

TOLERÂNCIA DE GENÓTIPOS DE CAFEEIRO AO ALUMÍNIO EM SOLUÇÃO NUTRITIVA. I. CRESCIMENTO E DESENVOLVIMENTO DA PARTE AÉREA E SISTEMA RADICULAR⁽¹⁾

M. C. L. BRACCINI⁽²⁾, H. E. P. MARTINEZ⁽³⁾, P. R. G. PEREIRA⁽³⁾,
N. F. SAMPAIO⁽³⁾ & E. A. M. SILVA⁽⁴⁾

RESUMO

Para estudar a influência do alumínio no crescimento e desenvolvimento de nove genótipos de café, foi instalado um experimento, em janeiro de 1994, em casa de vegetação do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, situada na Zona da Mata do Estado de Minas Gerais, a uma altitude média de 651 metros. Para tanto, plantas com dois pares de folhas definitivas foram submetidas a 0 e 0,296 mmol L⁻¹ de alumínio em solução nutritiva, com pH 4,0, durante 115 dias. Após este período, as plantas foram divididas em folhas superiores, folhas inferiores, primeiro par de folhas totalmente expandido, caule e raízes, para a determinação da matéria seca. Avaliaram-se, também, altura das plantas, comprimento da raiz principal, número de raízes secundárias e área foliar do primeiro par de folhas totalmente expandido. A presença do alumínio inibiu tanto o crescimento da parte aérea como das raízes, as quais apresentaram anormalidades típicas de toxidez de alumínio. A redução na matéria seca de raízes foi a característica que permitiu melhor discriminação quanto à tolerância ao alumínio entre os genótipos estudados. Observou-se redução no comprimento da raiz principal, na altura das plantas e na área foliar, bem como aumento no número de raízes secundárias em resposta a aumentos das concentrações de Al na solução nutritiva. As características de crescimento avaliadas permitiram discriminar os genótipos em quatro grupos ou categorias: tolerante (UFV 1359, UFV 2149), moderadamente tolerante (UFV 2145, UFV 2877 e UFV 2163), moderadamente sensível (UFV 3880) e sensível (UFV 2147, UFV 2198 e UFV 2237).

Termos de indexação: café, toxidez, método de seleção.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada à Universidade Federal de Viçosa. Executado com auxílio do CNPq. Recebido para publicação em dezembro de 1995 e aprovado em maio de 1998.

⁽²⁾ Estudante de Doutorado do Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal de Viçosa - UFV. CEP 36571-000 Viçosa (MG). Bolsista do CNPq.

⁽³⁾ Professor Adjunto do Departamento de Fitotecnia, UFV. Bolsista do CNPq.

⁽⁴⁾ Professor Titular do Departamento de Biologia Vegetal, UFV. Bolsista do CNPq.

SUMMARY: ALUMINUM TOLERANCE OF COFFEE GENOTYPES IN NUTRIENT SOLUTION. I. ROOT AND SHOOT GROWTH AND DEVELOPMENT

An experiment was carried out in January of 1994, in the greenhouse of the Crop Science Department of the Universidade Federal de Viçosa, located in the Zona da Mata, State of Minas Gerais, Brazil (651 meter mean altitude) to evaluate the effect of aluminum on growth and development of nine coffee genotypes. Coffee plants with two pairs of fully expanded leaves were submitted to 0 and 0.296 mmol L⁻¹ of aluminum in nutrient solution with pH 4.0 for 115 days. After this period, the plants were harvested and separated in higher and lower leaves, first pair of fully expanded leaves, stems, and roots. These plant parts were dried and evaluated for dry matter production. In addition, the following variables were evaluated: plant height, main root length, lateral root number, and leaf area of the first pair of fully expanded leaves. The aluminum inhibited shoot and root growth, with the latter showing typical symptoms of aluminum toxicity. Root dry matter reduction in presence of aluminum in the nutrient solution was the characteristic which best differentiated the genotypes. There was a reduction in the length of the main root, plant height and leaf area, and increase of lateral root number in response to increase of aluminum concentration. The evaluated characteristics allowed the differentiation of the genotypes into four groups or classes: tolerant (UFV 1359, UFV 2149), moderately tolerant (UFV 2145, UFV 2877 e UFV 2163), moderately sensitive (UFV 3880) and sensitive (UFV 2147, UFV 2198, UFV 2237).

Index terms: toxicity, coffee, screening method.

INTRODUÇÃO

A toxidez causada pelo alumínio (Al) é um dos mais importantes fatores que limitam o crescimento e, ou, o desenvolvimento das plantas em solos ácidos, principalmente em pH abaixo de 5,0. No Brasil, podem-se avaliar a importância e a magnitude do problema, considerando a área de 1,8 milhão de km² sob vegetação de cerrado. Essa área corresponde a 20% de sua área total e apresenta, além de elevada acidez, baixos teores de P, Ca, Mg, K e de micronutrientes e elevados teores de alumínio trocável (Olmos & Camargo, 1976).

O alumínio acumula-se, preferencialmente, no sistema radicular das plantas, sendo pequena quantidade translocada para a parte aérea (Matsumoto et al., 1976; Londoño & Valência A., 1983; Massot et al., 1992). Tal fato justifica o efeito notável desse íon sobre o desenvolvimento do sistema radicular, que se caracteriza pela inibição no alongamento do eixo principal, pelo engrossamento das pontas das raízes e das raízes laterais, amarronzadas e quebradiças. Assim, o sistema radicular fica desprovido de raízes finas, com tamanho reduzido, com poucas ramificações laterais e de aparência coralóide (Foy, 1974). As anomalias e os danos causados ao sistema radicular resultam em exploração de menor volume de solo pelas plantas e em prejuízos na absorção de nutrientes e no aproveitamento da água do solo.

Em cafeeiros, Pavan & Bingham (1982a) verificaram que o efeito inicial da toxidez de alumínio foi caracterizado por um retardamento no crescimento e desenvolvimento radicular, aumento no diâmetro das raízes e diminuição no número de raízes laterais, por unidade de raiz principal. Observaram, também, reduções progressivas no crescimento da parte aérea em plantas com seis meses de idade. As folhas jovens eram menores, cloróticas, com pequenos pontos necróticos na margem e com aspecto típico de enrolamento; as folhas velhas apresentaram clorose marginal, a qual progrediu para o centro do limbo.

Na maioria das vezes, o problema é revertido, pelo menos parcialmente, com a aplicação de calcário ao solo. No entanto, a correção da toxidez de alumínio nos horizontes inferiores é muitas vezes difícil. Uma das opções que tem sido considerada para contornar esse problema é a exploração do potencial genético dos cultivares, uma vez que variedades e espécies de plantas diferem amplamente na tolerância ao excesso de alumínio (Foy, 1988).

No Brasil, o café é uma das principais culturas geradoras de divisas, responsável por boa parte das receitas com exportações. Dada a expansão dessa cultura em grandes áreas de solos com problemas de alta saturação de alumínio, torna-se altamente relevante investigar seu comportamento com relação ao problema em questão, uma vez que os dados disponíveis sobre diferenças na tolerância ao

alumínio são limitados (Pavan & Bingham, 1982a, b; Londoño & Valencia A., 1983; Martinez & Monnerat, 1991).

O objetivo deste trabalho foi estudar o efeito do alumínio, em solução nutritiva, no crescimento e desenvolvimento da parte aérea e raízes de nove genótipos de café, procurando determinar possíveis diferenças na tolerância a esse metal.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado em casa de vegetação do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Viçosa, situada na Zona da Mata do Estado de Minas Gerais, a uma altitude média de 651 metros.

Foram utilizados nove genótipos de café provenientes da área de melhoramento da UFV-EPAMIG: quatro genótipos de Catuaí Vermelho: UFV 2145 (H 2077-2-5-44), UFV 2147 (H 2077-2-5-99), UFV 2198 (H 2077-2-5-91) e UFV 2237 (H 2077-2-5-15); três genótipos de Catimor: UFV 1359 (CIFC HW26/5), UFV 2877 (UFV 1340) e UFV 3880 (UFV 1603); um Mundo Novo, UFV 2163 (LCP 388-17-16), e um Catuaí Amarelo, UFV 2149 (H 2077-2-12-91).

As sementes foram selecionadas e colocadas para germinar em caixas com areia lavada. Quarenta e cinco dias após a semeadura, as plântulas passaram a ser irrigadas com solução nutritiva de Hoagland & Arnon (1950) com um quarto da concentração original, com pH 5,5 a 6,0.

Ao apresentarem dois pares de folhas definitivas, com, aproximadamente, três meses de idade, as plantas foram selecionadas quanto à uniformidade de tamanho e transplantadas para vasos de polietileno de dez litros de capacidade, deixando-se duas plantas por vaso. Utilizou-se solução nutritiva de Hoagland & Arnon (1950) diluída a $\frac{1}{4}$ e modificada quanto à concentração de P, obtendo-se as seguintes concentrações (mmol L^{-1}) de macro e micronutrientes: N: 3,750; P: 0,025; K: 1,250; Ca: 1,250; Mg: 0,500; S: 0,500; B: 11,570; Cu: 0,078; Fe: 22,380; Mn: 2,275; Mo: 0,026; Zn: 0,190. O alumínio foi fornecido nas concentrações de 0 e 0,296 mmol L^{-1} , adicionado como $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$. A concentração de fósforo e o pH da solução nutritiva foram mantidos baixos, para minimizar as precipitações de alumínio. O pH das soluções foi mantido a $4,0 \pm 0,2$, mediante ajustes diários com HNO_3 0,1 N, durante o período experimental de 115 dias. As soluções foram mantidas sob arejamento constante e foram trocadas inicialmente a cada 15 dias, tendo sido esse intervalo reduzido até a cada 5 dias, no final do experimento. A escolha das concentrações de alumínio baseou-se no trabalho de Martinez & Monnerat (1991), que testaram cinco concentrações, variando de 0 a 0,593 mmol L^{-1} .

Ao final do experimento, após a observação dos sintomas visuais da toxidez de alumínio, destacou-se o primeiro par de folhas totalmente expandido, medindo-se sua área por meio do integrador de área foliar LICOR, modelo LI-3100.

Em seguida, determinou-se o comprimento da raiz principal em ambas as plantas de cada vaso. Após lavagem em água desionizada, o sistema radicular de uma das plantas foi conservado em uma mistura de formol, ácido acético e álcool etílico, na proporção de 9:1:1, para posterior contagem do número de raízes laterais, em uma amostra composta pelos 15 cm apicais da raiz, enquanto o sistema radicular da outra planta foi utilizado para avaliação da matéria seca.

Após medições da altura das duas plantas, cada uma foi dividida em folhas superiores, correspondentes a 3 ou 4 pares de folhas; folhas inferiores, constando de 3 pares de folhas; primeiro par de folhas totalmente expandido, caule e raízes. A matéria seca de cada parte da planta foi determinada após a secagem das amostras em estufa a 72°C por 72 horas.

O delineamento estatístico utilizado foi inteiramente casualizado, num esquema fatorial com 18 tratamentos, constituídos pela combinação de 9 genótipos e 2 níveis de alumínio, com 3 repetições. A parcela foi constituída de duas plantas por vaso.

Os dados das características de crescimento foram submetidos à análise de variância, e as médias comparadas pelo teste de Duncan, a 5%. Na presença de interações significativas até 10%, foram feitos os desdobramentos.

Para identificar a característica mais importante na discriminação dos genótipos e agrupamento quanto à tolerância a toxidez de alumínio, utilizaram-se métodos multivariados. Nesta análise, os dados das características de crescimento foram expressos em percentagem de redução causada pelo alumínio, em relação a uma planta-controle, sem alumínio, permitindo, assim, comparar os efeitos do alumínio sobre as diversas características estudadas nos nove genótipos. Os percentuais de redução no crescimento $\{\%RC = [1 - (\text{Crescimento com Al} / \text{Crescimento sem Al})] \times 100\}$ foram analisados, utilizando-se a técnica de componentes principais e agrupamento dos genótipos pelo método de Tocher (Cruz & Regazzi, 1994), utilizando-se o programa GENES I, desenvolvido pelo setor de genética da Universidade Federal de Viçosa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Al na concentração de 0,296 mmol L^{-1} reduziu significativamente a matéria seca da parte aérea e total, com exceção dos genótipos UFV 1359 e UFV 2149 (Quadro 1). Os nove genótipos testados apresentaram grande semelhança de comportamento

quanto à produção de matéria seca de raízes, ocorrendo, de forma geral, acentuado decréscimo na matéria seca das raízes na presença de alumínio (Quadro 1). Entretanto, analisando a inibição causada pelo alumínio, em relação a uma planta-controle (ausência desse elemento), observaram-se grandes diferenças entre os genótipos (Quadro 2). As reduções na produção de matéria seca de raiz variaram de 15%, para UFV 2149, até 47%, para UFV 2237.

Um dos efeitos indiretos do alumínio na parte aérea foi o encurtamento dos internódios, resultando em menor altura, redução no tamanho das folhas e leve clorose. A variedade UFV 2237 apresentou manchas amareladas de forma globular e contorno difuso no limbo foliar, na presença de 0,296 mmol L⁻¹ de alumínio. Tal sintoma se assemelha à deficiência de fósforo descrito por Malavolta et al. (1981b).

Nas raízes, os sintomas de toxidez foram bastante evidentes, começando a manifestar-se cerca de 20 dias após a instalação do experimento, por meio de engrossamento e amarelecimento das pontas das raízes. As ramificações laterais demoraram mais a iniciar-se sob o estresse e foram caracterizadas pelo maior diâmetro, pela superfície externa irregular e pelo menor tamanho, não passando de 4 a 6 mm de comprimento. As raízes das plantas-controle eram longas, filiformes, de superfícies externas lisas e de coloração mais clara. Os sintomas de toxidez de alumínio em cafeeiros observados neste trabalho concordam com os relatados por Londoño & Valencia A. (1983), Martinez & Monnerat (1991) e Pavan & Bingham (1982a). As anormalidades morfológicas observadas no sistema radicular do cafeeiro são típicas da injúria provocada pelo alumínio e foram

verificadas em outras espécies, tais como trigo, milho, feijão e sorgo (Camargo & Oliveira, 1981; Bennet et al., 1986; Massot et al., 1992; Baligar et al., 1993).

Na presença de alumínio, os nove genótipos apresentaram comportamentos semelhantes, tanto para a matéria seca da parte aérea como para a matéria seca total. Entretanto, considerando que a intensidade da redução, resultante do tratamento com alumínio, pode medir o grau de tolerância, os genótipos UFV 1359 e UFV 2149, apresentando reduções na matéria seca total de 20 e 17%, respectivamente, seriam classificados como tolerantes, enquanto os genótipos UFV 2147 e UFV 2237, com reduções na matéria seca total de 46 e 43%, respectivamente, seriam os mais sensíveis (Quadro 2). Segundo Malavolta et al. (1981a), a matéria seca total mostrou melhor correlação com a tolerância ao alumínio do que outras características avaliadas, para cultivares de sorgo e feijão. Observaram, também, que reduções na produção de matéria seca acima de 25% em relação à matéria seca produzida pelo controle permitiram classificar os cultivares como sensíveis. Martinez & Monnerat (1991) detectaram reduções de 53% para a variedade de café Caturra, e de 31%, para Mundo Novo, na matéria seca total e concluíram que tal característica refletiu bem a diferença de sensibilidade ao alumínio das duas variedades.

Os resultados obtidos neste trabalho mostraram que o comprimento das raízes foi severamente afetado pela presença do alumínio, quando se considera a média de comprimento radicular dos nove genótipos em presença e ausência de alumínio (Quadro 3). Entre genótipos, entretanto, não se observaram diferenças estatísticas. Resultados

Quadro 1. Matéria seca da parte aérea, da raiz e total das plantas de nove genótipos de café, submetidos a duas concentrações de alumínio em solução nutritiva

Genótipo	Parte aérea		Raiz		Total	
	-Al	+Al	-Al	+Al	-Al	+Al
	g/planta					
UFV 2145	2,51 abA	1,69 aB	1,09	0,77	3,60 abA	2,46 aB
UFV 2147	2,70 aA	1,37 aB	1,20	0,72	3,90 aA	2,09 aB
UFV 1359	1,79 cA	1,45 aA	0,90	0,70	2,69 cA	2,15 aA
UFV 2877	2,32 abA	1,52 aB	1,02	0,71	3,34 abA	2,23 aB
UFV 2163	2,15 bcA	1,52 aB	1,05	0,79	3,20 bcA	2,31 aB
UFV 2149	2,07 bcA	1,69 aA	1,06	0,90	3,13 bcA	2,59 aA
UFV 2198	2,19 bcA	1,34 aB	1,03	0,64	3,22 bcA	1,98 aB
UFV 3880	2,31 abA	1,44 aB	1,14	0,72	3,45 abA	2,16 aB
UFV 2237	2,47 abA	1,45 aB	1,10	0,58	3,57abA	2,03 aB
Média ⁽¹⁾	2,28	1,50	1,07 A	0,72 B	3,34	2,22
C.V. (%)	12,35		15,05		12,70	

⁽¹⁾ As médias seguidas de letras iguais, maiúscula na linha ou minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5%.

Quadro 2. Redução percentual (%) da matéria seca da parte aérea (MSPA), da raiz (MSR) e total (MST), aumento do número de raízes secundárias (NRS) e redução do comprimento da raiz (CR), da altura de planta (AP) e da área foliar (AF), de nove genótipos de café, submetidos a dois níveis de alumínio

Genótipo	Característica de crescimento ou desenvolvimento						
	MSPA	MSR	MST	NRS	CR	AP	AF
UFV 2145	32,4	29,1	31,4	28,9	16,7	13,4	31,8
UFV 2147	49,3	39,8	46,4	68,4	15,8	30,3	37,4
UFV 1359	18,7	22,6	20,0	150,0	17,3	12,4	14,5
UFV 2877	34,5	30,7	33,4	144,7	11,8	13,8	30,7
UFV 2163	29,2	24,9	27,8	36,8	13,0	20,4	33,7
UFV 2149	18,4	15,2	17,3	112,1	19,6	7,1	11,1
UFV 2198	38,8	37,6	38,4	83,3	16,0	19,5	31,1
UFV 3880	37,4	37,3	37,4	232,2	19,0	12,1	28,8
UFV 2237	41,4	47,4	43,2	20,5	16,2	29,7	44,1

semelhantes foram obtidos por Martinez & Monnerat (1991) para duas variedades de café submetidas a diferentes níveis de alumínio. Segundo Massot et al. (1992), o índice de tolerância baseado apenas na alongação radicular pode não ser um indicativo seguro de sensibilidade ao alumínio. O crescimento da parte aérea deve ser considerado, uma vez que danos no sistema radicular podem resultar em menor crescimento da parte aérea. Por outro lado, Camargo & Felício (1984), Bennet et al.

(1986), Massot et al. (1992) e Baligar et al. (1993), considerando que um dos principais efeitos do alumínio é a inibição do crescimento das raízes, que se tornam curtas e grossas, indicaram o seu comprimento como a característica mais sensível para avaliar a tolerância ao alumínio, em solução nutritiva, entre cultivares de diversas espécies.

Os genótipos UFRV 1359, UFRV 2149 e UFRV 3880, apesar de apresentarem porte mais baixo na ausência de alumínio, não foram significativamente alterados por esse íon na concentração de 0,296 mmol L⁻¹ (Quadro 4). As maiores reduções na altura das plantas ocorreram nos genótipos UFRV 2147 e UFRV 2237, que foram da ordem de 30% (Quadro 2). Londoño & Valencia A. (1983) consideraram que a altura da planta foi a característica mais adequada para medir o efeito do alumínio em plantas de café da variedade Caturra.

A presença do alumínio influenciou, também, no número de raízes secundárias e área foliar do primeiro par de folhas totalmente expandido (Quadro 3). No sistema radicular, um dos sintomas da toxidez de alumínio manifestou-se pelo aumento no número de raízes laterais, avaliado a partir de amostras de 15 cm apicais da raiz. É provável, que o efeito tóxico do alumínio na destruição das células da região meristemática da raiz principal tenha alterado a produção de hormônios que controlam o crescimento de raízes laterais. Segundo Rengel (1992), o alumínio promove redução da síntese e transporte de citocininas nos meristemas da raiz, altera a direção do movimento de auxinas, favorecendo o transporte acrópeto ao invés do basípeto, e aumenta os níveis de ácido abscísico.

Quadro 3. Médias do número de raízes secundárias nos 15 cm terminais, comprimento da raiz principal, altura de planta e área foliar do primeiro par de folhas totalmente expandido de nove genótipos de café, em resposta a duas concentrações de alumínio em solução nutritiva

Genótipo	Raízes secundárias		Comprimento da raiz principal			Altura de planta		Área foliar	
	-Al	+Al	-Al	+Al	Média	-Al	+Al	-Al	+Al
	n ^a		cm					cm ²	
UFV 2145	17,33 aA	22,33 abA	56,53	47,10	51,82 b	13,40 bcA	11,60 bB	101,62 abA	69,34 abB
UFV 2147	12,67 abB	21,33 bA	56,85	47,85	52,35 b	13,47 bcA	9,38 cB	107,36 aA	67,26 abB
UFV 1359	7,33 bB	18,33 bA	58,42	48,33	53,38 ab	11,85 cA	10,38 bcA	84,05 bA	71,87 abA
UFV 2877	12,67 abB	31,00 aA	56,75	50,07	53,40 ab	14,10 bA	12,15 bA	99,04 abA	68,66 abB
UFV 2163	12,67 abA	17,33 bA	55,00	47,83	51,41 b	19,08 aA	15,18 aB	92,50 abA	61,30 abB
UFV 2149	11,00 abB	23,33 abA	57,03	45,85	51,44 b	11,97 cA	11,12 bcA	89,35 abA	79,40 aA
UFV 2198	10,00 abB	18,33 bA	53,33	44,82	49,07 b	11,98 cA	9,65 cB	95,19 abA	65,63 abB
UFV 3880	9,33 abB	31,00 aA	63,58	51,48	57,33 a	12,12 cA	10,65 bcA	91,90 abA	65,43 abB
UFV 2237	13,00 abA	15,67 bA	52,80	44,25	48,53 b	13,18 bcA	9,27 cB	97,18 abA	54,32 bB
Média ⁽¹⁾	11,78	22,07	56,70 A	47,51 B		13,46	11,04	95,35	67,02
C.V. (%)	29,09		7,40			8,32		12,12	

⁽¹⁾ As médias seguidas de letras iguais, maiúscula na linha ou minúscula na coluna, não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5%.

Quadro 4. Estimativas das variâncias (autovalores), variação acumulada associada aos componentes principais e respectivos coeficientes de ponderação (autovetor) das características avaliadas em nove genótipos de café, submetidos a dois níveis de alumínio

Componente principal	Autovalor	Variação acumulada	Característica de crescimento ou desenvolvimento ⁽¹⁾						
			MSPA	MSR	MST	NRS	CR	AP	AF
		%							
CP1	4,728408	67,55	0,4312	0,4182	0,4370	-0,2081	-0,1900	0,4162	<u>0,4422</u>
CP2	1,230273	85,12	0,2295	0,3096	0,2610	<u>0,6528</u>	0,5750	-0,1310	-0,0968
CP3	0,720387	95,42	-0,0823	0,0184	-0,0541	-0,5916	<u>0,7632</u>	0,2334	-0,0539
CP4	0,167569	97,81	-0,0830	-0,0967	-0,0863	0,2838	-0,0796	<u>0,8383</u>	-0,4320
CP5	0,115554	99,46	<u>-0,6595</u>	0,6043	-0,2757	0,1299	-0,0107	0,0926	0,3135
CP6	0,037794	99,99	0,0024	-0,5385	-0,1783	0,2882	0,2103	0,2092	<u>0,7122</u>
CP7	0,000014	100,00	-0,5593	-0,2538	<u>0,7891</u>	0,0004	0,0024	0,0001	0,0067

⁽¹⁾ MSPA = matéria seca da parte aérea; MSR = matéria seca de raiz; MST = matéria seca total; NRS = número de raízes secundárias; CR = comprimento da raiz principal; AP = altura de planta; AF = área foliar.

A perda da dominância apical manifestou-se pela proliferação de raízes laterais (Quadro 3). Os genótipos que até então manifestaram maior sensibilidade ao alumínio, UFV 2147 e UFV 2237, apresentaram aumento no número de raízes laterais da ordem de 68 e 20%, respectivamente. Contudo, os genótipos mais tolerantes, UFV 1359 e UFV 2149, apresentaram maior proliferação de raízes laterais, com percentual de aumento acima de 100% (Quadro 2). Bennet et al. (1986) relataram que plantas de milho tratadas com alumínio revelaram alterações na morfologia da raiz, apresentando maior proliferação de raízes laterais, sendo este um possível mecanismo para evitar a restrição na absorção de nutrientes.

As características de crescimento avaliadas, após transformadas em percentagem de redução ou aumento causada pelo alumínio, em relação a uma planta controle, na ausência deste elemento, foram submetidas à análise multivariada (Quadro 2).

A análise multivariada com base em componentes principais tem por finalidade resumir as informações do conjunto inicial de características em poucos componentes, representados por combinações lineares daquelas características, simplificando a análise dos dados. Em geral, avalia-se a dissimilaridade dos genótipos por intermédio de uma dispersão gráfica, utilizando os dois primeiros componentes principais como eixo de referência, quando eles envolvem pelo menos 80% da variância acumulada (Cruz & Regazzi, 1994), o que foi obtido no presente trabalho, viabilizando, portanto, a utilização dessa técnica. Com apenas os dois primeiros componentes principais, foi possível reunir mais de 85% da variação total disponível, tendo sido o primeiro componente responsável por cerca de 68%, e o segundo, por 18%, aproximadamente, dessa variação (Quadro 4).

Na figura 1, está representada a dispersão gráfica no espaço bidimensional dos nove genótipos,

utilizando-se o primeiro e o segundo componentes principais, correspondentes aos eixos Y e X, respectivamente. Constatou-se que o genótipo mais distanciado, em relação aos demais, foi UFV 3880, enquanto os genótipos UFV 2237 e UFV 2147; UFV 2145 e UFV 2877; UFV 1359 e UFV 2149 apresentaram-se menos distanciados entre si, sendo, portanto, mais semelhantes.

O estudo das importâncias relativas das características, para discriminar os genótipos quanto à tolerância ao alumínio, foi determinado com base nos coeficientes de ponderação (autovetor) das características nos componentes principais apresentados no quadro 4. O critério adotado na determinação das características de menor importância consistiu na identificação daqueles que apresentaram os maiores coeficientes de ponderação, nos últimos componentes principais. Jolliffe (1972) citado por Cruz & Regazzi (1994), recomendou o descarte das características de maior coeficiente (em valor absoluto) a partir do último componente, até aquele cujo autovalor não exceda a 0,70. Dessa forma, concluiu-se que a característica matéria seca total (MST) apresentava a menor importância, seguida, sucessivamente, pelas características de área foliar (AF), matéria seca da parte aérea (MSPA) e altura de planta (AP). Tais características são dispensáveis e, ou, redundantes em função de apresentarem alta correlação (dados não mostrados) com as características mais importantes: percentual de redução da matéria seca de raiz (MSR), aumento do número de raízes secundárias (NRS) e redução do comprimento da raiz principal (CR). As características radiculares foram as mais sensíveis na detecção do diferencial de resposta à toxicidade do alumínio. Resultados semelhantes foram obtidos por Camargo & Oliveiras (1981), Camargo & Felício (1984) e Massot et al. (1992).

Dentre as características radiculares avaliadas, a redução na matéria seca de raiz foi a que melhor

discriminou os genótipos quanto à tolerância ao alumínio. Contudo, esta é uma variável destrutiva. Por outro lado, a percentagem de redução causada pelo alumínio no alongamento radicular, além de ser uma variável fácil de ser medida, permite a utilização das mesmas plantas em estudos subseqüentes.

Os genótipos foram reunidos em grupos com padrão de comportamento similar, por meio da técnica multivariada de análise de agrupamento, segundo o método de Otimização de Tocher, baseando-se na distância euclidiana média. Os

grupos foram formados, utilizando-se, como referencial, a distância máxima entre o conjunto de menores distâncias entre cada genótipo. O valor do limite máximo para a inclusão de um genótipo no grupo, com referência às distâncias mínimas, foi de 0,997.

Em decorrência da análise por esse método, foram formados quatro grupos distintos quanto à tolerância ao alumínio (Quadro 5). Cada grupo exibiu diferenças marcantes em relação aos outros, com respeito a todas as características medidas.

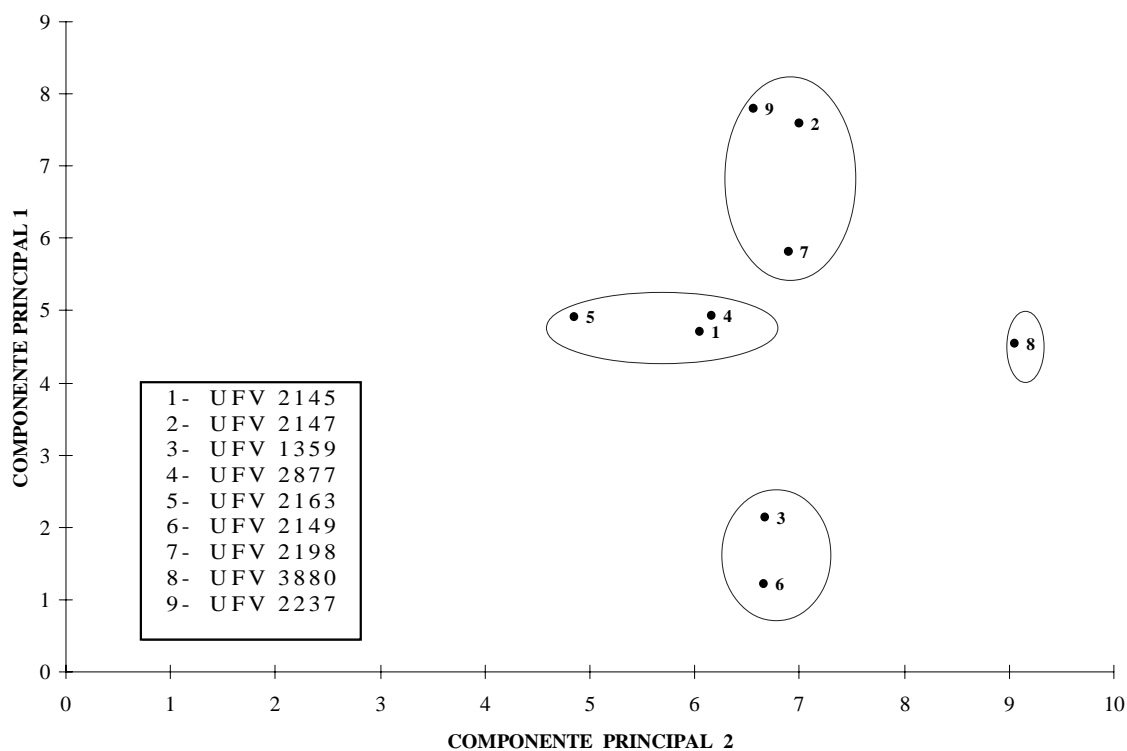


Figura 1. Gráfico de dispersão dos nove genótipos de café, em relação aos seus escores, nos dois primeiros componentes principais.

Quadro 5. Grupos com padrões de comportamento similares, estabelecidos pelo método de Otimização de Tocher, baseado na distância Euclidiana Média Padronizada, em função do percentual de redução ou aumento causado pelo alumínio em sete características avaliadas e respectivas médias por grupo formado de nove genótipos de café

Grupo	Genótipo ⁽¹⁾	Característica de crescimento ou desenvolvimento ⁽²⁾						
		MSPA	MSR	MST	NRS	CR	AP	AF
I	2, 9, 7	43,14	41,61	42,66	57,42	16,00	26,50	37,50
II	3, 6	18,56	18,86	18,66	131,06	18,44	9,74	12,82
III	1, 5, 4	32,06	28,25	30,87	70,14	13,83	15,90	32,06
IV	8	37,39	37,30	37,36	232,15	19,03	12,11	28,81

⁽¹⁾ 1(UFV 2145), 2(UFV 2147), 3(UFV 1359), 4(UFV 2877), 5(UFV 2163), 6(UFV 2149), 7(UFV 2198), 8(UFV 3880), 9(UFV 2237).

⁽²⁾ MSPA = matéria seca da parte aérea; MSR = matéria seca de raiz; MST = matéria seca total; NRS = número de raízes secundárias; CR = comprimento da raiz principal; AP = altura de planta; AF = área foliar.

As médias dos grupos, para as características avaliadas, encontram-se no quadro 5. O grupo I, representado pelos genótipos UFV 2147, UFV 2237 e UFV 2198, apresentou os maiores percentuais de redução na matéria seca da parte aérea (MSPA), da raiz (MSR) e total (MST), na altura de planta (AP) e na área foliar (AF), sendo este o grupo de maior sensibilidade ao alumínio.

O grupo II apresentou os menores percentuais de redução nas características avaliadas, sendo os genótipos UFV 1359 e UFV 2149 os mais tolerantes ao alumínio, na concentração de 0,296 mmol L⁻¹.

Os grupos III e IV apresentaram médias intermediárias entre os grupos I (sensível) e II (tolerante) (Quadro 5). Entretanto, o grupo IV, representado pelo genótipo UFV 3880, evidenciou maiores reduções no comprimento da raiz principal, matéria seca da parte aérea, raízes e total, do que o grupo III, sendo, portanto, classificado como moderadamente sensível, e o grupo III, moderadamente tolerante.

CONCLUSÕES

1. A presença do alumínio inibiu o crescimento e, ou, desenvolvimento da parte aérea e das raízes, as quais apresentaram anormalidades morfológicas típicas de injúria provocada por esse metal.

2. A análise multivariada mostrou-se mais adequada para classificar os genótipos quanto à tolerância ao alumínio do que o teste de médias. Com base nessa análise, o percentual de redução na matéria seca das raízes foi a característica que possibilitou melhor discriminação dos genótipos.

3. O alumínio reduziu o comprimento da raiz principal, altura das plantas, área foliar e aumentou o número de raízes secundárias.

4. A análise de agrupamento, baseada no método de Tocher, permitiu separar os genótipos em quatro classes de tolerância.

LITERATURA CITADA

- BALIGAR, V.C.; SCHAFFERT, R.E.; SANTOS, H.L.; PITTA, G.V.E. & BAHIA FILHO, A.F.C. Soil aluminium effects on uptake, influx, and transport of nutrients in sorghum genotypes. *Plant Soil*, 150:271-277, 1993.
- BENNET, R.J.; BREEN, C.M. & FEY, M.V. Aluminium toxicity and induced nutrient disorders involving the uptake and transport of P, K, Ca and Mg in Zea mays L. *South Afr. J. Plant Soil*, 3:11-17, 1986.
- CRUZ, C.D. & REGAZZI, A.J. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária, 1994. 390p.
- CAMARGO, C.E.O. & OLIVEIRA, O.F. Tolerância de cultivares de trigo a diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva no solo. *Bragantia*, 40:21-31, 1981.
- CAMARGO, C.E.O. & FELÍCIO, J.C. Tolerância de cultivares de trigo, triticale e centeio em diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva. *Bragantia*, 43:9-16, 1984.
- FOY, C.D. Effects of aluminum in plant growth. In: CARSON, E.W. ed. *The plant root and its environment*. Charlottesville, University of Virginia, 1974. p.601-642.
- FOY, C.D. Plant adaptation to acid aluminum-toxic soils. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:959-987, 1988.
- HOAGLAND, D.R. & ARNON, D.I. The water culture method for growing plants without soil. Berkeley, Cal. Agric. Exp. Station, 1950. 347p. (Cal. Agric. Exp. Station, Cir.)
- LONDOÑO, M.E.A. & VALENCIA A., G. Toxicidad de aluminio en plantas de café. *Cenicafé*, 34:61-97, 1983.
- MALAVOLTA, E.; YAMADA, T. & GUIDOLIN, J.A. Nutrição e adubação do cafeeiro. Piracicaba, Instituto da Potassa & Fosfato/Instituto Internacional da Potassa, 1981a. 224p.
- MALAVOLTA, E.; NOGUEIRA, F.D.; OLIVEIRA, I.P.; NAKAYAMA, L. & EIMORI, I. Aluminum tolerance in sorghum and bean - methods and results. *J. Plant Nutr.*, 3:687-694, 1981b.
- MARTINEZ, H.E.P. & MONNERAT, P.H. Níveis crescentes de alumínio em duas variedades de café cultivadas em solução nutritiva. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 23., Porto Alegre, 1991. Resumos. Porto Alegre, SBCS/UFRGS, 1991. p.109.
- MASSOT, N.; POSCHENRIEDER, C. & BARCELÓ, J. Differential response of three bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars to aluminum. *Acta Bot. Neerl.*, 41:293-298, 1992.
- MATSUMOTO, H.; HIRASAWA, H.; TORIKAI, H. & TAKAHASHI, E. Localization of absorbed aluminum in pea root and its binding to nucleic acid. *Plant Cell Physiol.*, 17:127-137, 1976.
- OLMOS, I.L.J. & CAMARGO, M.N. Ocorrência de alumínio tóxico nos solos do Brasil, sua caracterização e distribuição. *Ci. Cult.*, 28:171-180, 1976.
- PAVAN, M.A. & BINGHAN, F.T. Toxidez de alumínio em cafeeiros cultivados em solução nutritiva. *Pesq. Agropec. Bras.*, 17:1293-1302, 1982a.
- PAVAN, M.A. & BINGHAN, F.T. Toxicity of aluminum to coffee seedlings in nutrient solution. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:993-997, 1982b.
- RENGEL, Z. Role of calcium in aluminum toxicity. *New Phytol.*, 121:499-513, 1992.