



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbccs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Brasil

Mattiello, Edson Marcio; Pereira, Marcos Gervasio; Zonta, Everaldo; Mauri, Jocimar; Matiello, José
Dioenis; Meireles, Paulo Geovane; Silva, Ivo Ribeiro da
PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA, CRESCIMENTO RADICULAR E ABSORÇÃO DE CÁLCIO,
FÓSFORO E ALUMÍNIO POR Coffea canephora E Coffea arabica SOB INFLUÊNCIA DA ATIVIDADE
DO ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 32, núm. 1, 2008, pp. 425-434

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180214230039>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica

Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

NOTA

PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA, CRESCIMENTO RADICULAR E ABSORÇÃO DE CÁLCIO, FÓSFORO E ALUMÍNIO POR *Coffea canephora* E *Coffea arabica* SOB INFLUÊNCIA DA ATIVIDADE DO ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO⁽¹⁾

Edson Marcio Mattiello⁽²⁾, Marcos Gervasio Pereira⁽³⁾, Everaldo Zonta⁽⁴⁾, Jocimar Mauri⁽⁵⁾, José Dioenis Matiello⁽⁶⁾, Paulo Geovane Meireles⁽⁷⁾ & Ivo Ribeiro da Silva⁽⁸⁾

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a produção de matéria seca, o crescimento radicular e a absorção e distribuição do Ca, P e Al nas folhas, no caule e nas raízes de dois clones de café conilon (*Coffea canephora*) (Mtl 25 e Mtl 27) e de uma variedade de café Catuaí Amarelo (*Coffea arabica*), cultivados em solução nutritiva com atividade crescente de Al³⁺. As plantas foram cultivadas em vasos com capacidade para 5 L, contendo solução nutritiva de Hoagland & Arnon, modificada. Após oito dias de adaptação, as plantas foram submetidas a concentrações de Al de 0, 500, 1.000 e 2.000 µmol L⁻¹, que corresponderam a atividades de Al³⁺ em solução, estimadas pelo software GEOCHEM, de 20,68, 50,59, 132,9 e 330,4 µmol L⁻¹, respectivamente. Foram determinados os teores de Ca, Al e P na planta. O sistema radicular foi separado, para determinação da área e do comprimento. A variedade Catuaí Amarelo (*Coffea arabica*) apresentou-se menos sensível ao Al³⁺, quando comparada aos clones de conilon (*Coffea canephora*). O clone de conilon Mtl 25 foi menos sensível ao Al³⁺ em relação ao Mtl 27. O aumento da atividade de Al³⁺ promoveu redução nos teores de P e Ca nas folhas e raízes do

⁽¹⁾ Recebido para publicação em novembro de 2006 e aprovado em outubro de 2007.

⁽²⁾ Doutorando do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa – UFV. CEP 36571-000 Viçosa (MG). E-mail: mattielloem@yahoo.com.br

⁽³⁾ Professor Associado do Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ. BR 465, km 7 CEP 23890-000 Seropédica (RJ). Bolsista do CNPq. E-mail: gervasio@ufrj.br

⁽⁴⁾ Professor Adjunto do Departamento de Solos, UFRRJ. E-mail: ezonta@ufrj.br

⁽⁵⁾ Mestrando do Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa – UFV. CEP 36571-000 Viçosa (MG). E-mail: jocimarmauri@yahoo.com.br

⁽⁶⁾ Mestrando do Departamento de Biologia Animal, UFV. E-mail: diou2005@yahoo.com.br

⁽⁷⁾ Estudante de Agronomia da UFRRJ. E-mail: meirelespg@yahoo.com.br

cafeeiro, especialmente nos clones Mtl 25 e Mtl 27. O acúmulo de Al no sistema radicular e a restrição do transporte para a parte aérea são importantes fatores na tolerância de plantas ao Al³⁺.

Termos de indexação: toxidez por alumínio, nutrição mineral, café.

SUMMARY: DRY MATTER PRODUCTION, ROOT GROWTH AND CALCIUM, PHOSPHORUS AND ALUMINUM ABSORPTION BY Coffea canephora AND Coffea arabica UNDER INFLUENCE OF ALUMINUM ACTIVITY IN SOLUTION

This study had the objective of evaluating the dry matter production, root growth, and the absorption and distribution of Ca, P and Al in the leaves, stem and roots of two Conilon (Coffea canephora) coffee clones (Mtl 25 and Mtl 27) and the coffee variety Catuaí Amarelo (Coffea arabica) grown in nutrient solution with increasing Al³⁺ activity. The plants were cultivated in 5 L pots, containing modified Hoagland & Arnold nutrient solution. After eight days of adaptation, the plants were subjected to Al concentrations of 0, 500, 1.000 and 2.000 mol L⁻¹, which corresponded to Al³⁺ activities of 20.68, 50.59, 132.9, and 330.4 mmol L⁻¹, respectively in solution, estimated by the program GEOCHEM. The Ca, Al and P contents were quantified. The root system was separated to estimate area and length. The variety Catuaí Amarelo (Arabic Coffea) was less Al³⁺ sensitive than the Conilon (Coffea canephora) clones and Conilon Mtl 25 clone was less Al³⁺ sensitive than Mtl 27. A higher Al³⁺ activity resulted in a reduction of the P and Ca content in the coffee leaves and roots, especially in the clones Mtl 25 and Mtl 27. Al accumulation in the root system and the restriction of the transport to the aerial part are important factors in Al³⁺ tolerance of coffee plants.

Index terms: aluminum toxicity, coffee, mineral nutrition.

INTRODUÇÃO

O Al é o metal mais abundante e o terceiro elemento mais comum na crosta terrestre. Em solos de pH levemente ácido ou neutro, o Al está, essencialmente, na forma de óxidos ou aluminos-silicatos. Entretanto, quando os solos se tornam mais ácidos, formas fitotóxicas de Al, principalmente Al³⁺, são liberadas na solução do solo em concentrações que podem afetar o crescimento da planta (Kochian, 1995).

O Al acumula-se preferencialmente no sistema radicular das plantas, retardando seu crescimento e desenvolvimento, aumentando o diâmetro das raízes e promovendo a diminuição do número de raízes laterais, as principais responsáveis pela absorção de água e nutrientes. Resultados de pesquisas têm demonstrado que Al³⁺ no meio de crescimento influencia a absorção de elementos essenciais, como P, Ca e Mg (López-Bucio et al., 2000). Pavan & Bingham (1982) observaram redução na absorção de Ca, Mg e P e aumento na absorção de K em cafeeiros cultivados em solução nutritiva, na presença de Al. Esse fato pode se constituir em fator limitante à produtividade do cafeiro, visto que as principais regiões produtoras de café no Brasil estão localizadas

por bases e teores elevados de Al³⁺, suficientes para alterar o crescimento normal de muitas espécies de plantas cultivadas.

O Ca²⁺ tem papel central na regulação de muitos processos celulares em plantas, incluindo mitose e citocinese, sinalização celular, gravitropismo, crescimento polar e correntes citoplasmáticas (Huang et al., 1996). A inibição do influxo de Ca²⁺ para o interior da célula pelo Al³⁺ é rápida e reversível. Os canais de Ca²⁺, na membrana plasmática de células da raiz, são muito sensíveis ao Al. Esse bloqueio pode estar envolvido na toxidez por Al em plantas, pois pode contribuir para o distúrbio da homeostase intracelular do Ca²⁺ (Silva et al., 2002; Rengel & Zhang, 2003; Kochian et al., 2004).

Trabalhos pioneiros já ressaltavam a influência do Al na absorção, transporte e utilização do P (Clarkson, 1967; Bolland, 1983; Foy, 1983). A tolerância ao Al parece estar relacionada com a capacidade de uso eficiente do P, na presença de consideráveis concentrações de Al nos tecidos (Gaume et al., 2001; Zhu et al., 2002; Zheng et al., 2005). Tal fato seria possível se o Al fosse complexado com ácidos orgânicos, não interferindo assim no metabolismo do

estudos com cultivar de sorgo tolerante ao Al. Gaume et al. (2001) propuseram que a resistência ao Al pelo milho estava associada à imobilização do Al pelo P nos tecidos das raízes.

As plantas apresentam comportamento diferenciado na presença de Al. Essa distinção é observada tanto entre plantas de espécies diferentes como entre variedades de uma mesma espécie (Matsumoto, 2000; Ryan & Delhaize, 2001; Ma et al., 2002; Kochian et al., 2004; Yang et al., 2005). O problema da toxicidade por Al^{3+} é particularmente importante em camadas subsuperficiais do solo, pela dificuldade de aplicação profunda da calagem. Uma alternativa para minimizar esse problema, portanto, seria a utilização de espécies e cultivares de plantas tolerantes ao Al^{3+} , elevando-se, dessa forma, a eficiência produtiva das culturas em regiões com limitações por acidez.

Assim, neste trabalho objetivou-se avaliar a produção de matéria seca, o crescimento radicular, a absorção e distribuição do Ca, P e Al nas folhas, no caule e nas raízes de dois clones de café conilon (*Coffea canephora*) e de uma variedade de café Catuaí Amarelo (*Coffea arabica*), cultivados em solução nutritiva, com atividade crescente de Al^{3+} .

MATERIAL E MÉTODOS

O ensaio foi realizado em casa de vegetação, utilizando-se mudas de dois clones (Mtl 25 e Mtl 27) de *Coffea canephora*, obtidas via propagação vegetativa, e mudas da variedade Catuaí Amarelo (*Coffea arabica*), propagadas via sementes. As plantas foram cultivadas em vasos com capacidade para 5 L, contendo solução nutritiva de Hoagland & Arnon, modificada com as seguintes concentrações: macronutrientes (mmol L^{-1}): N: 8,26, K: 3,0, P: 0,5, Ca: 1,99, Mg: 0,98 e S: 1,03; e micronutrientes ($\mu\text{mol L}^{-1}$): B: 22,9, Cu: 0,14, Fe-EDTA: 446, Mn: 6,29, Zn: 0,65 e Mo: 0,05. Após oito dias de adaptação, as plantas foram submetidas a concentrações de Al de: 0, 500, 1.000 e 2.000 $\mu\text{mol L}^{-1}$, que corresponderam a atividades de Al^{3+} em solução, estimadas pelo software GEOCHEM, de: 20,68, 50,59, 132,9 e 330,4 $\mu\text{mol L}^{-1}$, respectivamente. O Al foi adicionado na forma de $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Para maximizar a atividade do Al^{3+} , as soluções foram mantidas a pH 4,0, com ajustes diários. As plantas foram mantidas sob arejamento intermitente, e as soluções nutritivas trocadas semanalmente.

O delineamento estatístico adotado foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 3 x 4, sendo três genótipos de cafeiro e quatro atividades de Al^{3+} , com três repetições.

Após período de 95 dias, as plantas foram coletadas

foi seco em estufa de circulação forçada de ar, pesado e moído. Após digestão nitroperclórica, foram determinados os teores de Ca e Al, por meio de espectrofotômetro de emissão óptica com plasma acoplado por indução (Perkin Elmer, modelo Optima 3300 DV), e de P, por colorimetria. O sistema radicular foi separado, para estimativa da área e do comprimento. Foi feita amostragem de 10% da massa fresca das raízes, para digitalização. Os eixos radiculares foram dispostos sobre folhas de acetato com auxílio de pinças, evitando-se ao máximo qualquer tipo de sobreposição. As imagens foram obtidas com auxílio de scanner de mesa (HP Scanjet), utilizando-se resolução de 100 dpi em fundo preto, de modo a obter o melhor contraste fundo e objeto. Foram quantificados a área e o comprimento radicular por meio de análise digital de imagens, com auxílio do software SIARCS 3.0 (Jorge & Crestana, 1996).

Os resultados foram submetidos à análise de variância, sendo os diferentes genótipos avaliados por meio de contrastes ortogonais. Considerando as atividades de Al^{3+} em solução nutritiva como variável independente, foram ajustadas equações de regressão para cada genótipo utilizado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As plantas cultivadas nas maiores atividades de Al³⁺ apresentaram sintomas característicos de toxicidade por Al, como retardamento do crescimento radicular e de parte aérea, redução do número de raízes laterais e maior diâmetro dos eixos radiculares. As raízes também apresentaram maior rigidez e aspecto de “arrepiamento”.

A variedade Catuaí Amarelo (*Coffea arabica*) apresentou maior produção de matéria seca e crescimento radicular, quando comparada ao conilon (*Coffea canephora*) (Quadro 1). Os clones do café conilon mostraram diferenças significativas na produção de matéria seca da parte aérea e da raiz, com o clone Mtl 25 apresentando a maior produção de matéria seca. No entanto, não foram observadas diferenças significativas no crescimento radicular entre os dois materiais genéticos.

A variedade Catuaí Amarelo, de modo geral, apresentou melhor desempenho das características relacionadas ao crescimento vegetativo, na presença de Al, quando comparada ao conilon. Resultados semelhantes foram encontrados por diversos autores (Bragança et al., 1985; Passo & Ruiz, 1995), os quais atribuíram maior tolerância ao Al^{3+} à variedade Catuaí Amarelo, quando comparada com o conilon. Esses resultados são contrários aos obtidos por Pavari & Bingham (1982), estudando *Coffea canephora*

Quadro 1. Valores médios da produção de matéria seca de parte aérea e raízes, da área e do comprimento radicular dos clones de café conilon (*Coffea canephora*) e do Catuaí Amarelo (*Coffea arabica*) considerando a atividade de Al³⁺ na solução nutritiva

Atividade de alumínio	<i>Coffea canephora</i>		<i>Coffea arabica</i>
	Mtl 25	Mtl 27	(Catuaí Amarelo)
μmol L ⁻¹ de Al ³⁺		Matéria seca de parte aérea (g/planta)	
20,68	9,13	5,61	10,58
50,59	10,48	6,10	10,76
132,9	5,15	4,35	10,57
330,4	3,46	3,24	6,00
Médias	7,06	4,83	9,48
CV (%)	24,51		
Conilon vs Catuaí ⁽¹⁾	7,07**		
Mtl 25 vs Mtl 27 ⁽²⁾	-2,23**		
		Matéria seca de raízes (g/planta)	
20,68	2,07	1,60	2,78
50,59	2,88	1,15	3,02
132,9	1,57	1,21	3,23
330,4	0,65	0,80	2,26
Médias	1,79	1,19	2,82
CV (%)	35,67		
Conilon vs Catuaí ⁽¹⁾	2,66**		
Mtl 25 vs Mtl 27 ⁽²⁾	-0,60**		
		Área radicular (cm ² /planta)	
20,68	392	320	584
50,59	527	247	612
132,9	238	220	750
330,4	83	108	401
Médias	310	224	587
CV (%)	41,05		
Conilon vs Catuaí ⁽¹⁾	639**		
Mtl 25 vs Mtl 27 ⁽²⁾	-86		
		Comprimento radicular (cm/planta))	
20,68	6.545	5.293	8.380
50,59	9.484	3.868	10.993
132,9	3.344	3.531	12.385
330,4	1.232	1.291	5.940
Médias	5.151	3.496	9.425
CV (%)	48,67		
Conilon vs Catuaí ⁽¹⁾	10.202**		
Mtl 25 vs Mtl 27 ⁽²⁾	-1.655		

⁽¹⁾ Contraste (-1-1+2). ⁽²⁾ Contraste (-1+1 0). **: Significativo a 1 % pelo teste F.

Um importante fator que pode ter contribuído para obtenção de resultados diferentes, em relação aos obtidos por Pavan & Bingham (1982), é a idade das plantas submetidas ao estresse por Al³⁺, principalmente no tocante à matéria seca inicial. Plantas com maior matéria seca podem ser menos afetadas pelo Al³⁺, devido à maior disponibilidade de carboidratos e

complexam Al³⁺, minimizando os efeitos deste elemento. No presente ensaio, apesar da tentativa de padronização e homogeneização das mudas utilizadas houve diferença no tipo de propagação para obtenção destas, o que levou a padrões diferenciados de crescimento do sistema radicular e da parte aérea. Assim, as mudas de café da variedade Catuaí Amarelo

avançada dos tecidos constituintes da raiz, quando comparadas àquelas dos clones de café conilon, propagados por estquiaia, sendo, portanto, menos sensíveis às condições iniciais de toxidez por Al.

A variedade Catuaí Amarelo apresentou, consistentemente, os maiores valores desses nutrientes no tecido vegetal (Quadro 2). A manutenção de teores adequados de Ca e P no tecido vegetal pode ter sido

Quadro 2. Teores médios de cálcio e fósforo nas folhas e raízes dos clones de café conilon (*Coffea canephora*) e do Catuaí Amarelo (*Coffea arabica*), considerando a atividade de Al³⁺ na solução nutritiva

Atividade de Al ³⁺	<i>Coffea canephora</i>		<i>Coffea arabica</i>
	Mtl 25	Mtl 27	(Catuaí Amarelo)
μmol L ⁻¹ de Al ³⁺			
20,68	0,28	0,26	0,49
50,59	0,24	0,20	0,49
132,9	0,14	0,21	0,42
330,4	0,18	0,08	0,22
Médias	0,21	0,18	0,41
CV (%)	8,66		
Conilon vs Catuaí ⁽¹⁾	0,42**		
Mtl 25 vs Mtl 27 ⁽²⁾	-0,024*		
P nas folhas (dag kg ⁻¹)			
20,68	0,47	0,44	0,74
50,59	0,67	0,72	0,66
132,9	0,44	0,47	0,67
330,4	0,48	0,41	0,51
Médias	0,51	0,51	0,65
CV (%)	10,95		
Conilon vs Catuaí ⁽¹⁾	0,27**		
Mtl 25 vs Mtl 27 ⁽²⁾	-0,0024		
P nas raízes (dag kg ⁻¹)			
20,68	0,47	0,44	0,74
50,59	0,67	0,72	0,66
132,9	0,44	0,47	0,67
330,4	0,48	0,41	0,51
Médias	0,51	0,51	0,65
CV (%)	10,95		
Conilon vs Catuaí ⁽¹⁾	0,27**		
Mtl 25 vs Mtl 27 ⁽²⁾	-0,0024		
Ca nas folhas (dag kg ⁻¹)			
20,68	0,58	0,74	0,73
50,59	0,67	0,76	0,97
132,9	0,62	0,65	0,87
330,4	0,40	0,52	0,75
Médias	0,57	0,67	0,83
CV (%)	12,62		
Conilon vs Catuaí ⁽¹⁾	0,42**		
Mtl 25 vs Mtl 27 ⁽²⁾	0,099*		
Ca nas raízes (dag kg ⁻¹)			
20,68	0,31	0,25	0,47
50,59	0,25	0,23	0,43
132,9	0,21	0,18	0,28
330,4	0,18	0,14	0,32
Médias	0,24	0,20	0,38
CV (%)	19,07		
Conilon vs Catuaí ⁽¹⁾	0,32*		
Mtl 25 vs Mtl 27 ⁽²⁾	-0,037*		

um importante diferencial no melhor desempenho do crescimento vegetativo, observado na variedade Catuaí Amarelo (Quadro 1).

Theodoro et al. (2003), revisando diferentes autores, observaram que os teores adequados de P em folhas de cafeeiro (arábica) podem variar de 1,2 a 2,2 g kg⁻¹, e os teores de Ca, de 7,5 a 15 g kg⁻¹. Valarini et al. (2005), estudando 12 cultivares de café arábica, em três diferentes épocas, encontraram valores médios de P de 1,2 g kg⁻¹, variando de 0,9 a 1,5 g kg⁻¹. Os teores

de médios de Ca foram de 16,3 g kg⁻¹, variando de 11,4 a 20,8 g kg⁻¹.

Os teores de Al são maiores nas raízes, seguidos por folhas e caules (Quadro 3). A variedade Catuaí Amarelo apresentou menores teores de Al na parte aérea (folhas e caules) e maiores nas raízes, quando comparada ao conilon.

A complexação de Al na raiz, evitando seu transporte à parte aérea da planta, pode ser um importante fator para a tolerância de plantas ao Al.

Quadro 3. Teores médios de alumínio nas folhas, caules e raízes dos clones de café conilon (*Coffea canephora*) e do Catuaí Amarelo (*Coffea arabica*), considerando a atividade de Al³⁺ na solução nutritiva

Atividade de Al ³⁺	<i>Coffea canephora</i>		<i>Coffea arabica</i>
	Mtl 25	Mtl 27	(Catuaí Amarelo)
μmol L ⁻¹ de Al ³⁺			
20,68	188,69	252,69	161,69
50,59	188,19	248,36	178,69
132,9	200,52	238,94	190,69
330,4	292,44	382,19	288,02
Médias	217,46	280,54	204,77
CV (%)	25,42		
Conilon vs Catuaí ⁽¹⁾	-88°		
Mtl 25 vs Mtl 27 ⁽²⁾	63**		
Al nas folhas (mg kg ⁻¹)			
20,68	52,04	51,04	41,27
50,59	51,79	166,91	92,69
132,9	129,80	176,33	135,86
330,4	379,25	522,41	164,19
Médias	153,22	229,17	108,50
CV (%)	37,64		
Conilon vs Catuaí ⁽¹⁾	-165**		
Mtl 25 vs Mtl 27 ⁽²⁾	76**		
Al nos caules (mg kg ⁻¹)			
20,68	389,02	382,69	1.184,69
50,59	1.671,36	1.888,44	3.279,69
132,9	2.118,06	2.011,36	4.911,36
330,4	4.384,16	2.921,78	8.244,69
Médias	2.140,65	1.801,07	4.405,11
CV (%)	38,29		
Conilon vs Catuaí ⁽¹⁾	4.868**		
Mtl 25 vs Mtl 27 ⁽²⁾	-339		
Al nas raízes (mg kg ⁻¹)			
20,68			
50,59			
132,9			
330,4			
Médias			
CV (%)			
Conilon vs Catuaí ⁽¹⁾			
Mtl 25 vs Mtl 27 ⁽²⁾			

pois a permanência do íon no sistema radicular pode evitar efeitos deletérios desse elemento em outros órgãos. Os resultados sugerem mecanismos internos de tolerância ao Al para a variedade Catuaí Amarelo. Diversos autores relatam, como mecanismos internos de tolerância, a complexação do Al no citossol por ligantes como ácidos orgânicos e proteínas, a compartimentalização no vacúolo e a existência de enzimas de tolerância ao Al (Rengel & Reid, 1997; Haug & Vitorelo, 1997; Kochian & Jones, 1997).

Foi observado, na variedade Catuaí Amarelo e no clone de conilon Mtl 25, incremento na produção de matéria seca e crescimento radicular em baixas concentrações de atividade de Al^{3+} na solução nutritiva. O clone Mtl 27 mostrou-se mais sensível à presença de Al, apresentando resposta negativa do crescimento vegetativo em atividades baixas de Al^{3+} em solução, exceto para produção de matéria seca de parte aérea.

Estímulos ao crescimento de plantas, quando cultivadas em meios com concentrações baixas e intermediárias de Al, são verificados com freqüência na literatura (Watanabe et al., 1997; Osaki et al., 1997). O efeito de atividades baixas a intermediárias do Al^{3+} no crescimento da variedade Catuaí Amarelo e do clone Mtl 25, possivelmente, está relacionado à minimização do efeito tóxico do H^+ devido a um deslocamento eletrostático pelo Al^{3+} na superfície da membrana plasmática (Kinraide, 2003). O Al tornou-se tóxico para as plantas de Catuaí Amarelo (*Coffea arabica*) a partir da atividade de $76 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al^{3+} . Para o clone Mtl 25 (*Coffea canephora*), a toxicidade ocorreu em valores superiores a $35 \mu\text{mol L}^{-1}$ de Al^{3+} . O clone Mtl 27, mais sensível, apresentou redução de matéria seca de raiz e do crescimento radicular na presença do Al.

O aumento da atividade de Al^{3+} na solução nutritiva reduziu os teores foliares de P nas duas espécies estudadas. A variedade Catuaí Amarelo apresentou redução nos teores de P nas raízes, enquanto nos clones de conilon houve aumento dos teores desse nutriente nas raízes, em baixas atividades de Al^{3+} , com posterior redução (Quadro 2).

Os teores de Ca, nas folhas da variedade Catuaí Amarelo e do clone Mtl 25, apresentaram aumento em baixas atividades de Al^{3+} e posterior redução, com o aumento da atividade do íon em solução. Para o clone Mtl 27 foi observada redução dos teores foliares de Ca com o aumento da atividade de Al^{3+} na solução nutritiva. Houve redução dos teores de Ca nas raízes das duas espécies estudadas com o aumento da atividade de Al^{3+} . A presença de Al pode ter reduzido a concentração de Ca no tecido, pelo fato de ambos os íons competirem pelo mesmo sítio do carregador ativo no processo de absorção, ocorrendo inibição competitiva do Al com o Ca (Malavolta et al., 1997).

A alteração na absorção e no transporte de P e Ca

O Al prejudica a absorção de P de duas formas: reduz o crescimento do sistema radicular (Foy, 1976) e liga-se ao P, tanto na superfície quanto no interior das células, formando compostos de baixa solubilidade (Clarkson, 1966). Dessa forma, ocorre redução na absorção de P, bem como precipitação do nutriente nas raízes, restringindo sua translocação para a parte aérea. Gaume et al. (2001) propuseram que a tolerância ao Al por plantas de milho estava associada à imobilização do Al pelo P nos tecidos da raiz. Os autores observaram maior capacidade de utilização de P por cultivares mais tolerantes ao Al. Além disso, Vazquez et al. (1999) relataram que plantas de milho tolerantes ao Al realizam transporte ativo do complexo Al-P da parede celular para o vacúolo. Zhu et al. (2002) demonstraram que variedades de trigo tolerantes ao Al utilizaram mais eficientemente o P. Zheng et al. (2005) verificaram que a concentração de Al e P foi maior em variedades de trigo tolerantes ao Al e atribuíram este fato à maior resistência das variedades que acumulavam maior quantidade de Al e P nas raízes. Pellet et al. (1996), também estudando variedades de trigo, verificaram que a tolerância destas ao Al pode envolver mecanismos múltiplos de tolerância, inclusive a exsudação de fosfato pelo ápice radicular, o que pode precipitar o Al^{3+} , restringindo assim sua absorção. Esse comportamento talvez possa explicar os teores de P observados na parte aérea da variedade Catuaí Amarelo.

Já o aumento da concentração de Ca em solução diminui o efeito tóxico do Al, por reduzir a atividade do Al^{3+} na superfície externa da membrana plasmática das células da raiz (Silva et al., 2005).

Os resultados demonstram diferenças entre os materiais genéticos de café quanto à toxidez por Al. A comparação entre as duas espécies de café (*Coffea canephora* e *Coffea arabica*), em ensaios de campo, torna-se dificultada pela exigência diferenciada de clima e solo, pois os efeitos do Al seriam sobrepostos por demais fatores, principalmente o clima. No entanto, ensaios que contemplam cada espécie são essenciais na distinção dos materiais genéticos. A confirmação mais aprimorada dessas diferenças é a identificação dos materiais genéticos do cafeiro poder ter implicação na alocação dos clones ou variedades em áreas de produção onde o problema de toxidez por Al é comum, aumentando a eficiência do sistema produtivo e reduzindo custos de produção. Por outro lado, a utilização de clones ou variedades de café mais sensíveis ao Al implicaria o incremento das doses de calcário e consequente neutralização desse elemento.

No quadro 4 são apresentadas as equações de regressão que descrevem o comportamento da variedade Catuaí Amarelo e dos dois clones de conilon, em resposta à atividade de Al^{3+} na solução

Quadro 4. Equações de regressão que descrevem a produção de matéria seca da parte aérea e raízes, da área e do comprimento radicular, dos teores de fósforo, cálcio e alumínio, da variedade Catuaí Amarelo e dos clones Mtl 25 e Mtl 27 de café conilon, considerando a atividade de Al^{3+} em solução nutritiva

Genótipo	Equação de regressão	R^2
Catuaí Amarelo	Matéria seca de parte aérea $\hat{y} = 10,37 + 0,01134x - 0,0000744x^2$	0,999
Mtl 25	$\hat{y} = 10,19 \exp\{-1/2[\ln(x/34,86)/1,349]^2\}$	0,922
Mtl 27	$\hat{y} = 5,94 \exp\{-1/2[\ln(x/34,86)/1,950]^2\}$	0,953
Catuaí Amarelo	Matéria seca de raiz $\hat{y} = 2,640 + 0,00835x - 0,0000288x^2$	0,997
Mtl 25	$\hat{y} = 2,820 \exp\{-1/2[\ln(x/45,323)/1,068]^2\}$	0,982
Mtl 27	$\hat{y} = 1,526 - 0,00349x + 0,0000041x^2$	0,774
Catuaí Amarelo	Área radicular (cm^2) $\hat{y} = 505,785 + 3,1610^{\circ}x - 0,0105^{\circ}x^2$	0,980
Mtl 25	$\hat{y} = 529,99 \exp\{-1/2[\ln(x/41,705)/0,9634]^2\}$	0,988
Mtl 27	$\hat{y} = 1/(0,00265 + 0,0000191x)$	0,969
Catuaí Amarelo	Comprimento radicular (cm) $\hat{y} = -160,665 + 2379,860^{**}x^{0,5} - 112,432^{\circ}x$	0,999
Mtl 25	$\hat{y} = 9678,52 \exp\{-1/2[\ln(x/41,429)/0,8313]^2\}$	0,981
Mtl 27	$\hat{y} = 5520,770 - 0,995^{**}x$	0,966
Catuaí Amarelo	P nas folhas (dag kg^{-1}) $\hat{y} = 0,52840 - 0,000907^{**}x$	0,988
Mtl 25	$\hat{y} = 0,317 - 0,00191^{\circ}x + 0,00000454^{\circ}x^2$	0,998
Mtl 27	$\hat{y} = 1/(2,895 + 0,0279^{**}x)$	0,910
Catuaí Amarelo	P nas raízes (dag kg^{-1}) $\hat{y} = 1/(1,336 + 0,0018^{**}x)$	0,911
Mtl 25	$\hat{y} = 0,372 + (21,267/x) \cdot (387,11/x^2)$	0,779
Mtl 27	$\hat{y} = 0,287 + (33,398/x) \cdot (604,52/x^2)$	0,963
Catuaí Amarelo	Ca nas folhas (dag kg^{-1}) $\hat{y} = 0,49540 + 0,07909^{**}x^{0,5} - 0,003620^{**}x$	0,605
Mtl 25	$\hat{y} = 0,405 + 0,0546^{\circ}x^{0,5} - 0,003029^{\circ}x$	0,972
Mtl 27	$\hat{y} = 1/(1,264 + 0,00203^{(1)}x)$	0,985
Catuaí Amarelo	Ca nas raízes (dag kg^{-1}) $\hat{y} = 0,5356 - 0,002645^{**}x + 0,00000603^{**}x^2$	0,983
Mtl 25	$\hat{y} = 0,183 + 2,733^{**}/x$	0,986
Mtl 27	$\hat{y} = 1/(3,931 + 0,0101^{**}x)$	0,967
Catuaí Amarelo	Al nas folhas (mg kg^{-1}) $\hat{y} = 1/(0,00623 - 0,00000829^{**}x)$	0,981
Mtl 25	$\hat{y} = 1/(0,00560 - 0,00000635^{**}x)$	0,963
Mtl 27	$\hat{y} = 221,361 + 0,442^{**}x$	0,825
Catuaí Amarelo	Al nos caules (mg kg^{-1}) $\hat{y} = 158,788 - 2556,79^{**}/x$	0,945
Mtl 25	$\hat{y} = 5,904 + 1,102^{**}x$	0,982
Mtl 27	$\hat{y} = 39,079 + 1,422^{**}x$	0,949
Catuaí Amarelo	Al nas raízes (mg kg^{-1}) $\hat{y} = -1380,09 + 640,327^{\circ}x^{0,5} - 6,254x$	0,988
Mtl 25	$\hat{y} = 587,721 + 11,620^{**}x$	0,947
Mtl 27	$\hat{y} = 2776,84 - 49611,3^{**}/x$	0,924

CONCLUSÕES

1. A variedade Catuaí Amarelo apresentou-se menos sensível ao Al^{3+} do que os clones de conilon; o clone de conilon Mtl 25 é menos sensível ao Al^{3+} do que o clone Mtl 27.

2. O aumento da atividade de Al^{3+} promoveu a redução nos teores de P e Ca nas folhas e raízes do cafeiro, especialmente nos clones Mtl 25 e Mtl 27.

3. O acúmulo de Al no sistema radicular e a restrição do transporte para a parte aérea são importantes fatores na maior tolerância de plantas ao Al^{3+} .

LITERATURA CITADA

- BOLLARD, E.G. Involvement of unusual elements in plant growth and nutrition. In: LAUCHLI, A. & BRELESK, R.L., eds. Encyclopedia of plant physiology. Berlin, Springer-Verlag, 1983. p.695-744.
- BRAGANÇA, J.B.; MATIELLO, J.B. & FABRIS, E.J. Efeito do alumínio trocável do solo sobre o crescimento inicial do cafeiro conilon (*Coffea canephora*) em comparação com o Catuaí (*Coffea arabica*). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 12., Caxambu, 1985. Anais. Rio de Janeiro, SEPRO/DEPET/DIPRO/IBC, 1985. p.112-114.
- CAMBRAIA, J.; GALVANI, F.R.; ESTEVÃO, M.M. & SANTANNA, R. Effects of aluminum on organic acid, sugar and aminoacid composition of the root system of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). J. Plant Nutr., 6:313-322, 1983.
- CLARKSON, D.T. Effect of aluminum on the uptake and on metabolism of phosphorus by barley seedlings. Plant Physiol., 41:165-172, 1966.
- CLARKSON, D.T. Interactions between aluminum and phosphorus on root surface and cell wall material. Plant Soil, 27:347-56, 1967.
- FOY, C.D. Differential aluminum and manganese tolerances of plant species and varieties in acid soils. Ci. Cult., 28:150-155, 1976.
- FOY, C.D. The physiology of plant adaptation to mineral stress. Iowa State J. Res., 57:355-391, 1983.
- GAUME, A.; MACHLER, F. & FROSSARD, E. Aluminum resistance in two cultivars of *Zea may* L.: Root exudation of organic acids and influence of phosphorous nutrition. Plant Soil, 234:73-81, 2001.
- HAUG, A.R. & VITORELLO, V. Cellular aspects of aluminum toxicity in plants. In: YASUI, M.; STRONG, M.J.; OTA, K. & VERITY, M.A. eds. Mineral and metal neurotoxicology
- HUANG, J.W.; PELLET, D.M.; PAPERNIK, L.A. & KOCHIAN, L.V. Aluminum interactions with voltage-dependent calcium transport in plasma membrane vesicles isolated from roots of aluminum-sensitive and resistant wheat cultivars. Plant Physiol., 110:561-569, 1996.
- JORGE, L.A.C. & CRESTANA, S. SIARCS 3.0: Novo aplicativo para análise de imagens digitais aplicado à ciência do solo. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., Águas de Lindóia. Anais. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. CD-ROM.
- KINRAIDE, T.B. Toxicity factors in acidic forest soils: Attempts to evaluate separately the toxic effects of excessive Al^{3+} and H^+ and insufficient Ca^{2+} and Mg^{2+} upon root elongation. Eur. J. Soil Sci., 54:323-333, 2003.
- KOCHIAN, L.V. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Molec., 46:237-260, 1995.
- KOCHIAN, L.V.; HOEKENGHA, O.A. & PIÑEROS, M.A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. Ann. Rev. Plant Biol., 55:459-493, 2004.
- KOCHIAN, L.V. & JONES, D.L. Aluminum toxicity and resistance in plants. In: YOKEL, R.A. & GOLUB, M.S. eds. Research issues in aluminum toxicity. London, Taylor & Francis, 1997. p.69-89.
- LÓPEZ-BUCIO, L.; NETO JACOBO, M.F.; RAMIREZ-RODRIGUES, V. & HERRARA-ESTELLA, L. Organic acids metabolism in plants: From adaptive physiology to transgenic varieties for cultivation in extreme soils. Plant Sci., 160:1-13, 2000.
- MA, Q.F.; RENGEL, Z. & KUO, J. Aluminum toxicity in ryegrass (*Secale cereale*): Root growth and dynamics of cytoplasmic Ca^{2+} in intact root tips. Ann. Bot., 89:241-244, 2002.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações. Piracicaba, Potafos, 1997. 319p.
- MATSUMOTO, H. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. Int. Rev. Cytol., 200:1-46, 2000.
- OSAKI, M.; WATANABE, T. & TADANO, T. Beneficial effects of aluminum on growth of plants adapted to low pH soils. Soil Sci. Plant Nutr., 43:551-563, 1997.
- PASSO, R.R. & RUIZ, H.A. Tolerância dos cafeeiros conilon e catuaí à toxidez causada pelo alumínio e manganês. R. Ceres, 42:45-52, 1995.
- PAVAN, M.A. & BINGHAM, F.T. Toxidez de alumínio em cafeeiros cultivados em solução nutritiva. Pesq. Agropec. Bras., 17:1293-1302, 1982.
- PELLET, D.M.; PAPERNIK, L.A. & KOCHIAN, L.V. Multiple aluminum-resistance mechanisms in wheat. Roles of root apical phosphate and malate exudation. Plant Physiol., 112:591-597, 1996.
- RENGEL, Z. & REID, R.J. Uptake of Al across the plasma membrane of plant cells. Plant Soil, 192:31-35, 1997.
- RENGEL, Z. & ZHANG, W.H. Role of dynamics of intracellular calcium in aluminum toxicity syndrome. New Phytol., 1997. 135:11-16.

- RYAN, P.R. & DELHAIZE, E. Function and mechanism of organic anion exudation from plant roots. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Molec. Biol.*, 52:527-560, 2001.
- SILVA, I.R.; SMYTH, T.J.; BARROS, N.F. & NOVAIS R.F. Physiological aspects of aluminum toxicity and tolerance in plants. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V. & COSTA, L.M., eds. *Tópicos de ciência do solo*. Viçosa, MG. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2, p.277-335.
- SILVA, I.R.; FERRUFINO, A.; SANZONOWICZ, C.; SMYTH, T. J.; ISRAEL, D.W. & CARTER JUNIOR, T.E. Interactions between magnesium, calcium and aluminum on soybean root elongation. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:747-754, 2005.
- THEODORO, V.C.A.; CARVALHO, J.G.; CORRÊA, J.B. & GUIMARÃES, R.J. Avaliação do estado nutricional de agroecossistemas de café orgânico no Estado de Minas Gerais. *Ci. Agrotecnol.*, 27:1222-1230, 2003.
- VALARINI, V.; BATAGLIA, O.C. & FAZUOLI, L.C. Macronutrients in leaves and fruits of dwarf arabica coffee cultivars. *Bragantia*, 64:661-672, 2005.
- VAZQUEZ, M.; POSCHENRIEDER, C.; CORRALES, I. & BARCELO, J. Changes in apoplastic aluminum during the initial growth response to aluminum by roots of a tolerant maize variety. *Plant Physiol.*, 119:435-444, 1999.
- WATANABE, T.; OSAKI, M.; YOSHIHARA, T. & TADANO, T. Aluminum-induced growth stimulation in relation to calcium, magnesium, and silicate nutrition in *Melastoma malabathricum* L. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 43:827-837, 1997.
- YANG, J.L.; ZHENG, S.J.; LIN, X.Y.; TANG, C.X. & ZHOU, G.D. Genotypic differences among plant species in response to aluminum stress. *J. Plant Nutr.*, 28:949-961, 2005.
- ZHENG, S.J.; YANG, J.L.; HE, Y.F.; YU, X.H.; ZHANG, L.; YOU, J.F.; SHEN, R.F. & MATSUMOTO, H. Immobilization of aluminum with phosphorus in roots is associated with high aluminum resistance in buckwheat. *Plant Physiol.*, 138:297-303, 2005.
- ZHU, Y.G.; HE, Y.Q.; SMITH, S.E. & SMITH, F.A. Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) has high capacity to take up phosphorous (P) from calcium (Ca)-bound sources. *Plant Soil*, 239:1-8, 2002.