duas variedades quanto ao mecanismo de ajuste ao estresse por Al. Na variedade Catuaí, não ocorreu

transporte de Al para a parte aérea, mas o teor de Al nas raízes aumentou drasticamente com o aumento da saturação de Al no solo subsuperficial.

Considerando-se parte aérea e raízes, para a variedade Icatu, aliado a mecanismos de exclusão, parece haver também certa tolerância interna. A integridade das raízes foi mantida, havendo transporte de Al para a parte aérea quando a concentração externa atingiu um limite máximo, com saturações subsuperficiais de Al da ordem de 77%.

Segundo ROY et al. (1988), as plantas tolerantes ao Al podem ser agrupadas de acordo com o lugar onde acumula este elemento nos tecidos. O primeiro grupo é de plantas em que a tolerância envolvida está aparentemente nos mecanismos de exclusão; o segundo, de espécies que acumulam menos Al na parte aérea e mais nas raízes; e o terceiro, de plantas em que a tolerância está diretamente associada com o acúmulo na parte aérea (tais plantas apresentam maior tolerância interna).

Verificou-se que o teor de Al, nas folhas inferiores e nos caules de ambas as variedades e nas folhas superiores da variedade Catuaí, não se modificou com a aplicação do calcário ao solo subsuperficial (Figura 11A). A concentração de Al nas folhas superiores da variedade Icatu diminuiu de 216,2 para 161,2 mg/kg com a aplicação de 4,8 t/ha de calcário no solo, enquanto na variedade Catuaí o teor médio de Al nas folhas superiores foi de 181,0 mg/kg.

PAVAN et al. (1982), cultivando cafeeiro até sete meses em solo com alta atividade de Al^{3+} e devidamente adubado, observaram um valor máximo de 225 mg/kg de Al no terceiro par de folhas (correspondente às folhas superiores no presente experimento); este teor de Al foi associado a sintomas de toxidez. Os autores observaram que os teores de Al nestas folhas mostraram alta correlação com o crescimento de raízes e, ou, da parte aérea, indicando que a análise de folhas pode ser usada como ferramenta de diagnóstico para avaliação da planta por estresse de Al. De acordo com os autores, 100 e 62 mg/kg de Al nas folhas parecem ser a concentração-limite, a partir da qual o crescimento de parte aérea e raízes seria limitado. No presente trabalho, como já referido anteriormente, foram observados até 263 mg/kg de Al nas folhas superiores e não foram observados

sintomas de toxidez por Al na parte aérea, indicando que, dependendo da forma

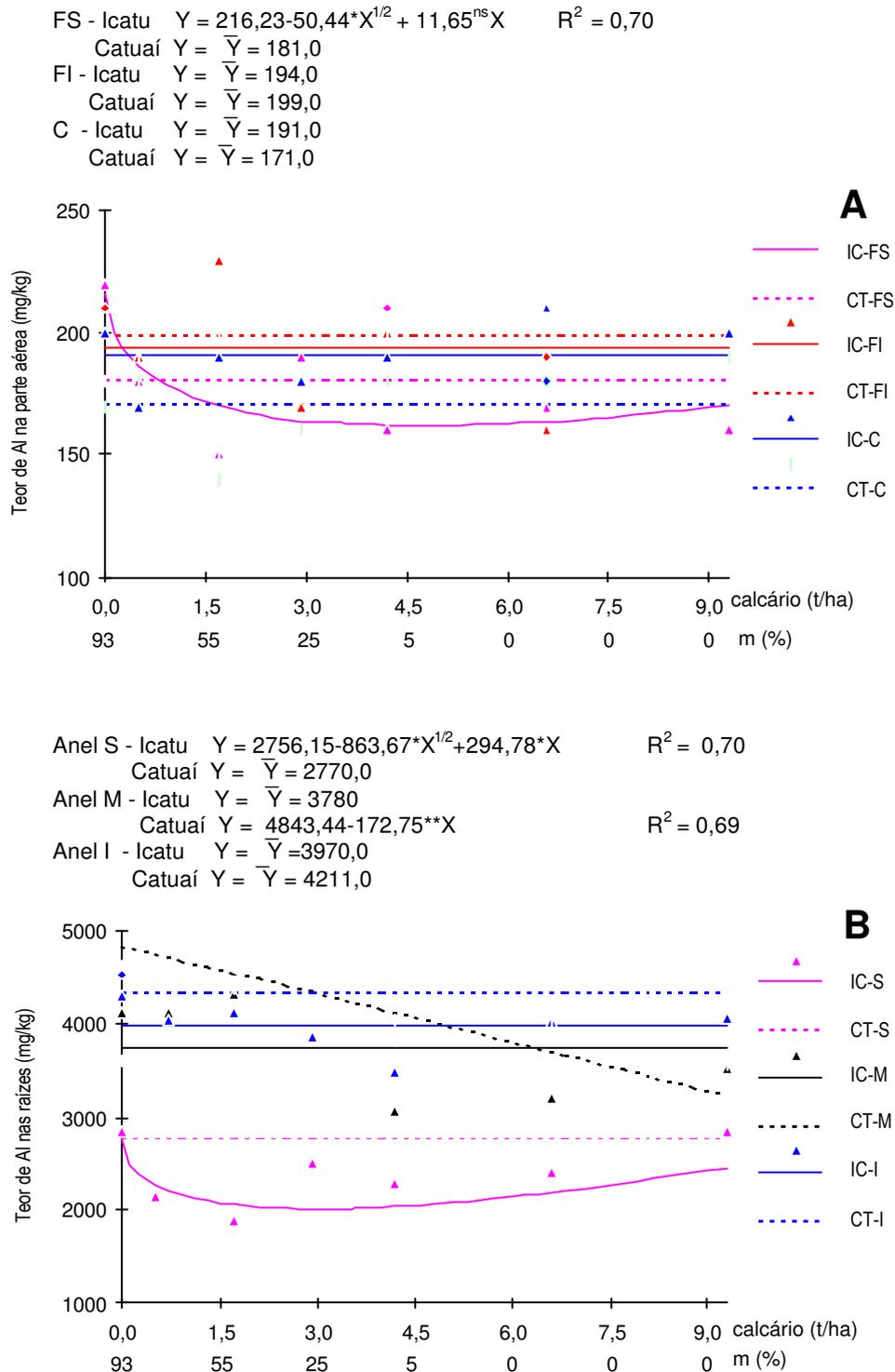


Figura 11 - Estimativa da concentração de Al em plantas de duas variedades de cafeeiro, Icatu (IC) e Catuaí (CT), em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 12 a 34 cm de profundidade, em colunas

de PVC. A - Parte aérea: FS: folhas superiores, FI: folhas inferiores e C: caules; B - Raízes: S: anel superior, M: anel mediano e C: anel inferior.

de cultivo, do pH do meio, da formação de precipitados insolúveis, dos efeitos protetores de outros íons e da presença de quelatos ligantes e genótipos da planta (FURLANI, 1989), os sintomas de toxidez podem não ocorrer.

MARTINEZ e MONNERAT (1991) observaram que a variedade mais tolerante ao Al apresentou menor concentração de Al nas raízes e nos caules, acompanhada de concentrações mais elevadas nas folhas inferiores. Os autores concluíram que a maior tolerância da variedade Mundo Novo estava relacionada com o acúmulo do Al nas folhas inferiores, possibilitando a redução da concentração do Al nas raízes e, conseqüentemente, diminuindo os efeitos negativos deste elemento sobre o seu crescimento e metabolismo. No presente trabalho, a variedade mais tolerante ao Al (Icatu) manteve níveis médios e estáveis de Al nas raízes com a aplicação do calcário ao solo (Figura 10A), enquanto a variedade sensível (Catuaí) manteve um teor médio estável na parte aérea, por meio do acúmulo de Al nas raízes.

O teor de Al nas raízes crescidas no anel superior (Figura 11B) foi menor que o teor das raízes dos demais anéis, independentemente da dose de calcário aplicada ao solo nos anéis inferiores. As raízes da variedade Catuaí permaneceram, em média, com 2.770 mg/kg de Al, enquanto o teor, nas raízes da variedade Icatu, reduziu 23% (de 2.756,2 para 2.123,6 mg/kg) com a aplicação de 2,1 t/ha de calcário no solo, atingindo um ponto de mínimo.

As raízes da variedade Catuaí crescidas no anel mediano foram as que mais responderam à aplicação do calcário ao solo, em relação ao teor de Al. Os decréscimos observados foram da ordem de 33%, enquanto as raízes de ambas as variedades crescidas nos anéis inferiores não apresentaram modificações na concentração interna de Al. Para a variedade Catuaí, sugere-se que, como o anel superior dos vasos encontrava-se igualmente corrigido, independentemente da dose de calcário aplicada nos anéis inferiores, a absorção de Al pelas raízes crescidas neste anel não apresentou grandes variações. Com o crescimento das raízes e o contato com saturações crescentes de Al no solo dos anéis medianos,

não houve controle imediato da absorção do elemento pelas raízes. A princípio, a absorção parece ter sido relacionada à saturação encontrada no solo. O ajuste ao estresse permitiu que houvesse restrição da absorção, estabilizando-se as concentrações de Al das raízes do anel inferior. Isso sugere a ação de um controle hormonal, ativado ao contato das células da coifa com altas concentrações de Al.

4.8. Teores de macronutrientes e eficiência de utilização de P e Ca

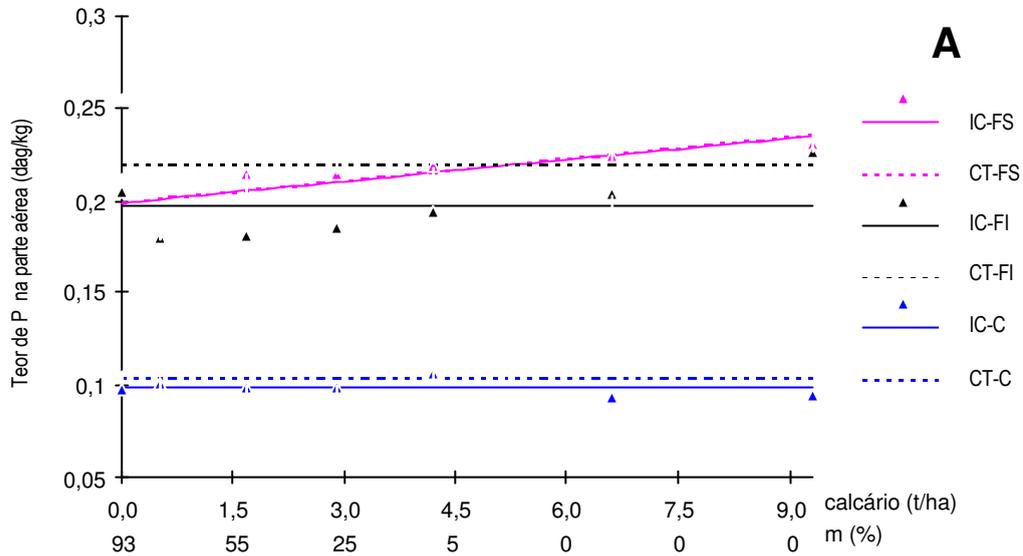
Observou-se que a aplicação do calcário em subsuperfície resultou em aumentos de 18,0% e 18,3% nas concentrações de P das folhas superiores das variedades Icatu e Catuaí, respectivamente, e não promoveu alteração nas concentrações de P nas folhas inferiores e nos caules (Figura 12A). Esse resultado concorda com os de MARTINEZ e MONNERAT (1991), que observaram a redução da concentração de P tanto nas folhas superiores quanto nas inferiores e nos caules de cafeeiro com o aumento do Al em solução nutritiva e sugeriram que a maior tolerância de alguns cultivares deve-se ao melhor uso do P, com maior translocação para regiões de metabolismo intenso.

Apesar do aumento no teor de P nas folhas superiores com a aplicação do calcário ao solo subsuperficial, este teor foi encontrado em nível adequado nas folhas (cerca de 0,2 dag/kg), em todas as doses de calcário utilizadas (Figura 12A). Para cafeeiros, o teor adequado encontra-se entre 0,12 e 0,2 dag/kg (EPSTEIN, 1975; MALAVOLTA, 1986; RAIJ, 1991; MATIELLO, 1991; MALAVOLTA, 1992; PREZOTTI e BRAGANÇA, 1995). Segundo FOY (1974), muitas espécies de plantas tolerantes ao Al estão associadas ao uso eficiente de P. No presente trabalho, além de o nível de P estar adequado, o P absorvido foi também translocado preferencialmente para regiões de crescimento mais ativo (folhas superiores).

Os teores de P nas raízes dos anéis superiores foram valores relativamente próximos aos observados nos medianos e inferiores (variaram de 0,145 a 0,20 dag/kg) (Figura 12B). Essa resposta indica que houve translocação

de P das raízes do anel superior tanto para a parte aérea quanto para as raízes dos

FS - Icatu $Y = 0,199 + 0,00385^{**}X$ $R^2 = 0,65$
 Catuaí $Y = 0,1996 + 0,0039^{**}X$ $R^2 = 0,61$
 FI - Icatu $Y = \bar{Y} = 0,197$
 Catuaí $Y = \bar{Y} = 0,22$
 C - Icatu $Y = \bar{Y} = 0,105$
 Catuaí $Y = \bar{Y} = 0,107$



Anel S - Icatu $Y = \bar{Y} = 0,1307$
 Catuaí $Y = \bar{Y} = 0,145$
 Anel M - Icatu $Y = \bar{Y} = 0,176$
 Catuaí $Y = 0,153 + 0,0189^{**}X - 0,0018^{**}X^2$ $R^2 = 0,88$
 Anel I - Icatu $Y = 0,1599 - 0,0196^{**}X + 0,0059^{**}X^2 - 0,00043^{**}X^3$ $R^2 = 0,96$
 Catuaí $Y = 0,151 - 0,0142^{ns}X + 0,0044X^2 - 0,00033^{**}X^3$ $R^2 = 0,67$

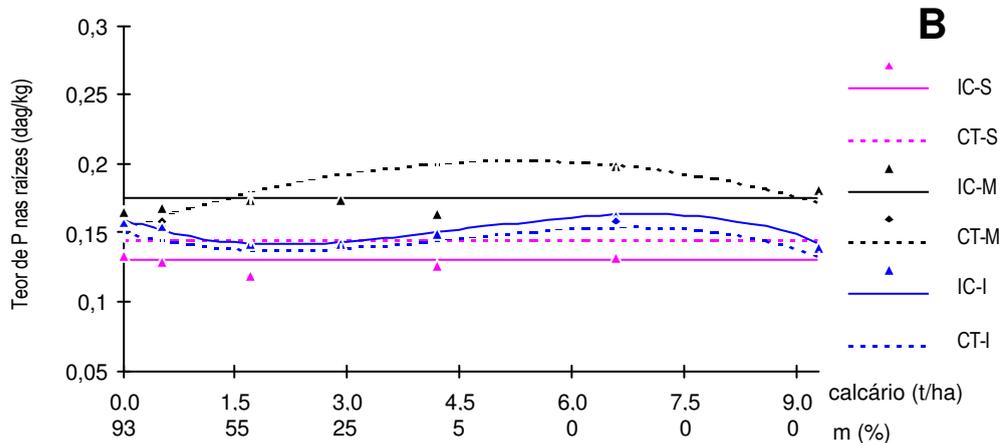


Figura 12 - Estimativa do teor de P em plantas de duas variedades de cafeeiro, Icatu (IC) e Catuaí (CT), em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 12 a 34 cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Parte aérea: FS - folhas superiores, FI - folhas inferiores e C - Caules; B - Raízes: S - anel superior, M - anel mediano e I - anel inferior.

anéis inferiores, independentemente da aplicação do calcário na subsuperfície. De acordo com Stryker et al. (1974), citados por SILVA et al. (1993), a taxa de crescimento das raízes localizadas na região sem P depende do suprimento interno de P via translocação. NOVAIS et al. (1985) sugerem ser a taxa de crescimento das raízes, na ausência de P, dependente do suprimento interno via translocação, parecendo não ser tão dependente do conteúdo externo às raízes.

Na variedade Catuaí, o teor de P nas raízes do anel mediano aumentou cerca de 32,1%, atingindo este ponto de máximo com a aplicação de 5,2 t/ha de calcário ($m = 0\%$), com posterior queda com a adição de mais calcário ao solo, sugerindo restrição na absorção de P em doses de calcário supra-ótimas. Nesse anel não houve variação no teor de P das raízes da variedade Icatu.

Nas raízes dos anéis inferiores de ambas as variedades, houve acréscimos da concentração de P na dose de 6,8 t/ha de calcário aplicado ao solo. Essa resposta pode ser decorrente do aumento no comprimento e na superfície de raízes nestes anéis, nessas doses, com conseqüente aumento da área de absorção de nutrientes.

A resposta observada no teor de P nas folhas superiores e nas raízes (Figura 12A e B) indica que, nos solos com maiores saturações de Al nos anéis inferiores, a translocação de P a partir do anel superior estava ocorrendo preferencialmente para as raízes dos anéis inferiores, não sendo suficiente para manter a translocação para regiões de maior metabolismo na parte aérea, como as folhas superiores (embora o teor interno estivesse adequado). Esta resposta corrobora os resultados de PAVAN e BINGHAM (1982) e BENNET et al. (1986). Segundo PAVAN e BINGHAM (1982), no cultivo do cafeeiro em presença de Al, além da precipitação interna de P, o Al pode interferir na translocação desse elemento para a parte aérea da planta. RHEINHEIMER et al. (1994) informa que plantas de fumo desenvolvendo-se em solução nutritiva contendo Al absorveram e translocaram menor quantidade de P, que se acumulou preferencialmente no sistema radicular. Ao transferi-las para solução sem Al, observou-se rápida diminuição no teor de P do sistema radicular e maior translocação para caules e folhas.

De acordo com FURLANI (1989), o suprimento de P nos substratos 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.

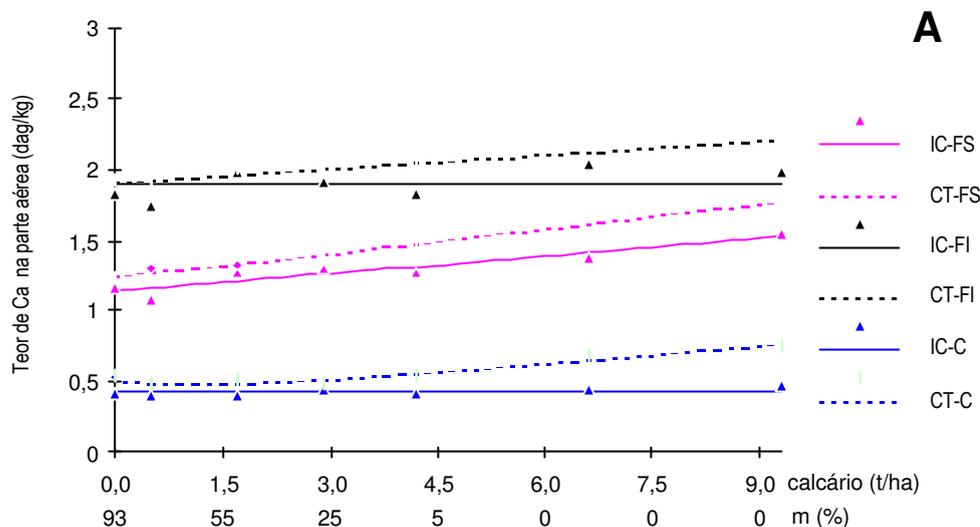
Ambas as variedades apresentaram maior teor de Ca nas folhas inferiores e menor nos caules (Figura 13A). Os teores de Ca em folhas superiores, inferiores e caules da variedade Catuaí apresentaram aumentos lineares de 43,3%, 15,5% e 11,6%, respectivamente, enquanto na variedade Icatu o aumento ocorreu somente nas folhas superiores (35,5%), nas folhas inferiores e nos caules; os teores de Ca não variaram com a aplicação do calcário ao solo.

Os menores teores de Ca nas folhas foram observados onde não havia calagem (93% de saturação de Al). A redução da concentração de Ca nas folhas de cafeeiro com o aumento dos níveis de Al na solução nutritiva foi observada por PAVAN e BINGHAN (1982).

Os teores de Ca considerados normais para o cafeeiro, segundo MALAVOLTA (1986 e 1992), MATIELLO (1991) e PREZOTTI e BRAGANÇA (1995), devem estar acima de 1,0 dag/kg. Sem a calagem nos anéis inferiores (93% de saturação de Al), as folhas superiores apresentaram 1,13 e 1,24 dag/kg e as folhas inferiores, 1,9 e 1,91 dag/kg, para as variedades Icatu e Catuaí, respectivamente. O teor de Ca adequado nas folhas de cafeeiro, quando não foi aplicado o calcário ao solo dos anéis inferiores, deve-se, provavelmente, à adição do Ca (via calagem) no anel superior, que manteve a absorção e a translocação deste elemento para a parte aérea. De acordo com FOY e FLEMING (1978), a tolerância entre cultivares de trigo, cevada, soja e feijão pode estar associada com a capacidade destes cultivares de absorverem e transportarem o Ca na presença de Al.

Apesar dos teores adequados de Ca nas folhas, em todas as doses de calcário utilizadas, a variedade Catuaí respondeu à aplicação do calcário ao solo dos anéis inferiores, enquanto para a variedade Icatu essa resposta ocorreu somente para as folhas superiores, indicando a necessidade de maior suprimento de Ca nas regiões de crescimento ativo, nesta variedade (Figura 13A).

FS - Icatu	$Y = 1,133 + 0,043^{**}X$	$R^2 = 0,90$
Catuaí	$Y = 1,24 + 0,058^{**}X$	$R^2 = 0,95$
FI - Icatu	$Y = \bar{Y} = 1,9$	
Catuaí	$Y = 1,91 + 0,032^{**}X$	$R^2 = 0,85$
C - Icatu	$Y = \bar{Y} = 0,43$	
Catuaí	$Y = 0,54 - 0,127X^{**1/2} + 0,0656^{ns}X$	$R^2 = 0,95$



Anel S - Icatu	$Y = 0,615 - 0,131X^{*1/2} + 0,036^{ns}X$	$R^2 = 0,87$
Catuaí	$Y = 0,786 - 0,19^{**}X^{1/2} + 0,043^{*}X$	$R^2 = 0,62$
Anel M - Icatu	$Y = 0,601 + 0,06^{**}X$	$R^2 = 0,80$
Catuaí	$Y = 0,712 + 0,047^{**}X$	$R^2 = 0,86$
Anel I - Icatu	$Y = 0,90 + 0,52^{**}X^{1/2} - 0,045^{ns}X$	$R^2 = 0,85$
Catuaí	$Y = 0,953 + 0,959^{**}X^{1/2} - 0,187^{**}X$	$R^2 = 0,89$

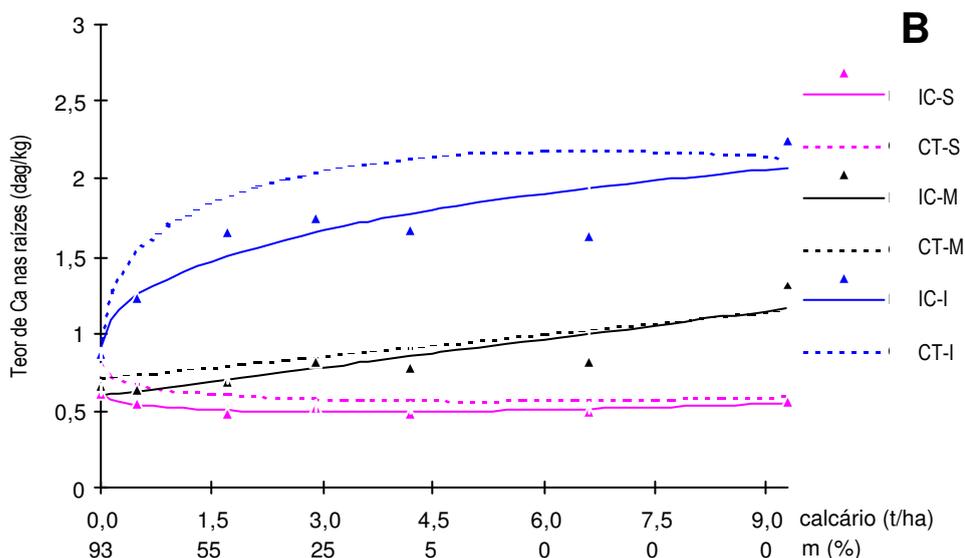


Figura 13 - Estimativa do teor de Ca em plantas de duas variedades de cafeeiro, Icatu (IC) e Catuaí (CT), em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 12 a 34 cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Parte aérea: FS - folhas superiores, FI - folhas inferiores e C - Caules; B - Raízes: S - anel superior, M - anel mediano e I - anel inferior.

Nas raízes (Figura 13B), nota-se que as duas variedades apresentaram padrão semelhante no teor de Ca, em cada anel. As raízes do anel superior apresentaram pequenos decréscimos no teor de Ca com a aplicação do calcário subsuperficial. O decréscimo foi de 14,6%, para a variedade Icatu, e de 28,8%, para a variedade Catuaí, com a aplicação de 3,3 e 5,1 t/ha de calcário ao solo, respectivamente. Essa resposta deve-se, provavelmente, à diminuição percentual da matéria seca, do comprimento e da superfície de raízes ocorrida no anel superior com a aplicação do calcário no solo dos anéis inferiores, como já discutido anteriormente.

Sem a aplicação de calcário ao solo dos anéis inferiores (93% de saturação de Al), as raízes apresentavam teores de Ca variando entre 0,60 e 0,95 dag/kg. A aplicação do calcário elevou a concentração de Ca nas raízes do anel inferior e intermediário, enquanto diminuiu no anel superior.

As raízes do anel inferior foram as que apresentaram maior aumento no teor de Ca. Este aumento foi de 128,4% em 9,3 t/ha de calcário aplicado no solo, para a variedade Icatu, e de 128,9%, para a variedade Catuaí, atingidos em 6,6 t/ha de calcário aplicado subsuperficialmente.

O incremento máximo no teor de Ca nas raízes, observado para a variedade Catuaí, atingido em 0% de saturação de Al no solo, não correspondeu à dose máxima de calcário utilizada, sugerindo que o acúmulo de Ca nesta variedade estivesse respondendo não somente à adição de Ca, mas também à diminuição da saturação do Al no solo.

A inibição da absorção do Ca pode ser o resultado da competição ou do bloqueio por sítios de ligação pelo Al (MARSCHNER, 1995). A lesão primária seria o bloqueio dos canais de Ca^{2+} na membrana plasmática das raízes, diminuindo a taxa de absorção de Ca e causando deficiência no citoplasma e distúrbios na homeostase do Ca na célula (RENGEL et al., 1995). No entanto, segundo PAVAN (1982), a adição de Ca na solução nutritiva contendo alta concentração de Al não alterou a absorção do Ca e a atividade do Al para um nível não-tóxico. O autor concluiu que não seria de se esperar que, em cafeeiros,

o aumento da concentração de Ca na solução de solos ácidos, sem alterar a solubilidade de Al, amenizaria os efeitos tóxicos causados por íons Al^{3+} .

No presente trabalho, os diferentes níveis de saturação de Al encontram-se nos anéis inferiores (onde se fez a calagem diferencial). O Ca para a manutenção da planta foi adicionado no anel superior, juntamente com os demais nutrientes. Alta saturação de Al nos anéis inferiores promoveu sintomas de toxidez de Al nas raízes, mesmo com a presença do Ca no anel superior. Além disso, a presença de Ca no anel superior não diminuiu a absorção do Al no anel mediano, sendo observado que não houve alteração no teor de Al no anel inferior com a aplicação do calcário na subsuperfície. Esses resultados permitem pressupor que não são os teores internos e, ou, externos de Ca que levariam a uma menor absorção de Al pelas raízes e sim o ajuste da planta ao estresse por Al, que pode ser influenciado também pela sensibilidade da variedade.

Outro ponto interessante a ser observado é que, no presente trabalho, as raízes dos anéis inferiores apresentaram incremento acentuado na concentração de Ca com pequenas doses de calcário (próximas a 0,5 t/ha); a partir daí, a aplicação de doses maiores de calcário ao solo passou a corresponder a pequenos incrementos no teor interno de Ca nas raízes, levando a crer que a relação Ca/Al se encontrasse em um nível mais tolerável pela planta. Segundo BOUDOT et al. (1994), a relação Ca/Al pode refletir a competição entre o Ca e o Al por sítios de absorção nas raízes. Os efeitos da aplicação do Ca são mais favoráveis ao desenvolvimento radicular que ao da parte aérea, havendo, em sua ausência, maior incidência de raízes grossas, comparativamente às finas (SILVA et al., 1993), sintomas estes que se assemelham aos de toxidez por Al.

Observou-se decréscimo de 19,3% na eficiência de utilização de P (Figura 14A) pela parte aérea da variedade Icatu, com a aplicação do calcário ao solo. Para a parte aérea da variedade Catuaí e para raízes de ambas as variedades, não se observaram variações na eficiência de utilização de P. Na parte aérea da variedade Icatu, o decréscimo da eficiência de utilização de P (Figura 14A) coincide com o decréscimo no teor de Al (Figura 10) e com o aumento do teor

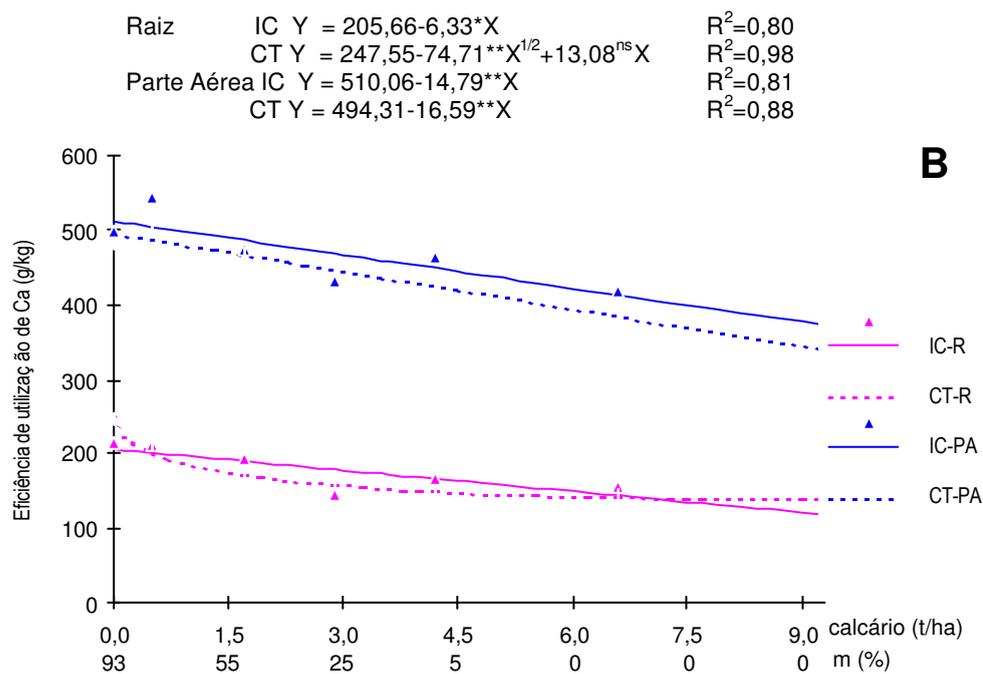
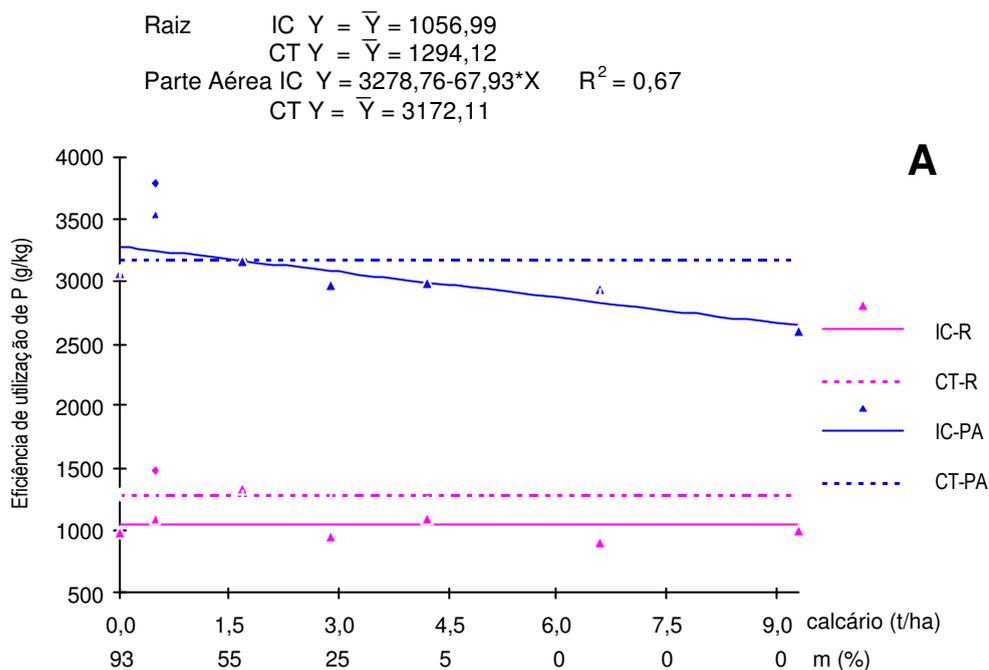


Figura 14 - Estimativa da eficiência de utilização de P e Ca [(matéria seca (g))²/conteúdo(g)] em plantas de duas variedades de cafeeiro, Icatu (IC) e Catuaí (CT), em função da aplicação de calcário no solo, na faixa de 12 a 34 cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Eficiência de utilização de P; B - Eficiência de utilização de Ca. PA - parte aérea e R - raiz.

de P nas folhas superiores (Figura 12A). Segundo RAJU et al. (1987), plantas com boa eficiência de utilização de P apresentam maior taxa de retranslocação, ou seja, maior redistribuição do P de tecidos velhos para os mais novos. O aumento no teor de P nas regiões de maior metabolismo não resultou em maior biomassa na parte aérea nem nas raízes, uma vez que a matéria seca destas partes não se modificou com a aplicação do calcário ao solo subsuperficial.

Para a parte aérea da variedade Catuaí, não ocorreu variação na eficiência de utilização de P, assim como não ocorreu variação no teor de Al (Figura 10) com a aplicação do calcário ao solo, embora tenha ocorrido aumento no teor de P das folhas superiores. Assim, comparando as respostas das duas variedades testadas, pode-se pressupor que, pelo menos no que se refere à parte aérea, a maior eficiência de utilização de P está associada ao acúmulo de Al nessa parte da planta. Esse resultado também foi observado por BRACCINI (1995), que constatou que a tolerância ao Al de certas variedades de cafeeiro cultivadas em solução nutritiva, em presença de Al, estava associada à eficiência de utilização de P pelas plantas. Respostas semelhantes foram observadas por MARSCHNER (1995), para trigo e arroz, e por FOY et al. (1978), para trigo, tomate e milho. No presente trabalho, a variedade tolerante (Icatu) confirma as respostas obtidas por esses autores no que se refere à eficiência de utilização de P pela parte aérea.

Nas raízes, não houve alteração da eficiência de utilização de P com a aplicação do calcário no solo (Figura 14A). Para a variedade Catuaí, a resposta é, de certa forma, conflitante. Nesta variedade não houve variação na matéria seca e na eficiência de utilização de P, mas houve decréscimo no teor de Al, acompanhado de pequenos aumentos no teor de P com aplicação do calcário ao solo dos anéis inferiores. Assim, nas raízes, a eficiência de utilização de P não parece estar necessariamente ligada ao teor de Al nesta parte.

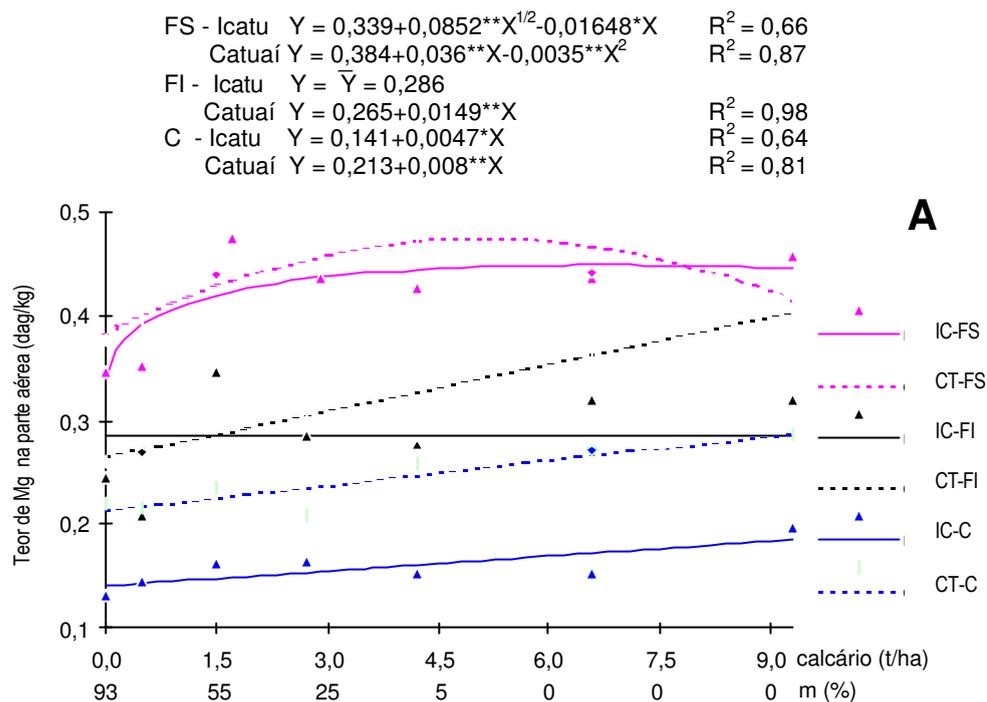
No caso de eficiência nutricional de P, segundo MARSCHNER (1995), a morfologia das raízes é o fator mais importante. No presente trabalho, a variedade Catuaí apresentou aumento no comprimento e na superfície total das raízes, sem alterar a quantidade de matéria seca total de raízes, com a aplicação

do calcário ao solo dos anéis inferiores, o que provavelmente teve influência sobre a eficiência de utilização, sobre o aumento da absorção e, ainda, sobre a translocação do P para a parte aérea.

A eficiência de utilização de Ca decresceu com a aplicação do calcário no solo e a conseqüente diminuição da saturação de Al, para as duas variedades (Figura 14B); para a parte aérea, a redução foi de 27 e 31,2% e, nas raízes, de 42,3 e 43,5%, para as variedades Icatu e Catuaí, respectivamente. Esse decréscimo ocorreu devido ao aumento no teor de Ca tanto na parte aérea quanto nas raízes, uma vez que não houve alteração na produção de matéria seca nestas partes com a aplicação do calcário ao solo dos anéis inferiores. Assim, a maior absorção de Ca não implicou maior conversão de biomassa. Esse resultado concorda com os de BRACCINI (1995), que observou que a toxidez ao Al implicou o aumento da eficiência de utilização de Ca, principalmente nos genótipos mais tolerantes ao Al. Genótipos tolerantes ao Al seriam aqueles com maior capacidade de produção de biomassa, mesmo com redução de absorção de Ca. Segundo FOY et al. (1972), evidências indicam que a tolerância de algumas espécies ao Al está relacionada à sua capacidade de absorver e metabolizar o P e o Ca na presença de Al de forma mais eficiente.

No caso do Ca, a eficiência de utilização pode ter sido influenciada pela aplicação do Ca ao solo por ocasião da calagem subsuperficial. Segundo MARSCHNER (1995), em princípio, a alta eficiência nutricional é refletida pelo baixo nível crítico a um determinado elemento de um genótipo, quando comparado a outro de mesma espécie. Já ANGHINONI et al. (1989) informa que as características de tolerância a condições de baixo suprimento nutricional não estão necessariamente relacionadas a uma baixa eficiência em absorver e, mesmo, utilizar nutrientes em condições de fertilidade mais elevada. No presente trabalho não houve diferença entre as duas variedades em relação à eficiência de utilização de Ca.

Na parte aérea, observa-se maior concentração de Mg nas folhas superiores e menor nos caules, para ambas as variedades (Figura 15A). Com



Anel S - Icatu	$Y = 0,479 - 0,1011^{*}X^{1/2} + 0,0235^{ns}X$	$R^2 = 0,66$
Catuaí	$Y = 0,562 - 0,089^{*}X + 0,008^{**}X^2$	$R^2 = 0,95$
Anel M - Icatu	$Y = 0,76 - 0,0164^{ns}X + 0,0072^{**}X^2$	$R^2 = 0,91$
Catuaí	$Y = 0,64 + 0,039^{**}X$	$R^2 = 0,94$
Anel I - Icatu	$Y = 0,74 + 0,829^{**}X^{1/2} - 0,197^{**}X$	$R^2 = 0,94$
Catuaí	$Y = 0,693 + 0,913^{**}X^{1/2} - 0,22^{**}X$	$R^2 = 0,93$

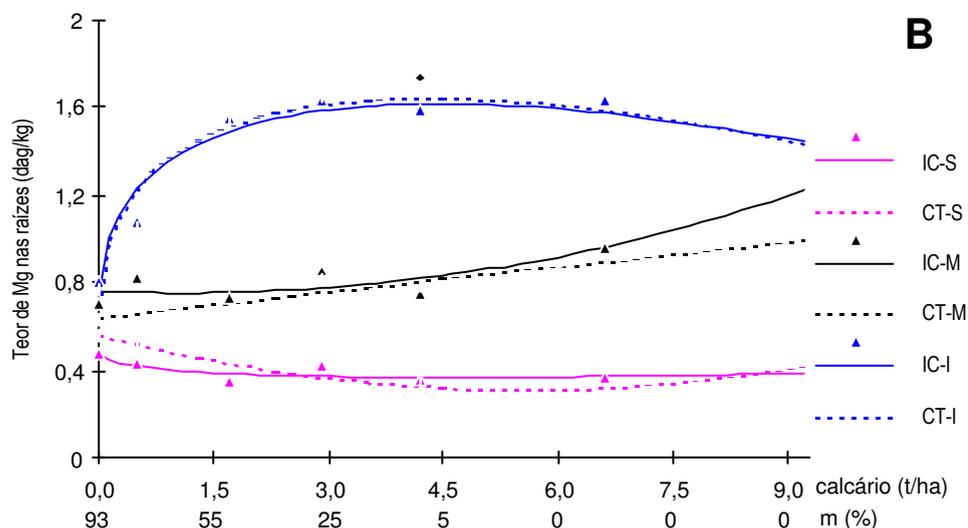


Figura 15 - Estimativa do teor de Mg em plantas de duas variedades de cafeeiro, Icatu (IC) e Catuaí (CT), em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 12 a 34 cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Parte aérea: FS - folhas superiores, FI - folhas inferiores e C - caules; B - Raízes: S - anel superior, M - anel mediano e I - anel inferior.

exceção da concentração de Mg nas folhas inferiores da variedade Icatu, que permaneceu, em média, com 0,286 dag/ha, percebe-se que a aplicação do calcário ao solo e a conseqüente diminuição da saturação de Al promoveram o aumento na concentração deste elemento em todas as outras partes da parte aérea, para ambas as variedades. Esses resultados estão de acordo com FURLANI (1989), o qual explica que a baixa concentração de Mg nas raízes e na parte aérea das plantas cultivadas em presença de Al deve-se à inibição da absorção deste elemento.

As folhas superiores apresentaram maior teor de Mg que as outras partes, evidenciando que a translocação deste elemento foi mais efetiva para regiões de crescimento ativo.

A distribuição do Mg nas raízes (Figura 15B) foi semelhante à do Ca (Figura 13B) em todos os anéis. Observaram-se incrementos no teor de Mg nas raízes dos anéis inferiores e decréscimos no anel superior com a aplicação do calcário ao solo subsuperficial. O decréscimo observado no anel superior nas duas variedades deve-se, provavelmente, à diminuição no comprimento e na superfície de raízes neste anel, com aumento nos anéis inferiores.

Observou-se maior teor de Mg nas raízes do anel inferior, mesmo no tratamento sem calagem, indicando a ocorrência de translocação de Mg para as raízes deste anel. No anel inferior, a variedade Icatu apresentou incremento máximo de 116,6% e a Catuaí, de 135,5%, com a aplicação de 3,7 e 3,7 t/ha de calcário ao solo dos anéis inferiores.

Embora em ambas as variedades o teor de Mg tenha aumentado tanto na parte aérea quanto nas raízes com a aplicação do calcário ao solo (Figura 15B), sem a calagem, o teor de Mg nas folhas manteve-se em nível adequado (variou entre 0,27 e 0,38 dag/kg) para ambas as variedades. Segundo MALAVOLTA (1992), MATIELLO (1991) e PREZOTTI e BRAGANÇA (1995), o teor adequado de Mg nas folhas está entre 0,27 e 0,5 dag/kg. Essa resposta indica que a calagem com $MgCO_3$ no anel superior supriu adequadamente a planta, em relação ao Mg. BATAGLIA et al. (1985) verificaram que em cultivares de trigo tolerantes ao Al, cultivados em diferentes níveis de calagem, a deficiência de Mg

afetou diretamente a produção, enquanto para os cultivares mais sensíveis, além do Mg, o acúmulo de Al na parte aérea e a menor absorção de outros nutrientes em função do menor desenvolvimento radicular afetaram a produção.

Folhas superiores e inferiores da variedade Catuaí apresentaram decréscimos de 13,0% no teor de K com a aplicação do calcário no solo dos anéis inferiores (Figura 16A). Nas demais partes da parte aérea não houve alteração no teor do K.

Os menores teores de K observados nas folhas (2,8 dag/kg) são considerados normais em cafeeiros. Níveis normais estão acima de 2,2 dag/kg, segundo MATIELLO (1991) e PREZOTTI e BRAGANÇA (1995).

Nas raízes do anel superior não houve variação no teor de K para a variedade Icatu (Figura 16B), enquanto na variedade Catuaí a aplicação do calcário promoveu decréscimo do K de 24,7% (de 2,4 para 1,8 dag/kg), em 5,3 t/ha de calcário aplicado ao solo dos anéis inferiores. A partir desta dose de calcário houve aumento de 20,8% (para 2,3 dag/kg).

As raízes dos anéis intermediários de ambas as variedades apresentaram pequenos aumentos no teor interno de K. As maiores variações ocorreram nos teores das raízes dos anéis inferiores. O decréscimo foi de 46,7% (3,0 para 1,6 dag/kg) para a variedade Icatu e de 51,2% (2,7 para 1,3 dag/kg) para a Catuaí, e estes valores mínimos ocorreram a 5,2 e 4,6 t/ha de calcário aplicado no solo, respectivamente. Essa resposta de maiores teores de K nas raízes cultivadas em presença de alta saturação de Al no solo foi também encontrada em cafeeiro por PAVAN e BINGHAM (1982), porém é inversa à comentada por FURLANI (1989). Segundo o autor, ocorre diminuição da concentração de K na parte aérea e nas raízes de plantas cultivadas sob estresse por Al.

De acordo com Andrew et al. (1973), citados por PAVAN e BINGHAM (1982), o aumento na absorção de K em plantas cultivadas em presença de Al ocorre devido à capacidade das plantas de manterem o balanço cátion-aniônico, uma vez que sob condições de estresse por Al ocorre redução da absorção de Ca e Mg. No presente trabalho também foi observado aumento no teor de K,

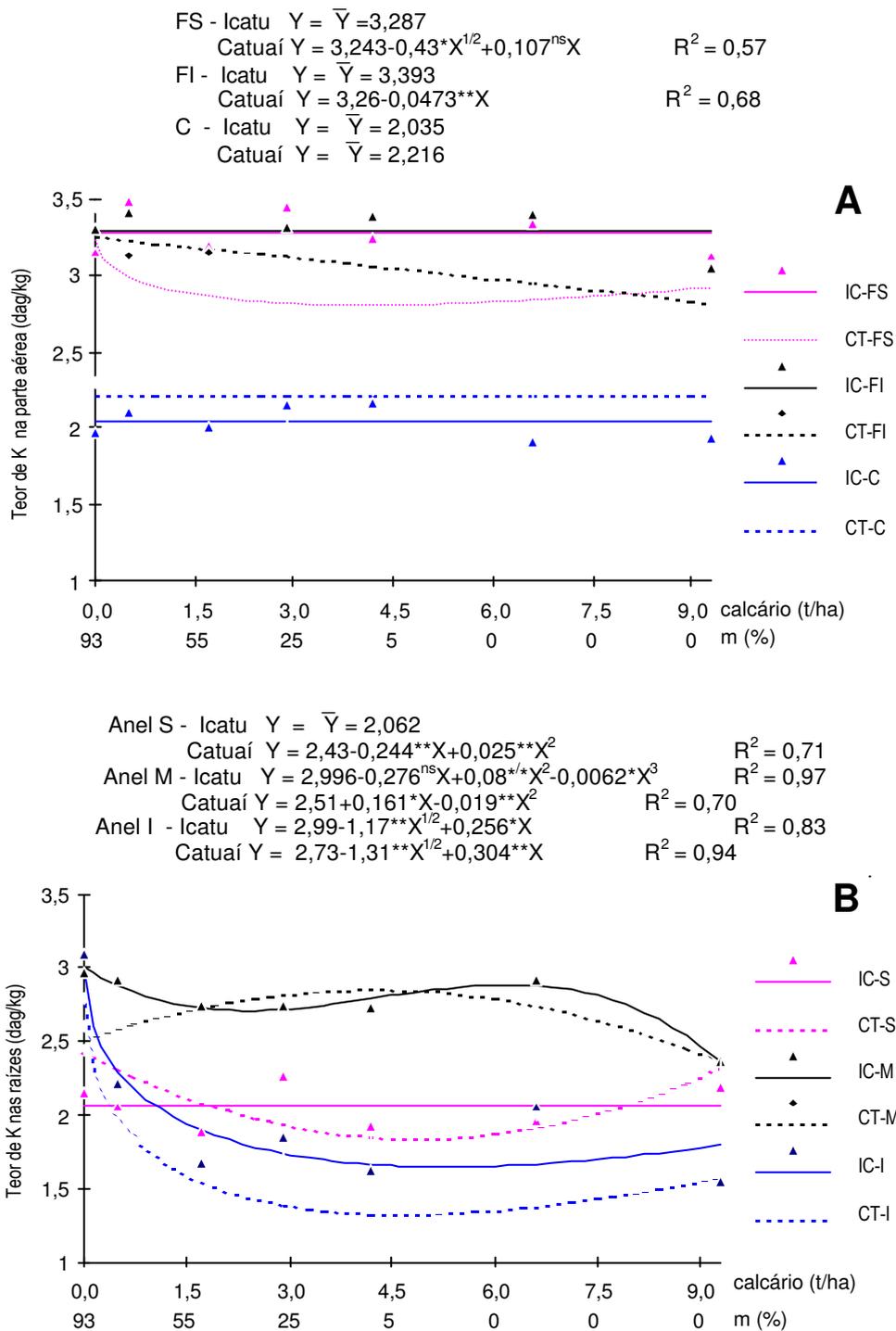


Figura 16 - Estimativa do teor de K em plantas de duas variedades de cafeeiro, Icatu (IC) e Catuaí (CT), em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 12 a 34 cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Parte aérea: FS - folhas superiores, FI - folhas inferiores e C - caules; B - Raízes: S - anel superior, M - anel mediano e I - anel inferior.

principalmente nas raízes dos anéis inferiores, com o aumento da saturação de Al no solo.

Os maiores percentuais de redução no teor de K nas raízes e na parte aérea, em função da aplicação do calcário ao solo, ocorreram na variedade Catuaí; provavelmente essa resposta reflete a menor tolerância desta variedade ao Al, uma vez que apresentou também maiores teores de Ca, tanto na parte aérea quanto nas raízes (Figura 13), e também de Mg, na parte aérea (Figura 16A).

4.9. Teores de micronutrientes

As folhas inferiores e os caules do cafeeiro apresentaram menor e maior teor de Cu e Zn, respectivamente (Figura 17A e B). Com exceção do teor de Cu nas folhas inferiores da variedade Catuaí, que diminuiu 37,3% com a aplicação de calcário no solo, e do teor do Zn nas folhas inferiores da variedade Icatu, que aumentou 12,8%, com posterior decréscimo, nas demais partes não houve alteração na concentração interna destes elementos na parte aérea, em função das doses de calcário aplicadas ao solo.

Os caules de ambas as variedades apresentaram menor teor de Mn e as folhas inferiores, o maior teor (Figura 18A). Somente as folhas inferiores e superiores da variedade Catuaí aumentaram a concentração de Mn, em 15 e 26,4%, respectivamente; nas demais partes não ocorreu alteração com a aplicação do calcário ao solo.

Com exceção do teor de Fe nos caules (Figura 18B), que aumentou na variedade Catuaí, as demais partes não apresentaram variação na concentração deste elemento com a aplicação do calcário na subsuperfície e a conseqüente diminuição da saturação de Al no solo. As folhas inferiores apresentaram maior concentração de Fe que as demais partes. De acordo com ANDERSON (1988), o Al pode interferir na absorção e no transporte de Fe. Mas, na literatura, as respostas são muito variadas; alguns trabalhos mostraram a ocorrência de

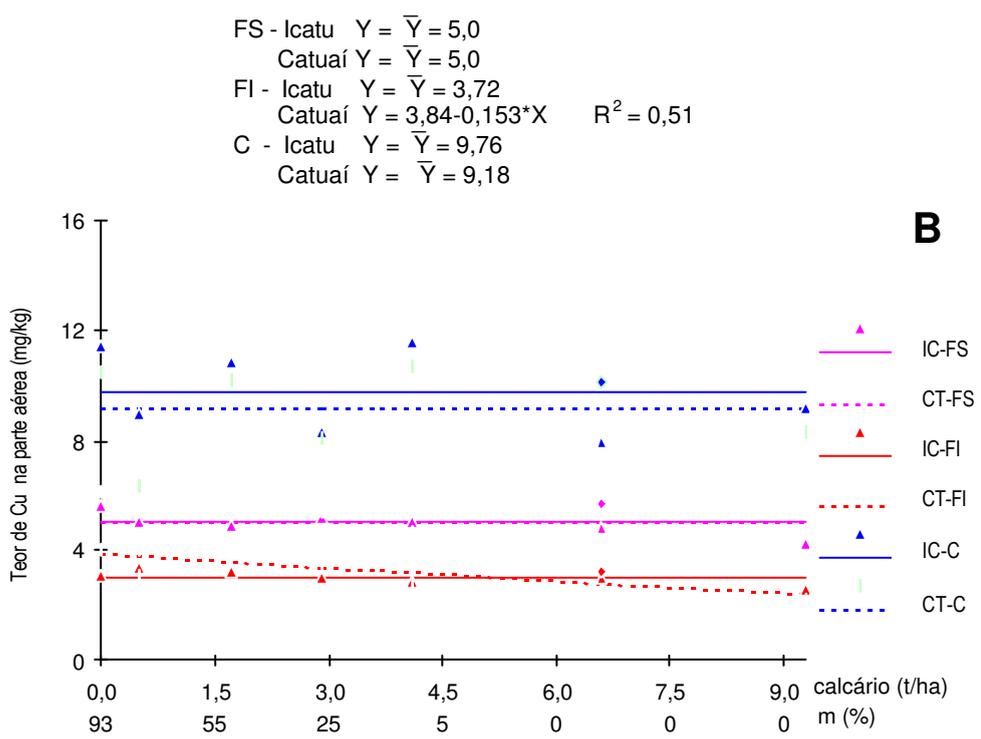
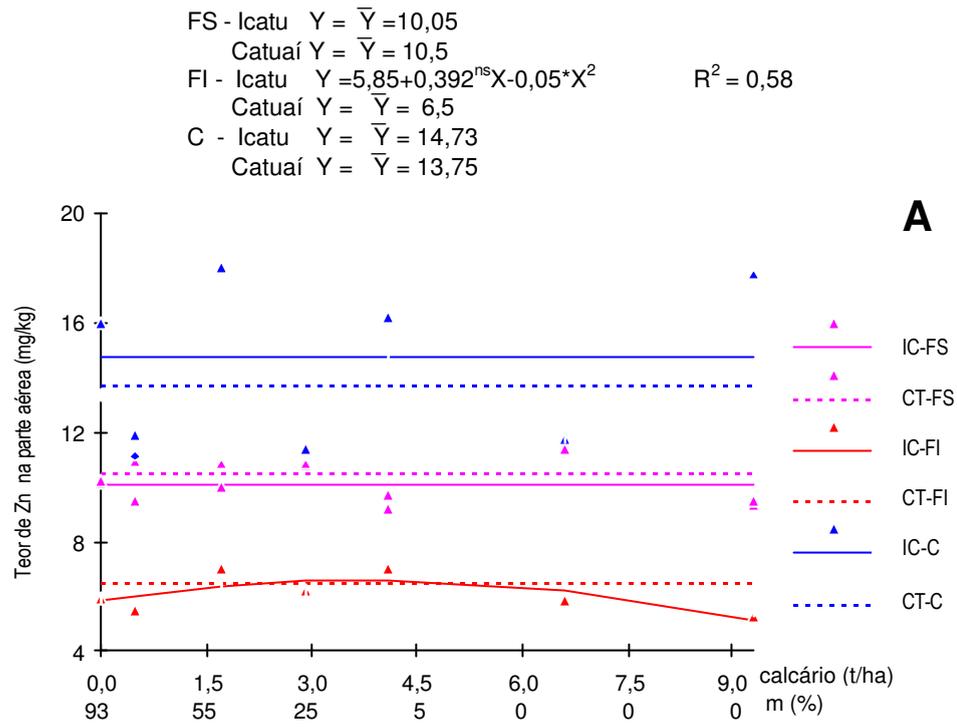


Figura 17 - Estimativa do teor de Zn e Cu na parte aérea de plantas de duas variedades de cafeeiro, Icatu (IC) e Catuaí (CT), em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 12 a 34 cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Concentração de Zn em: FS - folhas superiores, FI - folhas inferiores e C - caules; B - Concentração de Cu: FS - folhas superiores, FI - folhas inferiores e C - caules.

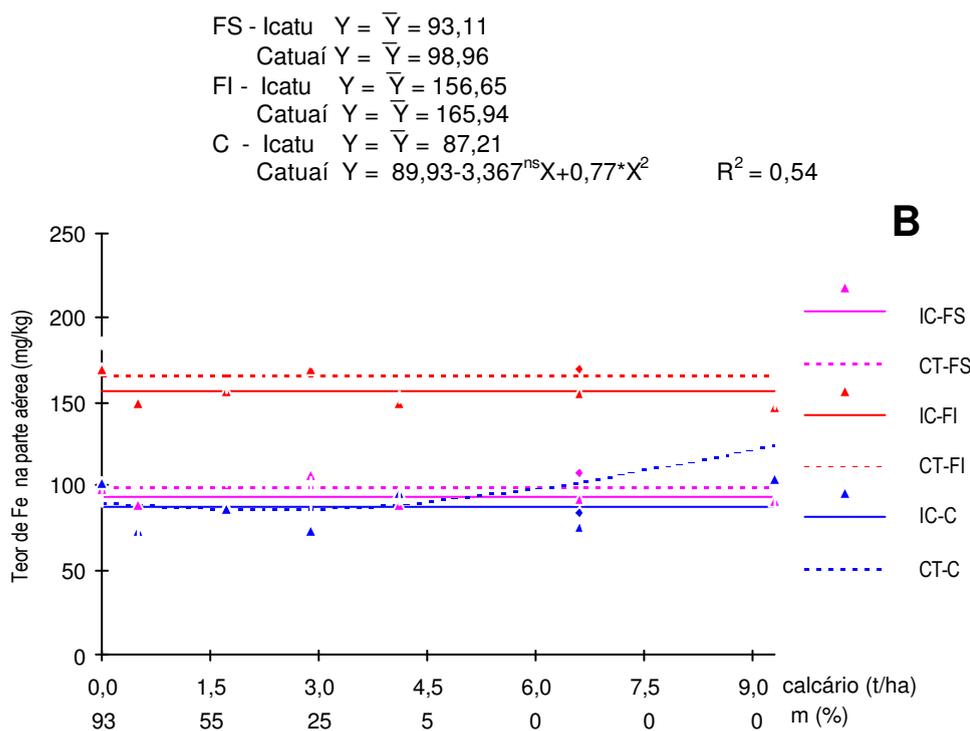
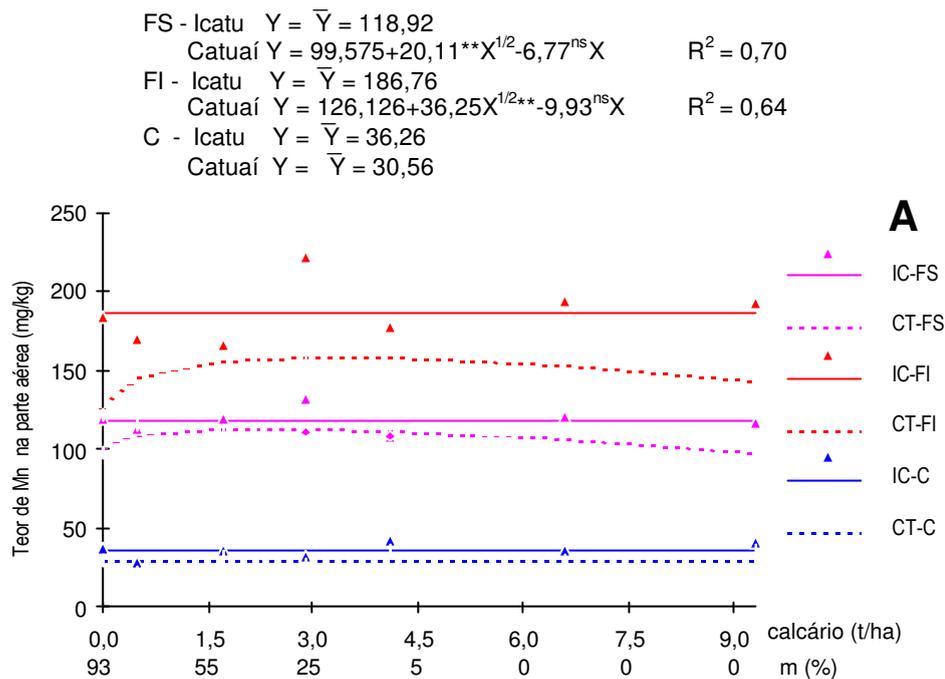


Figura 18 - Estimativa do teor de Mn e Fe na parte aérea de plantas de duas variedades de cafeeiro, Icatu (IC) e Catuaí (CT), em função da aplicação de calcário ao solo, na faixa de 12 a 34 cm de profundidade, em colunas de PVC. A - Concentração de Mn em: FS - folhas superiores, FI - folhas inferiores e C - caules; B - Concentração de Fe: FS - folhas superiores, FI - folhas inferiores e C - caules.

deficiência de Fe devido ao estresse por Al e, em outros, foi verificado aumento da concentração deste elemento nos tecidos da planta (FOY et al., 1978; TAYLOR, 1988; PAVAN e BINGHAM, 1982).

Os teores de Cu, Zn e Fe em folhas superiores, inferiores e caules foram muito próximos entre as duas variedades, não diferindo estatisticamente. O teor de Mn nas folhas superiores e inferiores foi maior na variedade Icatu que na Catuaí. Os teores adequados de Zn, Cu, Mn e Fe estão na faixa de 5-20; 6-15; 50-150 e 70-200 mg/kg, respectivamente (MATIELLO, 1991; MALAVOLTA, 1992; PREZOTTI e BRAGANÇA, 1995). Os teores observados nas folhas superiores no presente trabalho, para as variedades Icatu e Catuaí, foram, respectivamente: 10 e 10,5, para Zn; 5, para Cu; 118 e 99,6, para Mn; e 93 e 99 mg/kg, para Fe, estando todos dentro dos valores considerados adequados ao cafeeiro, evidenciando que, também para os micronutrientes, a adubação no anel superior foi efetiva.

O decréscimo no teor de Zn e de Cu nas folhas inferiores das variedades Icatu e Catuaí, respectivamente, e no teor de Mn nas folhas superiores e inferiores da variedade Catuaí, ocorrido nas maiores doses de calcário, evidencia menor translocação destes elementos para a parte aérea, que refletiu principalmente nas regiões de menor metabolismo.

Segundo PAVAN e BINGHAM (1982), o aumento da concentração de Al na solução nutritiva promoveu redução de Ca, Mg, P e Mn nas folhas e nas raízes de cafeeiro, não alterou a concentração do Fe e aumentou a de K. Outros autores, citados por FOY (1974), encontraram as mais variadas respostas na concentração de nutrientes em plantas cultivadas em presença de Al, que variaram principalmente devido ao meio de cultivo (solo ou solução nutritiva) e à espécie estudada. No presente trabalho, embora tenham ocorrido algumas variações na concentração de macro e micronutrientes na planta, em função da saturação de Al no solo, os teores internos mantiveram-se em níveis adequados, evidenciando que a correção e a fertilização da camada superficial do solo foram efetivas em suprir adequadamente a planta, permitindo o seu metabolismo normal.

Plantas de cafeeiro cultivadas em solo com a camada de 0-12 cm corrigida e sem restrição hídrica provavelmente não terão problemas nutricionais, independentemente do teor de Al encontrado no subsolo.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Conduziu-se um experimento em casa de vegetação, com o objetivo de avaliar as características de crescimento e a absorção de nutrientes por duas variedades de cafeeiros, sensível e tolerante ao alumínio (Al), em solo com calagem e fertilização na camada superficial e com diferentes doses de calcário na subsuperfície, correspondendo a níveis distintos de saturação de alumínio. Para isso, utilizaram-se as linhagens Catuaí 2147 (H 2077-2-5-99) e Icatu 4045 (47), sensível e tolerante ao alumínio, respectivamente. No ensaio (2 variedades x 7 níveis de saturação de Al), em quatro blocos, as plantas de cafeeiro foram cultivadas até 6,5 meses de idade, em solo, contido em coluna de PVC (de 20 cm de diâmetro) subdividida em três anéis. Utilizaram-se sete doses de calcário (0,0; 0,49; 1,71; 2,9; 4,2; 6,6 e 9,3 t/ha) nos dois anéis inferiores (12 a 34 cm de espessura), equivalentes a saturações de Al variando de 93 a 0%. Em todas as parcelas, o solo do anel superior (0 a 12 cm de espessura) recebeu calagem (8,8 t/ha; pH = 6,2; m = 0% e V = 48%) e adubação.

Por ocasião da colheita, a parte aérea foi dividida em folhas superiores, inferiores e caule, sendo avaliados o comprimento de caule, a área foliar e a produção de matéria seca da parte aérea. O sistema radicular foi dividido em raízes dos anéis superior, mediano e inferior, tendo sido estas separadas do solo por peneiramento, catação manual e lavagem com jatos de água.

Avaliaram-se os sintomas visuais de toxidez por Al tanto na parte aérea quanto nas raízes. Foram avaliados a produção de matéria seca, o comprimento e a superfície de raízes e calcularam-se as relações parte aérea/raízes. Analisaram-se os teores de Ca, Mg, P, K e Al, na parte aérea e nas raízes, e de Mn, Fe, Cu e Zn, na parte aérea; e calculou-se a eficiência de utilização de P e Ca na parte aérea e nas raízes.

Não foram observados sintomas de toxidez por Al na parte aérea, mas eles foram evidenciados nas raízes, caracterizados por redução do crescimento, engrossamento e escurecimento de raízes secundárias. No entanto, houve crescimento do sistema radicular nos anéis inferiores, em todas as doses de calcário aplicadas, para ambas as variedades.

O peso da matéria seca da parte aérea, a área foliar e o comprimento do caule das duas variedades não foram alterados com a aplicação do calcário ao solo, evidenciando que a correção da camada superficial possibilita o crescimento normal da parte aérea, mesmo sob alta saturação de Al na subsuperfície.

Níveis de saturação de Al de até 93%, nos dois anéis inferiores, não afetaram a quantidade da matéria seca total de raízes, mas alteraram a distribuição do sistema radicular em profundidade nas colunas de PVC, para ambas as variedades. Alta saturação de Al proporcionou menores percentuais de peso da matéria seca, comprimento e superfície de raízes nos anéis inferiores, que foram compensados por maiores percentuais no anel superior.

Os valores de comprimento total de raízes/matéria seca de raízes (cm/g) e de superfície total de raízes/matéria seca de raízes (cm²/g), da variedade Catuaí, aumentaram com a aplicação do calcário ao solo dos anéis inferiores, confirmando o aumento no comprimento e o aparecimento de raízes mais finas, observados visualmente.

O sistema radicular da variedade Icatu mostrou-se menos sensível à aplicação do calcário no solo, em relação às características de crescimento.

As plantas apresentaram maior teor de Al nas raízes que na parte aérea em todas as doses de calcário utilizadas. A aplicação do calcário na subsuperfície

do solo reduziu o teor de Al nas raízes da variedade Catuaí, mas esses teores foram maiores que os observados nas raízes da variedade Icatu, indicando diferenças entre as duas variedades quanto aos mecanismos de ajuste ao estresse por Al.

A eficiência de utilização de Ca decresceu para ambas as variedades, tanto na parte aérea quanto nas raízes, com a aplicação do calcário ao solo subsuperficial, enquanto a eficiência de utilização do P decresceu somente na parte aérea da variedade Icatu, concluindo-se que a maior tolerância desta variedade, quando cultivada em condições de alta saturação de Al, deve-se, entre outras, à sua maior eficiência de utilização de P.

Embora tenham ocorrido algumas variações nas concentrações de Ca, Mg, P, K, Mn, Zn, Cu e Fe na parte aérea e, ou, nas raízes com a aplicação do calcário subsuperficial, o teor na planta manteve-se na faixa normal, indicando que a adubação e a correção da acidez da camada superficial do solo foram eficientes para manter a adequada nutrição da planta.

Em condições de cultivo com uso de alta tecnologia (calagem, adubação e irrigação), o estresse por Al subsuperficial não traz prejuízos à cultura do cafeeiro até a idade de 6,5 meses.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ VENEGAS, V.H. Caracterização química de solos. Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, Viçosa, Minas Gerais, 1985. 77p.
- ANDERSON, M. Toxicity tolerance of aluminium in vascular plants. **Water, Air and Soil Pollution**, v.39, p.439-462, 1988.
- ANGHINONI, I., VOLKART, C.R., FATTORE, N. et al. Morfologia de raízes e cinética da absorção de nutrientes em diversas espécies e genótipos de plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.13, p.355-361, 1989.
- BARBER, S.A. Influence of the plant root on ion movement in soil. In: CARSON, E.W. **The plant root and its environment**. Charlottesville, Virginia, 1971. p.525-564.
- BARROS, N.F., NOVAIS, R.F. **Relação solo eucalipto**. Editora Folha de Viçosa, Viçosa, MG, 1990. 330p. Ilust.
- BATAGLIA, O.C., CAMARGO, C.E.O., OLIVEIRA, O.F. et al. Resposta à calagem de três cultivares de trigo com tolerância diferencial ao alumínio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.9, p.139-147, 1985.
- 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. **S. Afr. J. Plant Soil**, v.3, p.11-17, 1986.
- BÖHN, W. **Methods of studying root systems**. Springer-Verlag ed. Berlin, 1979, 188p.

- BOUDOT, J.P., BECQUER, T., MERLET, D. et al. Aluminium toxicity en declining forest: a general overview with a seasonal assessment in a silver fir forest in the VOSGES MOUNTAINS (France). **Ann. Sci. For.**, v.51, p.27-51, 1994.
- BRACCINI, M. DO C.L. **Comportamento de nove populações de café quanto à tolerância ao alumínio em solução nutritiva**. Viçosa, MG:UFV, 1995. 92p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.
- BRACCINI, M. DO C.L., MARTINEZ, H.E.P., PEREIRA, P.R.G. et al. **Aluminium tolerance of coffee populations**. In: IV International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH. Belo Horizonte, 1996. (resumo).
- BRAGA, J.M., DEFELIPO, B.V. Determinação espectrofotométrica do fósforo com extrato de solos e plantas. **R. Ceres**, v.21, p.73-85, 1974.
- CLARKSON, D.T. Effect of aluminum on growth and mineral elements of Al-tolerant and barley seedling. **Plant Physiol.**, v.41, p.165-172, 1966.
- 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. 179p.
- EPSTEIN, E. **Nutrição mineral de plantas, princípios e perspectivas**. Tradução e notas de E. Malavolta. São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, 1975. 341p.
- ESAU, K. **Anatomia das plantas com sementes**. Tradução: Berta Lange de Morretes. São Paulo, Editora Blücher, 1974. 293 p. Impressão de 1976.
- EUCLYDES, R. F. **Sistema para análise estatísticas e genéticas (SAEG) - manual provisório**. CPD/UFV, Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento, Viçosa, MG, 1983, 74p.
- FOY, C.D., CHANEY, R.L., WHITE, M.C.. The physiology of metal toxicity in plants. **Ann. Rev. Plant Physiol.**, v.29, p.511-66, 1978.
- FOY, D.C. Effects of aluminum on plant growth. In: CARSON, E.W. **The plant root and its environment**. Ed. E.W.Carson. University Press of Virginia, Charlottesville. p.601-642, 1974.
- FOY D. C., FLEMING, A.L., GERLOFF, G.C. Differential aluminium tolerance in two snapbean varieties. **Agron. J.**, v.61, p.815-818, 1972.

- FOY, C.D., FLEMING, A.L. The physiology of plant tolerance of excess available aluminum and manganese in acid soils. **Annals Society of Agronomy**, v.32, p.301-328, 1978.
- FOY, C.D. Physiological effects of hydrogen, aluminum and manganese toxicities in acid soils. **Agronomy Monogr.** v.12, p.57-97, 1984.
- FURLANI, P.R. **Efeitos fisiológicos do alumínio em plantas.** II SIMPÓSIO AVANÇADO DE SOLOS E NUTRIÇÃO DE PLANTAS. ESALQ-USP, Piracicaba, 73-92, outubro, 1989.
- GAHOONIA, T.S. Influence of root-induced pH on solubility of soil aluminium in the rhizosphere. **Plant and Soil**, v.149, p.289-291, 1993.
- GANJE, T.J., PAGE, A.L. Rapid dissolution of tissue for cadmium determination by atomic absorption spectrophotometry. **At. Absorp. News**, v.13, p.131-134, 1974.
- GLASS, A.D.M. **Plant nutrition. an introduction to current concepts.** Boston, Jones and Bartlett Publishers, 1989. 234 p.
- GUIMARÃES, P.T.G., LOPES, A.S. Solos para cafeeiro: característica, propriedades e manejo. In: RENA A. B., MALAVOLTA E., ROCHA M., YAMADA T. **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade.** Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Piracicaba, SP, 1986. p.115-156.
- HANSON, W.D. Roots characteristics associated with divergent selection for seedling aluminum tolerance in soybean. **Crop Science**, v.31, p.125-129, 1991.
- HUANG, J.W., SHAFF, J.E., GRUNES, D.L. et al. Aluminum effects on calcium fluxes at the root apex of aluminum-tolerant and aluminum-sensitive wheat cultivars. **Plant Physiol.**, v.98, p.230-237, 1992.
- HUDSON, M.J., EVANS, D.E. Aluminium/silicom interactions in higher plants. **Journal of Experimental Botany**, v.46, n.283, p.161-171, 1995.
- JACKSON, M.L. **Soil chemical analisys.** N.J. Prentice-Hall Inc. 1958. 498p.
- KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. **Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.**, v.46, p.237-260, 1995.
- KOLEK, J. e KOZINKA, V. **Physiology of the root system.** London, Kluwer Academic Publishers, 1992. 361p.

- LEMOS FILHO, J.P. **Efeito do alumínio sobre os teores de alguns elementos minerais , sobre a fotossíntese e sobre a atividade de certas oxidases em sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench).** Viçosa, MG:UFV, 1982. 46p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1982.
- LODOÑO, M.E.A, VALENCIA, A.G. Toxicidad de aluminio en plantas de café. **Cenicafé**, v.34, p.61-97, 1983.
- MALAVOLTA, E. **ABC da análise de solo e de folhas.** Agronômica Ceres, São Paulo, 1992, 124p.
- MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A. B., MALAVOLTA, E., ROCHA, M., YAMADA, T. (eds.). **Cultura do cafeeiro, fatores que afetam a produtividade.** Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Piracicaba, SP, p.165-274, 1986.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants.** Academic Press, 1995. 889p.
- MARSCHNER, H. Root-induced changes in the availability of micronutrients in the rhizosphere. In: WAISEL, Y., ESHEL, A., KAFKAFI, U. (eds.) **Plant roots - the hidden half.** New York. 1991. 503 - 528.
- MARTINEZ, H.E.P., MONNERAT, P.H. **Níveis crescentes de alumínio em duas variedades de café cultivadas em solução nutritiva.** Anais do XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 1991. (resumo).
- MATIELLO, J.B. **O café do cultivo ao consumo.** Editora Publicações Globo Rural, 1991.
- MOORE, D.P. Physiological effects of pH on roots. In: CARSON, E.W. (ed.) **The plant roots and its environment.** Charlottesville, University Press of Virginia. p.135-151. 1974.
- NOVAIS, R.F., FERREIRA, R.P., NEVES, J.C. et al. Absorção de fósforo e crescimento do milho. **Pesq. Agrop. Bras.**, v.20, p.749-754, 1985.
- PAVAN, M.A., BINGHAM, F.T. Níveis de alumínio em cafeeiros cultivados em solução nutritiva. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.17, n.9, p.1293-1302, 1982.
- PAVAN, M.A., BINGHAM, F.T., PRATT, P.F. Toxicity of aluminum to coffee in ultisols and oxisols amended with CaCO₃, MgCO₃ and CaSO₄.2H₂O. **Journal of Science Society of America**, v.46, p.1201-1207, 1982.

- PAVAN, M.A. Efeitos tóxicos do alumínio em mudas de cafeeiro em relação a nutrição do cálcio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.6, p.209-213, 1982.
- PREZOTTI, L.C., BRAGANÇA, S.M. Nutrição. COSTA, E.D., SILVA, A.E.S., ANDRADE NETO, A.P.M., DAHER, F.A. (eds.). **Manual técnico para a cultura do café no Estado do Espírito Santo**. SEAG-ES. Vitória, ES, p.42-53, 1995.
- RAIJ, B.V. **Fertilidade do solo e adubação**. Editora Agronômica Ceres Ltda e Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo. Campinas, SP, 1991. 343 p.
- RAJU, P.S., CLARCK, R.B., MAITI, R.K. et al. Phosphorus uptake, distribution and use by glossy and nonglossy sorghum. **J. Plant Nutr.**, v.10, p.2017-2024, 1987.
- RENA, A.B., MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. RENA, A.B., MALAVOLTA, E., ROCHA, M., YAMADA, T. (eds.) **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fósforo. Piracicaba, SP, p.13-85, 1986.
- RENGEL, Z., PINEROS, M., TESTER, M.. Transmembrane calcium fluxes during Al stress. **Plant and Soil**, v.171, p.125-130, 1995.
- RENGEL, Z. Role of calcium in aluminium toxicity. **New Phytology**, v.121, p.499-513, 1992.
- RHEINHEIMER, D.S. PETRY, C., KAMINSKI, J. et al. Influência do estresse de alumínio em plantas de fumo: I. Efeitos no sistema radicular, na absorção de fósforo e cálcio e no acúmulo de massa seca. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.18, p.63-68, 1994.
- ROY, A.K., SHARMA, A. TALUKDER, G.. Some aspects of aluminum toxicity in plants. **The Botanical Review**, v.54, p.145-178, 1988.
- RUSSEL, S.R. **Plant root systems: their function and interaction with the soil**. London, McGraw-Hill, 1977. 298p.
- SARRUGE, J.R., HAAG, H.P. **Análises químicas em plantas**. E.S.A. “Luiz de Queiróz”, USP, Piracicaba, São Paulo, 1974. 57p.
- SILVA, A.E.S. COSTA, E.B. Importância econômica e social. COSTA, E.B., SILVA, A.E.S., ANDRADE NETO, A.P.M., DAHER, F. A. (eds.). **Manual técnico para a cultura do café no estado do Espírito Santo**. SEAG, Vitória, ES. p.9-10, 1995.

- SILVA, D.J., ALVARENGA, R.C., ALVAREZ, V. et al. Localização de fósforo e de cálcio no solo e seus efeitos sobre o desenvolvimento inicial do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, p.203-209, 1993.
- SILVA, J.B.C., NOVAIS, R.F., SEDIYAMA, C.S. Comportamento de genótipos de soja em solo com alta saturação de alumínio. **Pesq. Agropec. Bras.**, v.19, n.3, p.287-298, 1984a.
- SILVA, J.B.C., NOVAIS, R.F., SEDIYAMA, C.S. Identificação de genótipos de sorgo tolerantes à toxicidade de alumínio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.8, p.77-83, 1984b.
- SILVA, J.B.C. **Seleção de genótipos de sorgo (*Sorghum bicolor* (L) Moench) e de soja (*Glycine max* (L) Merrill) tolerantes à toxidez de alumínio.** Viçosa, MG:UFV, 1983. 55p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1983.
- SLASKI, J.J. NAD⁺ kinase activity in root tips of nearly isogenic lines of wheat (*Triticum aestivum* L.) that differ in their tolerance to aluminium. **J. Plant Physiol.**, v.145, p.143-147, 1995.
- SOUSA, D.M.G., MIRANDA, L.N., LOBATO, E. et al. Métodos para determinar as necessidades de calagem em solos dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.13, p.193-198, 1989.
- STRYKER, R.B., GILLIAM, J.W., JACKSON, W.A. Nonuniform phosphorus distribution in the root zone of corn, growth and phosphorus uptake. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, v.38, p.334-340, 1974.
- TAYLOR, G.J. Current views of the aluminum stress response: the physiological basis of tolerance. **Current Topics in Plant Biochemistry and Physiology**, v.10, p.57-93, 1991.
- TAYLOR, G. J., The physiology of aluminum tolerance in higher plants. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, v.19, p.1179-1194, 1988.
- TENNANT, D. A test of a modified line intersect method of estimating root length. **J. Applied Ecol.**, v.63, p.995-1001, 1975.
- VALE, F.R., NOVAIS, R.F., BARROS, N.F. et al. Absorção de nitrato de amônio por raízes intactas de milho pré tratadas com alumínio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.8, p.215-218. 1984.

VETTORI, L. **Métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, Ministério da agricultura, Equipe pedológica e Fertilidade do solo, 1969 24p. (Boletim técnico)

VIANA, A.S, GARCIA, A.W.R. **Estudo sobre calagem complementar em cafezal, em solo LED fase cerrado, em áreas com seis níveis de calagem calcítica**. In: 14^o. CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS E CONGRESSO LATINO AMERICANO DE TECNOLOGIA CAFEIRA. Campinas, SP, 1987.

WAGATSUNAGA, T. Characteristics of upward translocation of aluminum in plants. **Soil Sci. Plant Nutr.**, v.30, p.345-358, 1984.

WRIGHT, R.J. Soil aluminum toxicity and plant growth. **Commun. In. Soil Sci. Plant Anal**, v.20, p.1479-1497, 1989.

APÊNDICE

Quadro 1A - Valores médios da análise do solo após a colheita de duas variedades de cafeeiro cultivadas em sete doses de calcário (t/ha), na subsuperfície do solo. m - saturação de alumínio (%), Ac. troc. - acidez trocável (c mol c/dm³) e SB - soma de bases (c mol c/dm³)

	Doses de Calcário	ICATU			CATUAÍ		
		A. Sup.	A. Med.	A. Inf.	A. Sup.	A. Med.	A. Inf.
pH (água)	0,0	5,4	4,1	3,9	5,5	4,1	3,9
	0,49	5,5	4,1	3,8	5,5	4,3	4,0
	1,71	5,5	4,6	4,4	5,5	4,5	4,3
	2,9	5,6	4,6	4,5	5,6	4,8	4,6
	4,1	5,6	4,9	4,8	5,6	5,0	4,7
	6,6	5,5	5,3	5,1	5,6	5,2	5,1
	9,8	5,5	5,5	5,4	5,4	5,6	5,5
m (%)	0,0	0,00	65,32	79,36	0,00	68,19	79,81
	0,49	1,27	59,07	68,05	0,00	60,20	63,06
	1,71	0,00	37,49	41,46	1,20	37,57	39,66
	2,9	1,22	19,87	20,38	1,10	22,73	25,24
	4,1	1,20	9,74	9,40	0,00	9,80	6,10
	6,6	0,00	1,50	1,44	0,00	1,63	1,53
	9,8	0,00	1,20	0,00	0,00	0,00	0,00
Al. troc.	0,0	0,0	2,6	2,9	0,0	2,5	2,8
	0,49	0,1	2,3	2,6	0,0	2,2	2,5
	1,71	0,0	1,5	1,6	0,01	1,4	1,5
	2,9	0,1	0,9	0,9	0,1	0,8	1,0
	4,1	0,1	0,5	0,5	0,0	0,5	0,5
	6,6	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1
	9,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SB	0,0	7,5	1,4	0,8	7,8	1,2	0,7
	0,49	7,8	1,6	1,2	7,8	1,4	1,5
	1,71	7,7	2,5	2,3	7,6	2,3	2,3
	2,9	8,1	3,6	3,6	7,3	2,7	3,1
	4,1	8,2	4,4	4,8	7,3	4,1	7,3
	6,6	8,0	6,5	6,9	7,9	6,0	6,5
	9,8	7,4	8,3	8,9	8,2	6,9	7,8

$$V - Y = 6,92 + 7,03^{**}X$$

$$R^2 = 0,98$$

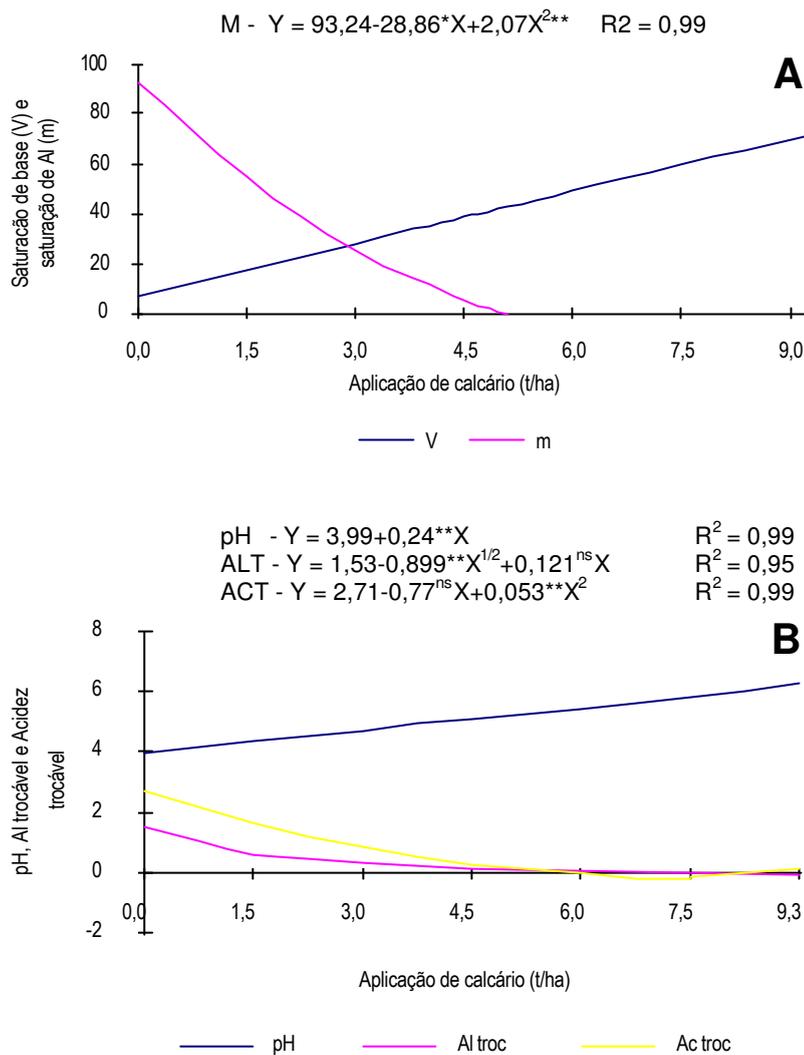


Figura 1A - Análise do solo dos anéis inferiores antes do plantio, em função da aplicação de calcário ao solo. A - V = saturação de bases e m = saturação de alumínio (%); B - pH (em água), ALT - alumínio trocável, extração em KCl 1N (método aluminona) (cmol c/dm³), ACT - acidez trocável, extração em KCl 1N (cmol c/dm³).

Quadro 2A - Resumo das análises de variância dos resultados da análise do solo subsuperficial submetido a sete doses de calcário. ph - acidez ativa, m - saturação de alumínio (%), V - saturação de bases, ACT - acidez trocável (Extração KCl 1N, titulometria)

(cmol c/dm^3), AIT - alumínio trocável (Extração KCl 1N, espectrofotometria) (cmol c/dm^3)

Fontes de variação	G.L.	Quadrado Médio				
		pH - água	m	V	ACT	AIT
Bloco	3	0,006775ns	6,3675ns	4,1479*	0,20952ns	0,00308ns
Aplicação de calcário	6	2,69410**	6129,696**	2360,162**	4,8678**	1,3774**
Resíduo	18	0,00275	8,41102	0,84901	0,03595	0,001109
C.V. (%)		1,1	7,9	2,9	16,8	6,6

Significativo a 1 (**) e 5% (*) de probabilidade e ns - não-significativo pelo teste de F.

Quadro 3A - Resumo das análises de variância das variáveis de crescimento das raízes, avaliadas em duas variedades de cafeeiro submetidas a sete doses de calcário no solo subsuperficial. MSRS - matéria seca de raízes no anel superior; MSRI - matéria seca de raízes no anel inferior; MSRT - matéria seca de raízes total; CRS - comprimento de raízes no anel superior; CRI - comprimento de raízes no anel inferior; CRT - comprimento total das raízes; SRS - superfície de raízes no anel superior, SRI - superfície de raízes no anel inferior; SRT - superfície total das raízes

Fontes de variação	GL.	QUADRADO MÉDIO								
		MSRS	MSRI	MSRT	CRS	CRI	CTR	SRS	SRI	SRT
Bloco	3	163911,5**	201266,6**	727165,8**	3486995,0**	6733460,0**	19881880,0**	30129,0**	79580,3**	206263,0**
Aplicação de calcário (T)	6	50869,5*	11397,4ns	53153,64ns	1392427,0**	2994097,0**	2019813,0ns	25396,4**	25912,6*	28569,6ns
Variedade (V)	1	1445,4ns	645430,6**	585790,6**	440121,4ns	6677198,0**	10545890,0**	3291,6ns	167586,2**	217851,2**
Interação T x V	6	3065,0ns	16412,2ns	29391,5ns	524195,5ns	772047,2ns	2168183,0ns	4805,0ns	8162,6ns	22792,4ns
Resíduo	39	16602,3	18626,2	65820,0	258083,0	723850,6	1243862,0	3872,3	9561,2	21184,5
C.V. (%)		18,0	26,5	20,8	20,6	32,3	21,9	18,6	26,7	20,8

Significativo a 1 (**) e 5% (*) de probabilidade e ns - não-significativo pelo teste de F.

Quadro 4A - Resumo das análises de variância da distribuição percentual das raízes nos vasos de PVC e das relações comprimento e superfície de raízes por matéria seca de raízes, avaliadas em duas variedades de cafeeiro submetidas a sete doses de calcário no solo subsuperficial. PMSRS - porcentagem de matéria seca de raízes no anel superior; PCRS - porcentagem de comprimento de raízes no anel superior; PSRS - superfície de raízes no anel superior; CRS/MS - relação comprimento de raízes no anel superior/matéria seca de raízes no anel superior; CRI/MS - relação comprimento de raízes no anel inferior/matéria seca de raízes no anel inferior; CRT/MS - relação comprimento de raízes total/matéria seca de raízes no anel total; SRS/MS - relação superfície de raízes no anel superior/matéria seca de raízes no anel superior; SRI/MS - relação superfície de raízes no anel inferior/matéria seca de raízes no anel inferior; SRT/MS - relação superfície de raízes total/matéria seca de raízes no anel total

Fontes de variação	GL.	QUADRADO MÉDIO								
		PMSRS	PCRS	PSRS	CRS/MS	CRI/MS	CRT/MS	SRS/MS	SRI/MS	SRT/MS
Bloco	3	70,422**	34,188ns	61,607ns	1009244,0ns	1332085,0ns	1448007,0*	4041,49ns	13724,0ns	4842,51ns
Aplicação de calcário (T)	6	111,24**	685,58**	405,991**	582137,6ns	7847806,0**	1592743,0**	8019,16ns	52448,58*	11571,4ns
Variedade (V)	1	1661,17**	386,13**	677,103**	888743,1ns	9660146,0*	6356,3ns	10132,19ns	116562,7*	1444,42ns
Interação T x V	6	17,587ns	38,050ns	11,208ns	1206244,0*	6679370,0**	2221647,0**	10954,88*	94641,4**	26646,2**
Resíduo	39	13,909	48,382	24,283	472877,2	1423640,0	465712,6	3888,74	20964,77	5734,03
C.V. (%)		6,3	14,0	10,13	19,96	22,8	16,4	13,3	19,8	13,2

Significativo a 1 (**), 5% (*) de probabilidade e ns - não-significativo pelo teste de F.

Quadro 5A - Resumo das análises de variância das variáveis de crescimento da parte aérea, avaliadas em duas variedades de cafeeiro submetidas a sete doses de calcário, no solo subsuperficial. AF - área foliar; CC - comprimento de caule; SPA - matéria seca da parte aérea; A/MSR - relação matéria seca da parte aérea por matéria seca de raízes (g/g); CR/PA - relação comprimento de raízes por matéria seca de raízes (cm/g); SR/PA - relação superfície de raízes por matéria seca de parte aérea (cm²/g)

Fontes de variação	G.L.	QUADRADO MÉDIO					
		AF	CC	MSPA	PA/MSR	CR/PA	SR/PA
Bloco	3	132447,9**	128,338**	9,335**	0,5192ns	106330,4**	247,199ns
Aplicação de calcário (T)	6	2639,84ns	15,554ns	0,2405ns	0,3484ns	60126,98**	663,808ns
Variedade (V)	1	319859,10**	1656,81**	6,864**	0,7425ns	28977,36ns	801,599ns
Interação T x V	6	1231,486ns	3,094ns	0,269ns	0,1596ns	77880,59**	847,395*
Resíduo	39	7578,72	17,199	0,5572	0,3465	17531,36	290,2264
C.V. (%)		8,9	10,4	13,2	12,45	14,9	13,9

Significativo a 1 (**) e 5% (*) de probabilidade e ns - não-significativo pelo teste de F.

Quadro 6A - Resumo das análises de variância da eficiência de utilização de P e Ca nas raízes e na parte aérea de duas variedades de cafeeiro submetidas a sete doses de calcário, no solo subsuperficial. EUPR - eficiência de utilização de P nas raízes; EUPPA - eficiência de utilização de P na parte aérea; EUCaR - eficiência de utilização de Ca nas raízes; EUCaPA - eficiência de utilização de Ca na parte aérea.

Fontes de variação	G.L.	QUADRADO MÉDIO			
		EUPR	EUPPA	EUCaR	EUCaPA
Bloco	3	895651,50**	4920321,0**	9954,80**	82506,77**
Aplicação de calcário (T)	6	75164,01ns	739557,80ns	10266,87**	23807,88**
Variedade (V)	1	787276,30**	261975,40ns	16,0333ns	6907,08ns
Interação T x V	6	49497,01ns	81051,98ns	937,85ns	2853,42ns
Resíduo	39	104910,3	404034,5	1490,74	6151,38
C.V. (%)		27,6	20,5	22,4	17,6

Significativo a 1 (**) e 5% (*) de probabilidade e ns - não-significativo pelo teste de F.

Quadro 7A - Resumo das análises de variância das concentrações de nutrientes nas raízes de duas variedades de cafeeiro submetidas a sete doses de calcário, no solo subsuperficial. Al R - concentração de alumínio nas raízes; Al S, Al M e Al I - concentração de alumínio nas raízes dos anéis superior, mediano e inferior; P S, P M e PI - concentração de fósforo nas raízes dos anéis superior, mediano e inferior; K S, K M e K I - concentração de potássio nas raízes dos anéis superior, mediano e inferior

Fontes de variação	GL.	QUADRADO MÉDIO									
		Al R	Al S	Al M	Al I	P S	P M	P I	K S	K M	K I
Bloco	3	2049365,0*	1554421,0*	12185520,0**	7273207,0ns	0,00197ns	0,00104ns	0,00066ns	0,7523**	1,478**	1,377**
Aplicação de calcário (T)	6	665438,1ns	820910,0ns	14740330,0**	4962927,0ns	0,00074ns	0,00137*	0,00063*	0,1891ns	0,224ns	2,153**
Variedade (V)	1	4941299,0**	176419,0ns	3231588,0*	1675550,0ns	0,00297ns	0,00026ns	0,00062ns	0,0410ns	0,185ns	1,238*
Interação T x V	6	524541,2ns	686392,0ns	2857801,0 ns	2944153,0ns	0,00031ns	0,00074ns	0,00006ns	0,2077ns	0,126ns	0,062ns
Resíduo	39	520540,4	4689943,2	28371440,0	52628370,0	0,00084	0,00046	0,00024	0,14034	0,1144	0,2254
C.V. (%)		20,8	26,4	21,4	28,0	21,0	12,0	10,5	17,9	12,5	25,6

Significativo a 1 (**) e 5% (*) de probabilidade e ns - não-significativo pelo teste de F.

Quadro 8A - Resumo das análises de variância das concentrações de nutrientes nas raízes de duas variedades de cafeeiro submetidas a sete doses de calcário, no solo subsuperficial. Ca S, Ca M e Ca I - concentração de cálcio nas raízes dos anéis superior, mediano e inferior; Mg S, Mg M e Mg I - concentração de magnésio nas raízes dos anéis superior, mediano e inferior

Fontes de variação	G.L.	QUADRADO MÉDIO					
		Ca S	Ca M	Ca I	Mg S	Mg M	Mg I
Bloco	3	0,0193ns	0,0626ns	0,415*	0,0134ns	0,0311ns	0,1234ns
Aplicação de calcário (T)	6	0,03521*	0,2920**	1,606**	0,0329**	0,2022**	0,8823**
Variedade (V)	1	0,1241**	0,0568ns	0,945**	0,0076ns	0,0783*	0,000001ns
Interação T x V	6	0,01395ns	0,0357ns	0,059ns	0,0117ns	0,0117ns	0,0138ns
Resíduo	39	0,01382ns	0,0452	0,1121	0,00854	0,01381	0,04517
C.V. (%)		20,3	25,0	19,6	22,5	14,2	15,4

Significativo a 1 (**) e 5% (*) de probabilidade e ns - não-significativo pelo teste de F.

Quadro 9A - Resumo das análises de variância das concentrações de nutrientes na parte aérea de duas variedades de cafeeiro submetidas a sete doses de calcário, no solo subsuperficial. Al PA - concentração de Al na parte aérea; Al S, Al I e Al C - concentração de alumínio em folhas superiores, folhas inferiores e caules; P S, P I e P C - concentração de fósforo em folhas superiores, folhas inferiores e caules; K S, K I e K C - concentração de potássio em folhas superiores, folhas inferiores e caules

Fontes de variação	G.L	QUADRADO MÉDIO									
		Al PA	Al S	Al I	Al C	P S	P I	P C	K S	K I	K C
Bloco	3	19455,2**	19486,4**	16052,5**	24009,0**	0,0035**	0,0066**	0,00073*	0,327*	0,210*	0,137*
Aplicação de calcário (T)	6	739,3ns	1722,2ns	1989,8ns	868,2ns	0,0021**	0,0024ns	0,00011ns	0,145ns	0,152ns	0,0227ns
Variedade (V)	1	0,863ns	605,7ns	255,5ns	4738,6ns	0,000008ns	0,0080*	0,00064ns	2,409**	0,576**	0,455**
Interação T x V	6	624,54ns	1708,9ns	620,8ns	660,4ns	0,000047ns	0,0013ns	0,00026ns	0,113ns	0,079ns	0,068ns
Resíduo	39	937,17	1897,8	1738,9	1298,8	0,00040	0,00131	0,00017	0,1023	0,0657	0,0412
C.V. (%)		16,7	24,3	21,3	19,9	9,4	17,4	12,7	10,2	8,0	9,5

Significativo a 1 (**) ou 5% (*) de probabilidade e ns - não-significativo pelo teste de F.

Quadro 10A - Resumo das análises de variância das concentrações de nutrientes na parte aérea de duas variedades de café submetidas a sete doses de calcário, no solo subsuperficial. Ca S, Ca I e Ca C - concentração de cálcio em folhas superiores, folhas inferiores e caules; Mg S, Mg I e Mg C - concentração de magnésio em folhas superiores, folhas inferiores e caules

Fontes de variação	G.L.	QUADRADO MÉDIO					
		Ca S	Ca I	Ca C	Mg S	Mg I	Mg C
Bloco	3	0,0096ns	0,02047ns	0,0277*	0,00444ns	0,00757**	0,00306ns
Aplicação de calcário (T)	6	0,2434**	0,09261*	0,0314*	0,01266**	0,0157**	0,00405*
Variedade (V)	1	0,3459**	0,20997**	0,2886**	0,00223ns	0,0144**	0,0982**
Interação T x V	6	0,0125ns	0,00799ns	0,01506ns	0,00265ns	0,00378*	0,00113ns
Resíduo	39	0,02011	0,02858	0,00964	0,001583	0,00161	0,001627
C.V. (%)		10,4	8,6	19,6	9,4	13,3	20,2

Significativo a 1 (**) e 5% (*) de probabilidade e ns - não-significativo pelo teste de F.

Quadro 11A - Resumo das análises de variância das concentrações de micronutrientes na parte aérea de duas variedades de cafeeiro submetidas a sete doses de calcário, no solo subsuperficial. Mn S, Mn I e Mn C - concentração de manganês em folhas superiores, folhas inferiores e caules; Fe S, Fe I e Fe C - concentração de ferro em folhas superiores, folhas inferiores e caules; Zn S, Zn I e Zn C - concentração de zinco em folhas superiores, folhas inferiores e caules; Cu S, Cu I, Cu C - concentração de cobre em folhas superiores, folhas inferiores e caules

Fontes de variação	G.L.	QUADRADO MÉDIO											
		Mn S	Mn I	Mn C	Fe S	Fe I	Fe C	Zn S	Zn I	Zn C	Cu S	Cu I	Cu C
Bloco	3	4157,7**	11283,8**	141,78ns	538,576ns	14528,57*	855,77ns	9,973*	8,8344ns	68,777*	7,229*	0,9037ns	56,745**
Aplicação de calcário (T)	6	251,48ns	1395,31ns	166,40ns	205,39ns	813,37ns	1821,32**	4,297*	2,9225ns	72,50**	3,046ns	1,675ns	15,603ns
Variedade (V)	1	1685,21ns	19620,06*	455,71*	480,28ns	1208,54ns	927,47ns	2,658ns	2,1216ns	12,78ns	0,0179ns	0,9129ns	4,686ns
Interação T x V	6	240,36ns	929,94ns	2,6301ns	127,52ns	130,824ns	378,66ns	0,627ns	5,4220ns	2,177ns	0,9269ns	0,729ns	4,027ns
Resíduo	39	575,54	2281,97	71,536	209,371	410,904	377,592	1,3299	3,8939	19,0679	1,7905	0,8566	8,0847
C.V. (%)		21,1	28,4	25,3	15,1	12,6	21,3	11,2	31,3	30,6	17,0	29,27	30,0

Significativo a 1 (**) ou 5% (*) de probabilidade e ns - não-significativo pelo teste de F.