

MARIA DO CARMO LANA BRACCINI

**COMPORTAMENTO DE NOVE POPULAÇÕES DE CAFÉ QUANTO
À TOLERÂNCIA AO ALUMÍNIO-EM SOLUÇÃO NUTRITIVA**

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
DEZEMBRO - 1995

*Ao meu esposo, Alessandro,
aos meus pais, Roberto e Nair,
aos meus irmãos, Luiz Roberto, José Tadeu e Maria José,*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, nosso Pai, sempre presente em todos os momentos da vida.

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

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

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

Ao Prof. Paulo Roberto Gomes Pereira, pela atenção, pelos ensinamentos, pelas críticas e sugestões.

Ao Prof. Nelson Ferreira Sampaio, pela atenção e pelo apoio constantes.

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

Ao Prof. Julio Cesar Lima Neves, pela atenção, pelo incentivo, pela amizade e pelas valiosas sugestões.

Ao Prof. Cosme Damião Cruz, pelas valiosas críticas e sugestões na análise estatística.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais, na pessoa do Eng^o Agr^o Dr. Antônio Alves Pereira, pelo fornecimento das sementes de café utilizadas no experimento.

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

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

Aos colegas do Curso de Fitotecnia, especialmente Roberto dos Anjos Reis Junior, Robério Gama Pacheco e Tânia Maria Leal Barbosa, pela saudável convivência.

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

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



BIOGRAFIA

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

Concluiu o Curso Primário em Guaraciaba-MG, e o Segundo Grau em Ponte Nova-MG.

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

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

Em setembro de 1992, iniciou o Curso de Mestrado em Fitotecnia, pela Universidade Federal de Viçosa.

CONTEÚDO

	Página
EXTRATO	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Fatores do Solo que Influenciam a Toxidez de Alumínio ..	3
2.2. Efeito do Alumínio no Crescimento das Plantas	4
2.2.1. Sintomas da Toxidez de Alumínio	4
2.2.2. Efeitos Benéficos do Alumínio	5
2.2.3. Efeitos Citológicos e Morfológicos do Alumínio	6
2.2.4. Efeitos do Alumínio sobre o Metabolismo Mineral	8
2.3. Mecanismos de Tolerância à Toxidez de Alumínio	13
2.3.1. Mecanismos de Tolerância Externa ou Exclusão	14
2.3.2. Mecanismos de Tolerância Interna	17
3. MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1. Material Vegetal Utilizado e Condições de Cultivo	20
3.2. Determinação da Composição Mineral	22
3.3. Delineamento Experimental e Análise Estatística	23
3.3.1. Análise de Componentes Principais	25

3.3.2. Análise de Agrupamento	27
3.3.2.1. Caracterização da Dissimilaridade entre as Populações	27
3.3.2.2. Agrupamento das Populações	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1. Sintomas da Toxidez de Alumínio	30
4.2. Efeito do Alumínio sobre as Características de Crescimento	33
4.2.1. Interpretação pela Análise Univariada	33
4.2.2. Interpretação pela Análise Multivariada	38
4.2.2.1. Análise de Componentes Principais	38
4.2.2.2. Análise de Agrupamento pelo Método de Tocher ...	43
4.3. Efeito do Alumínio sobre a Composição Química das Plantas	46
5. RESUMO E CONCLUSÕES	71
BIBLIOGRAFIA	74
APÊNDICE	86
APÊNDICE A	87

EXTRATO

BRACCINI, Maria do Carmo Lana, Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 1995. *Comportamento de Nove Populações de Café Quanto à Tolerância ao Alumínio em Solução Nutritiva*. Professora Orientadora: Herminia Emilia Prieto Martinez. Professores Conselheiros: Paulo Roberto Gomes Pereira, Nelson Ferreira Sampaio, Eldo Antônio Monteiro da Silva.

Estudou-se a influência do alumínio no crescimento da parte aérea, de raízes e na composição mineral de nove populações de café, procurando determinar possíveis diferenças na tolerância a este metal. Para tanto, plantas com dois pares de folhas definitivas foram submetidas a 0 e 8 $\mu\text{g/mL}$ 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 do peso de matéria seca e teores de fósforo, cálcio e alumínio. 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 o crescimento da parte aérea e das raízes, as quais apresentaram anormalidades típicas de

toxidez de alumínio. Dentre as características de crescimento estudadas, a redução no peso de matéria seca de raízes, foi a que possibilitou maiores diferenciais de resposta ao alumínio. Observou-se também, redução no comprimento da raiz principal, altura das plantas, área foliar e aumento no número de raízes secundárias. O agrupamento envolvendo todas as características de crescimento avaliadas, permitiu discriminar as populações em quatro grupos: 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). A tolerância ao alumínio foi associada à menor precipitação do fósforo absorvido nas raízes, menor redução na translocação para a parte aérea e à maior eficiência no uso do fósforo. Quanto à nutrição de cálcio, a tolerância foi relacionada à menor redução na absorção e ao aumento na eficiência de utilização deste nutriente, quando as plantas foram submetidas ao estresse de alumínio. Nas raízes detectaram-se elevadas concentrações deste metal, principalmente na população tolerante (UFV 2149), que apesar de apresentar maior conteúdo de alumínio, possui alta conversão em biomassa, sugerindo a atuação de algum mecanismo de tolerância interna.

1. INTRODUÇÃO

A toxidez causada pelo alumínio (Al) é um dos mais importantes fatores que limita o crescimento das plantas em solos ácidos, principalmente abaixo de pH 5,0. Estimativas revelam que aproximadamente 40% dos solos aráveis e cerca de 70% da terra potencialmente utilizável na produção de alimentos e biomassa são ácidos e, portanto, sujeitos à toxidez de alumínio (WRIGHT 1989). No Brasil, a situação não é melhor e, somente nos solos sob vegetação de cerrado, uma área de 1,8 milhões de km² ou cerca de 20% da área total, além de elevada acidez, possui baixos teores de Ca, Mg, K e elevados teores de alumínio trocável (OLMOS e CAMARGO, 1976).

A baixa produtividade e mesmo baixa resposta de muitos desses solos às fertilizações podem ser em grande parte atribuídas ao alumínio presente em níveis tóxicos. O alumínio trocável, além de ser um elemento nocivo ao crescimento do sistema radicular, interfere na absorção e movimentação de P, Ca e Mg na planta, contribuindo também para a sorção do P no solo.

Plantas não adaptadas, que crescem em solos contendo alumínio trocável em níveis tóxicos, tem o crescimento do sistema radicular prejudicado, visto que as raízes se tornam curtas e grossas. As anomalias e os danos causados ao sistema radicular ocasionam exploração de menor volume de solo pelas plantas, resultando em prejuízos na absorção de nutrientes e no aproveitamento da água do solo.

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, mediante métodos conhecidos e tradicionais, muitas vezes é difícil ou, agrônomicamente e economicamente, inexequível.

Uma das opções que tem sido considerada para contornar esse problema é a exploração do potencial genético dos cultivares. As espécies de plantas e variedades dentro de espécies 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, estabelecido e expandindo-se em grandes áreas de solos com problema de alta saturação de alumínio, sendo, portanto, 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 e BINGHAM, 1982a; 1982b; MARTINEZ e MONNERAT, 1991).

O objetivo deste trabalho foi estudar os efeitos do alumínio, em solução nutritiva, no crescimento da parte aérea de raízes e na composição mineral de nove populações de café (*Coffea arabica* L.), procurando determinar uma possível diferença na tolerância a este metal.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. *Fatores do Solo que Influenciam a Toxidez de Alumínio*

A solubilidade do alumínio e a severidade da toxidez para as plantas são afetadas por vários fatores do solo, incluindo pH, tipo de argila predominante, concentração de outros cátions, concentração de sais e conteúdo de matéria orgânica (FOY, 1974; WRIGHT, 1989).

Em geral, a toxidez de alumínio não ocorre em solos com pH entre 5,2 e 7,5 porém abaixo de 5,0 a solubilidade do alumínio aumenta significativamente e grande parte dos sítios de troca de cátions podem vir a ser ocupados por este elemento (EVANS e KAMPRATH, 1970), com possibilidade de que ocorra toxicidade de alumínio para os cultivos. Em pH 4,5 as formas presentes na solução do solo correspondem a aproximadamente 85,8% de Al^{3+} , 6,4% de $Al(OH)^{2+}$ e 7.8% de $Al(SO)_4^+$ (SIMON et al., 1994).

O tipo de argila presente é um fator que merece destaque com relação à presença do alumínio trocável. Solos com caulinita e argilas 2:1 com camadas de alumínio interlamelares apresentam, a grosso modo,

duas vezes e meia mais Al^{3+} que solos apenas com caulinita, mesmo tendo menor teor de argila (McLEAN, 1976). A presença desses minerais é a causa de alguns latossolos e podzólicos vermelho-amarelos apresentarem teores mais elevados do cation que outros solos com teor de argila e pH similares (KAMPRATH, 1980).

A matéria orgânica, apesar de apresentar menor importância para subsolos de solos minerais, adsorve ions de hidrogênio produzidos na hidrólise do alumínio, além de complexar o alumínio, reduzindo a atividade do metal em solução (THOMAS e HARGROVE, 1984).

O simples aumento de sais na solução, em presença de concentrações constantes de alumínio, reduz a atividade deste elemento (PAVAN e BINGHAM, 1982b). Os autores demonstraram isso para mudas de café em solução nutritiva. Em concentrações constantes de alumínio, o crescimento de mudas foi reduzido por diluição da solução nutritiva. A atividade de $12 \mu M$ estava associada com 10% de redução no crescimento.

2.2. Efeito do Alumínio no Crescimento das Plantas

2.2.1. Sintomas da Toxidez de Alumínio

O alumínio acumula-se preferencialmente no sistema radicular das plantas, sendo pequena quantidade translocada para a parte aérea (CLARK, 1977). Este fato justifica o efeito notável deste íon sobre o crescimento do sistema radicular, que se caracteriza pela inibição na elongação do eixo principal, as pontas das raízes e raízes laterais tornam-se grossas, amarronzadas e quebradiças (FLEMING e FOY, 1968; CLARKSON, 1969). O sistema radicular é desprovido de raízes finas,

reduzido em tamanho, com poucas ramificações laterais e de aparência coralóide (MACLEOD e JACKSON, 1965; FOY, 1974).

Os sintomas de toxidez de alumínio na parte aérea das plantas, muitas vezes não são claramente diagnosticados (FOY, 1984; TAYLOR, 1988). Em algumas espécies, os sintomas foliares são semelhantes aos de deficiência de fósforo, ou seja, há um atrofiamento generalizado, folhas verdes escuras e arroxamento de caule, folhas e nervuras (FOY e BROW 1963). Em outras espécies se confundem com os de deficiência de cálcio, constando de enrolamento de folhas novas e morte dos pontos de crescimento ou dos pecíolos (JOHNSON e JACKSON, 1964; FOY, 1974). Pode também ocorrer clorose internerval típica de deficiência de ferro (CALBO e CAMBRAL, 1980). Em cafeeiros, PAVAN e BINGHAM (1982a) observaram reduções progressivas no crescimento da parte aérea e raízes com seis meses de idade. As folhas jovens eram menores, cloróticas, com pequenos pontos necróticos na margem e com aspecto típico de enrolamento e as folhas velhas apresentaram clorose marginal, a qual progrediu para o centro do limbo.

2.2.2, *Efeitos Benéficos do Alumínio*

O alumínio não é um elemento essencial para o crescimento das plantas, mas em baixas concentrações podem aumentar o crescimento ou produzir outros efeitos desejáveis (FOY et al., 1978). Entre as plantas que tem mostrado respostas positivas no crescimento na presença de alumínio em solução nutritiva, estão incluídas arroz (3 $\mu\text{g/g}$), chá (27 $\mu\text{g/g}$), pêsego (17,5 $\mu\text{g/g}$), beterraba (1 $\mu\text{g/g}$), milho (3,5 $\mu\text{g/g}$) e trigo (3 $\mu\text{g/g}$) (FOY, 1974; 1984; FOY et al., 1978).

OS mecanismos pelos quais pequenas quantidades de alumínio têm efeitos benéficos no crescimento não são claros e podem ser diferentes entre genótipos. Possíveis explicações incluem: (1) aumento na solubilidade e disponibilidade de ferro em solos calcários, pela hidrólise do alumínio e abaixamento do pH (FOY, 1984); (2) correção e prevenção da deficiência de ferro, pelo deslocamento do ferro ligado a sítios metabolicamente inativos dentro da planta, promovendo melhor distribuição, reduzindo a deficiência (FOY, 1974); (3) bloqueio de sítios de carga negativa na parede celular e deste modo promovendo absorção de fósforo (MULLETTE, 1975); (4) alteração da distribuição de reguladores de crescimento nas raízes de plântulas de pêssogo (EDWARDS et al., 1976); (5) atuando como um fungicida evitando podridões da raiz (MARSCHNER, 1986). Entretanto esses efeitos são uma exceção, sendo que os efeitos negativos do alumínio no crescimento das plantas constitui uma regra.

2.2.3. Efeitos Citológicos e Morfológicos do Alumínio

As células de raízes de plantas estressadas por alumínio, sofrem alterações citológicas que ocasionam paralisação do crescimento (CLARKSON, 1966; MORIMURA et al., 1978), em razão da inibição da divisão celular dos meristemas apicais da raiz que é considerado o efeito fisiológico primário da toxidez de alumínio (MARSCHNER, 1986). Cerca de 4 a 6 horas de exposição ao alumínio são necessárias para que ocorra uma significativa redução na mitose e alongação da raiz de certas espécies (RENGEL, 1992). Em raízes secundárias de *Vigna unguiculata* a divisão celular é completamente inibida após 10 horas de tratamento com alumínio (HORST et al., 1983).

Acúmulo significativo de alumínio tem sido detectado na epiderme de raízes em regiões de ativa divisão celular (MATSUMOTO et al., 1976). No interior das células, o alumínio acumula-se no núcleo (MORIMURA et al., 1978; NAIDOO et al., 1978). Este íon se ligaria ao fósforo dos ácidos nucleicos formando ligações cruzadas e aumentando a estabilidade e rigidez da dupla hélice do DNA, impedindo sua replicação (MATSUMOTO et al., 1976). A presença de células binucleadas no meristema apical da raiz, a detecção de aberrações cromossômicas (HORST et al., 1983), e a constatação da ligação do alumínio ao DNA (MORIMURA et al., 1978) justificam a inibição da divisão celular pelo alumínio.

O alumínio pode também causar uma distribuição anormal de ribossomos sobre o retículo endoplasmático interferindo, portanto, na síntese de proteínas (McLEAN, 1980). HUCK (1972) observou inibição na função de secreção do aparelho de golgi em raízes de algodão, nas quais a adição de 1,0 µg/g de alumínio evitou a incorporação de ¹⁴C-sacarose em materiais de parede celular e ao mesmo tempo observou-se o aparecimento de células polinucleadas, indicando que a síntese de material de parede celular limitou o crescimento.

Em raízes primárias de café LONDOÑO e VALENCIA (1983) observaram desorganização na estrutura típica da epiderme, exoderme e nas três camadas mais externas do córtex, com a presença de células de tamanho e forma irregular. No cilindro central também houve desorganização da estrutura, especialmente do floema e do câmbio.

A disfunção da membrana plasmática, ocasionada por alterações em sua estrutura, tem sido a causa dos padrões diferenciados do acúmulo de minerais em plantas estressadas por alumínio (TAYLOR, 1988). Em cultivares de cevada, a tolerância diferencial ao alumínio foi relacionada

com diferenças nas resistências à desorganização da membrana, induzida pelo estresse de alumínio (HECHT-BUCHHOLZ e FOY, 1981).

Estudos conduzidos por SUHAYDA e HAUG (1986) com membranas de raízes de milho revelaram que os íons Al^{3+} e Ca^{2+} ocasionam rigidez aos lipídeos da membrana, possivelmente por ligações com grupamentos fosfolipídicos negativamente carregados. Uma vez que a força de ligação do cation aos fosfolipídios é proporcional à carga do íon, o alumínio liga-se à membrana mais fortemente que o cálcio (CALBO e CAMBRAIA, 1980). Esse efeito ocasiona alterações na permeabilidade da membrana, o que poderia ajudar a explicar o relacionamento freqüentemente observado entre a tolerância e eficiência nutricional (TAYLOR, 1991).

2.2.4. Efeitos do Alumínio sobre o Metabolismo Mineral

Os desarranjos metabólicos provocados pelo alumínio parecem estar mais relacionados com os efeitos deletérios deste íon sobre a disponibilidade, absorção e utilização de diversos nutrientes, particularmente do fósforo e do cálcio.

A toxidez de alumínio tem sido associada ao acúmulo de fósforo no sistema radicular e baixos teores na parte aérea que apresentam sintomas de deficiência (WRIGHT, 1943; FOY e BROW, 1963). O alumínio precipita o fósforo na raiz, reduzindo a translocação para a parte aérea (CALBO e CAMBRAIA, 1980). O local da interação tem sido sugerido tanto dentro das raízes (WRIGHT, 1943), sobre a superfície celular, assim como, no espaço livre aparente (CLARKSON 1966). Além disso, o alumínio pode reduzir a solubilidade do fósforo na solução externa às raízes, tornando-o menos disponível para as plantas (PAVAN, 1981).

A absorção de fósforo, na presença do alumínio tóxico, pode ser estimulada ou inibida dependendo da concentração de alumínio e fósforo presente no meio, do tempo de exposição e da espécie (CALBO e CAMBRAIA, 1980; PAVAN e BINGHAM, 1982a; BENNET et al., 1986).

McCORMICK e BORDEN (1974) evidenciaram a fixação de fósforo e alumínio em preparações de parede celular e externamente à plasmalema nas células da coifa, da epiderme e do córtex; enquanto que MORIMURA et al. (1978) e NAIDOO et al. (1978) localizaram estes elementos no núcleo das células da região meristemática. MACKLON e SIM (1992) constataram em plântulas de *Lolium perene*, na presença de baixas concentrações de alumínio, que quantidade significativa de fósforo foi complexada com alumínio nos vacúolos das células das raízes, tornando-se não disponível para a translocação, não sendo, portanto, utilizado no crescimento.

Estudos sobre cinética da absorção de fosfato realizados por MACHADO (1981) sugerem que um dos efeitos básicos do alumínio sobre a absorção de fosfato em espécies de *Stylosanthes* é a diminuição da capacidade do carregador associar-se com o íon e, talvez, um bloqueio na capacidade de dissociação do complexo íon-carregador. O autor adverte sobre a possibilidade de uma ação generalizada do alumínio na plasmalema acarretar alterações no sistema transportador de fosfato, decrescendo a permeabilidade a este íon. Resultados semelhantes foram também obtidos por ASP et al. (1991).

A habilidade das plantas em adquirir nutrientes na presença do alumínio, principalmente o fósforo, tem sido interpretada como uma expressão das diferenças na tolerância a este metal entre as variedades (FOY et al., 1972; BENNET et al., 1986).

A tolerância ao alumínio *pode* estar também relacionada *com a* habilidade de absorver e translocar cálcio, como ocorre em trigo (HUANG et al., 1992), em feijão (FOY et al., 1972) e em sorgo (FOY et al., 1969). Entretanto, os mecanismos celulares pelos quais o alumínio interfere com a nutrição do cálcio, são ainda desconhecidos. ZHAO et al. (1987) observaram que o alumínio alterou a permeabilidade da membrana plasmática e do tonoplasto em células corticais da raiz de *Quercus rubra*, indicando que o alumínio interfere com a estrutura dos lipídeos da membrana. O alumínio segundo CLARKSON e SANDERSON (1971) bloquearia, neutralizaria ou reverteria as cargas negativas dos poros do espaço livre aparente reduzindo sua capacidade de se ligar ao cálcio. Por outro lado, HUANG et al. (1992) observaram que a inibição no influxo de cálcio através da membrana em cultivar de trigo, sensível ao alumínio, foi, possivelmente, via bloqueio dos canais de cálcio, o qual poderia ter um papel importante no mecanismo celular da toxidez de alumínio em plantas.

Tem sido sugerido um efeito do alumínio sobre a proteína chamada calmodulina (CaM). A CaM existe na forma de um polipeptídeo monomérico (17 kDa) com quatro sítios de ligação **para o** cálcio (SUHAYDA e HAUG, 1986). O cálcio parece agir como segundo mensageiro de um sistema regulatório de vários processos metabólicos importantes (SUHAYDA e HAUG, 1986). Ao se ligar à CaM, provoca mudanças de conformação nesta proteína, alterando sua interação com certas enzimas e proteínas tais como: fosfolipases, cinase do NAD, adenil ciclase e Ca^{++} - ATPase (CAMBRAIA, 1989). A afinidade do alumínio com a CaM é cerca de 2,5 a 10 vezes maior que a do cálcio; sua ligação à molécula da CaM provoca, também, mudanças conformacionais, mas de tal modo que há **uma** diminuição ou perda total de sua capacidade regulatória (SIEGEL e HAUG, 1983).

Embora a deficiência de fósforo e cálcio sejam comumente relatadas como sintomas de toxidez de alumínio, em aveia o grau de toxidez de alumínio está associado a severidade da deficiência de magnésio (GRIMME, 1983), e em milho, a eficiência de utilização de magnésio coincide com a tolerância ao alumínio (CLARK, 1977).

Em cultivares de batata (LEE, 1971), maior habilidade de absorver magnésio, e também potássio, parece determinar um melhor desenvolvimento na presença do alumínio. Em plantas de café da variedade caturra, o aumento nas concentrações de potássio e magnésio, na parte aérea, foi atribuído à capacidade das plantas em manter o balanço catiônico em face da redução no teor de cálcio, provocado pelo alumínio (LONDOÑO e VALENCIA, 1983).

GRIMME (1983) sugeriu que o alumínio acarreta inibição específica na absorção de magnésio pelas raízes. Entretanto, a exemplo de outros ions, o suprimento de magnésio ao meio de crescimento inibe o aparecimento de efeitos tóxicos do alumínio em plantas. De qualquer maneira, embora a deficiência de magnésio não seja a única causa do efeito da injúria do alumínio, a sua ocorrência é parte integrante da síndrome da fitotoxidez de alumínio, uma vez que o funcionamento normal de vários processos metabólicos dependem do magnésio, direta ou indiretamente.

A ocorrência de clorose típica da deficiência de ferro tem sido associada à toxidez de alumínio, uma vez que este cation provoca a redução do teor de ferro na parte aérea (LEMOS FILHO, 1982). Entretanto, LEE (1971) constatou acúmulo de ferro nas raízes de batata, sem reduções na translocação para a parte aérea, que apresentou teores mais altos na presença do alumínio do que o controle.

O tratamento com alumínio reduziu a concentração de manganês em todas as partes das plantas de cevada, exceto para o caule, onde maior concentração foi encontrada (ALAM, 1981). Entretanto, em arroz, a concentração de manganês foi reduzida na parte aérea, mas aumentada nas raízes (ALAM, 1983). Por outro lado, CAMBRAIA et al. (1983b) observaram que o alumínio, na concentração de 8 $\mu\text{g/g}$, reduziu o conteúdo de manganês tanto na parte aérea como nas raízes de sorgo.

O alumínio compete com o cobre pelo mesmo sítio de ligação na raiz ou próximo da superfície radicular (FOY, 1974). LEE (1971) observou um acúmulo de cobre em tecidos de raiz de batata. Enquanto que CAMBRAIA et al. (1983b) constataram uma redução no conteúdo de cobre tanto na parte aérea como nas raízes de plantas de sorgo.

Em sorgo, o nitrogênio total acumulado e translocado para a parte aérea foi drasticamente reduzido na presença de alumínio, por meio de efeitos sobre a pressão radicular (GOMES et al., 1985). Por outro lado, CORDEIRO (1981) constatou um estímulo na absorção de N-NH_4^+ e N-NO_3^- em espécie de *Stylosanthes* tolerante ao alumínio e na sensível absorção dessas duas formas de nitrogênio, as quais não foram alteradas. MOSQUIM (1978) trabalhando com *S. humilis*, tolerante ao alumínio, observou que o teor de proteínas totais, da parte aérea e do sistema radicular, tende a aumentar em resposta ao alumínio. Estes dados acrescidos aos de CORDEIRO (1981) sugere que a tolerância ao alumínio do gênero *Stylosanthes* pode estar associada ao metabolismo do nitrogênio.

O alumínio absorvido é primariamente acumulado nas raízes, antes de ser translocado para a parte aérea (FOY, 1988). Nas raízes, mais de 50% do alumínio está localizado no apoplasto (CLARKSON, 1967; ZHANG e TAYLOR, 1990). Por outro lado, através de microanálises de raio-X, NAIDOO et al. (1978) observaram que o alumínio é primariamente

localizado no citoplasma e núcleo de células meristemáticas, embora o alumínio também seja encontrado na parede celular de células da coifa.

Em sorgo, a resistência ao alumínio não está associada a diferenças na quantidade de alumínio translocada para a parte aérea, mas cultivares sensíveis apresentam maior teor de alumínio no sistema radicular (CALBO e CAMBRAIA, 1980). Entretanto, em arroz, menor concentração de alumínio na parte aérea caracteriza plantas tolerantes, enquanto que as sensíveis exibem teores mais elevados deste elemento (HOWELER e CADAVID, 1976). Portanto, as espécies diferem nos mecanismos que afetam a translocação de alumínio da raiz para a parte aérea, que, entretanto, são pouco conhecidos.

2.3. Mecanismos de Tolerância à Toxicidade de Alumínio

As espécies de plantas e variedades dentro de espécies diferem amplamente na tolerância ao excesso de alumínio e algumas dessas diferenças são controladas geneticamente (MASSOT et al., 1992).

Plantas tolerantes podem ser capazes de reduzir a absorção pelas raízes ou detoxificar o alumínio após absorção (FOY e FLEMING, 1978). Ambos os mecanismos podem atuar na mesma planta. Embora não se conheça ainda o(s) mecanismo(s) de tolerância das plantas ao alumínio, nos últimos anos, inúmeras hipóteses têm sido propostas. TAYLOR (1988, 1991) agrupou em duas categorias os mecanismos de tolerância ao alumínio baseados no local de detoxificação ou imobilização do metal.

2.3.1. *Mecanismos de Tolerância Externa ou Exclusão*

Nesse mecanismo, o apoplasto de células radiculares previne a entrada do alumínio no simplasto e, desta forma, não alcança os sítios metabólicos sensíveis. Desta forma, a taxa de transporte pela membrana pode ser maior em cultivares sensíveis ao alumínio do que em cultivares tolerantes (ROY et al., 1988).

Plantas poderiam excluir o alumínio do simplasto se quelatos ligantes fossem liberados na rizosfera formando complexos estáveis com este cátion, reduzindo a atividade de espécies tóxicas e a absorção através da membrana (FOY, 1984; 1988; TAYLOR, 1988). HUE et al. (1986) mostraram que a adição de ácido cítrico, oxálico e tartárico na solução nutritiva atenuou o efeito inibitório do alumínio sobre o comprimento radicular de plantas de algodão. Em trabalhos com cultura de células de cerloura, OJIMA e OHIRA (1988) verificaram que cultivares tolerantes exsudaram mais citrato no meio de crescimento do que cultivares sensíveis. Demonstraram, também, que a adição de ácido málico ou cítrico no meio de crescimento amenizaram os efeitos tóxicos do alumínio. A exsudação de ácidos orgânicos na rizosfera em resposta a um estresse mineral tem sido encontrado para várias plantas (MIYASACA et al., 1991). OJIMA e OHIRA (1988) observaram que o suprimento de fósforo por meio de uma fonte insolúvel de fosfato de alumínio, estava relacionado com a habilidade de exsudar citrato, que formou um complexo estável com o alumínio, liberando o fósforo inorgânico. Resultados semelhantes também foram obtidos por MIYASAKA et al. (1991). Estes autores demonstraram que um dos mecanismos de tolerância em feijão parece ser a exsudação de citrato na rizosfera, induzida tanto pela toxidez de alumínio, assim como, pelo baixo nível de fósforo, devido

a precipitados insolúveis de fosfatos de alumínio.

A parede celular tem um grande potencial para reduzir a absorção de alumínio no simplasto pelo acúmulo diferencial deste metal na parede celular (FOY, 1984; TAYLOR, 1988; 1991).

Cultivar tolerante ao alumínio tem sido associada a baixa capacidade de troca de cations (CTC) da parede celular e redução do alumínio ligado ao material de parede (TAYLOR, 1987). Grande parte do alumínio absorvido pelas raízes é adsorvido no apoplasto pela troca com o cálcio (CALBO e CAMBRAIA, 1980). De acordo com TAYLOR (1991), a baixa CTC de raiz pode contribuir para a tolerância ao alumínio de várias formas: 1) baixa CTC seletivamente exclui cations polivalentes; 2) baixa CTC reduz ligação do alumínio no sítio trocável, o qual pode ser o primeiro passo na absorção de ions; 3) baixa absorção de cations relativo a ânions, reduz a acidificação da rizosfera e desta forma reduz o alumínio no simplasto.

A membrana plasmática pode também atuar como uma barreira seletiva para absorção de alumínio (WAGATSUMA et al., 1988). Considerando que formas de alumínio carregadas podem ser capazes de atravessar a membrana plasmática, então características da membrana quanto às cargas de superfície podem ter um papel importante na regulação do transporte através da membrana, assim como, sobre a permeabilidade seletiva (TAYLOR, 1988; 1991). Estudos sugerem que 'superfície fortemente negativa poderia resultar numa maior ligação com espécies de alumínio carregadas positivamente, resultando em estruturas e funções de membranas mais sensíveis ao alumínio (WAGATSUMA et al., 1988). Evidências que dão suporte a esta hipótese foram apresentadas por WAGATSUMA e AKIBA (1989), trabalhando com protoplastos isolados de tecidos do ápice de raízes de espécies sensíveis e tolerantes. Os

protoplastos de espécies sensíveis apresentam maior eletronegatividade, que os das tolerantes. Como a baixa eletronegatividade da membrana plasmática tem um papel importante na proteção desta e de proteínas ligadas à membrana, em condições de estresse de alumínio, isto poderia ajudar a explicar a relação freqüentemente observada entre tolerância ao alumínio e eficiência no uso dos nutrientes (TAYLOR, 1991). RENGEL e ROBINSON (1989a) observaram que o alumínio aumentou o Km para a absorção do magnésio em ambos cultivares de trevo, sensível e tolerante, sugerindo uma inibição competitiva da absorção do magnésio pelo alumínio. O efeito, entretanto, foi duas vezes maior no cultivar sensível.

A fitotoxidez do alumínio é altamente dependente do pH (FOY, 1974). É possível que plantas possam criar barreiras de pH na interface solo-raiz (TAYLOR e FOY, 1985), ou diferenças de pH no apoplasto da ponta da raiz, limitando a entrada no simplasto (WAGATSUMA e EZOE, 1985), sendo a toxidez de alumínio reduzida pela formação de espécies iônicas menos tóxicas, precipitação de $Al(OH)_3 \cdot 3H_2O$ ou $Al(OH)_2H_2PO_4$ (TAYLOR, 1991). Em estudos de uma espécie forrageira GAHOONIA (1993) verificou um incremento na concentração de alumínio, na superfície radicular, com a redução do pH rizosférico. Alguns cultivares de trevo, cevada, ervilha e milho, tolerantes ao alumínio, aumentaram o pH da solução nutritiva e desta forma decresceram a solubilidade e toxidez de alumínio. Por outro lado, cultivares sensíveis das mesmas espécies decresceram o pH e desta forma, ficaram expostas ao alumínio por longo período (TAYLOR, 1988). Tais diferenças na mudança do pH poderiam resultar da absorção diferencial de cátions e ânions (FOY, 1988).

As bases fisiológicas da tolerância diferencial das plantas ao alumínio podem resultar de sua relativa preferência pelo NH_4^+ ou

NO_3^- (CAMBRAIA et al., 1990), afetando o pH rizosférico da planta, e assim, a solubilidade e a expressão da tolerância ao alumínio.

LINDBERG (1990) sugeriu que o fosfato ativamente liberado das raízes pode formar complexos insolúveis com o alumínio, atenuando os efeitos tóxicos na superfície da membrana e, ou, na absorção através da membrana plasmática. Esta hipótese foi observada por meio de estudos de cinética de absorção de fosfato em cultivares de beterraba. Na presença do alumínio, a absorção de fosfato na cultivar tolerante foi estimulada por dinitrofenol, possivelmente refletindo o efluxo ativo de fosfato. MILLARD et al. (1990) relataram que a superfície da raiz de cultivares de cevada tolerantes ao alumínio continham aproximadamente duas vezes e meia mais alumínio do que cultivares sensíveis. A razão entre alumínio e fosfato era de 1:1, sugerindo que o alumínio na superfície das raízes estava presente como fosfato de alumínio, e especulou que a precipitação de fosfato de alumínio poderia restringir o transporte de alumínio para dentro da raiz.

A possibilidade de que a tolerância ao alumínio seja mediada por efluxo ativo deste metal, tem sido sugerida em vários trabalhos recentes (LINDBERG, 1990; ZHANG e TAYLOR, 1989; 1990). Plantas tolerantes ao alumínio poderiam ser capazes de manter baixa concentração no citossol por meio da atuação de uma bomba de efluxo de alumínio através da membrana.

2.3.2. Mecanismos de Tolerância Interna

Considerando que o pH do simplasto é próximo de 7.0, a solubilidade do $\text{Al}^{3+} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ é reduzida a concentrações de 10^{-10} M, pela formação de $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ou pela precipitação de $\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$

(TAYLOR, 1991). Entretanto, mesmo em baixas concentrações, o íon no simplasto é potencialmente fitotóxico. Portanto, mecanismos de tolerância interna podem ser requeridos.

Vários autores tem sugerido que o aumento na produção de ácidos orgânicos por cultivares tolerantes pode ter um papel importante na redução da fitotoxidez do alumínio no citossol (CAMBRAIA et al., 1983a; SUHAYDA e HAUG, 1986). SUHAYDA e HAUG (1986) constataram que os ácidos orgânicos podem proteger a atividade enzimática interna da planta do efeito do alumínio. Este fato foi observado *in vitro* em que os ácidos orgânicos, principalmente cítrico, oxálico, málico e tartárico, foram capazes de proteger a calmodulina do efeito prejudicial do alumínio, restaurando sua atividade reguladora de certas enzimas. Raízes de cultivares tolerantes de feijão, ervilha e milho apresentavam maior concentração de citrato e malato do que cultivares sensíveis (LEE e FOY, 1986). Portanto, a habilidade em manter concentrações de ácidos orgânicos, evitando interrupções da síntese ou evitando a degradação em presença de alumínio, tem um papel importante na tolerância (TAYLOR, 1991).

O alumínio pode ser isolado em sítios, tal como no vacúolo, o qual pode ser insensível ao alumínio (JENSEN et al., 1989). Entretanto, evidências indicando compartimentalização de alumínio são escassas.

Alguns trabalhos indicam que as plantas podem possuir metais ligados a proteínas (fitoquelatinas), as quais detoxificam metais no citossol (TAYLOR, 1988). ANIOL (1984) relatou que a tolerância de cultivares de trigo aumentou no pré-tratamento com alumínio. Esse efeito era mais proeminente na cultivar tolerante, sugerindo a presença de proteínas ligadas ao alumínio.

Apesar do esforço de diversos pesquisadores na tentativa de elucidar os mecanismos de tolerância, existem ainda muitos questionamentos. Os progressos na descoberta do(s) mecanismo(s) da ação tóxica do alumínio tem sido dificultada pela inexistência de um radioisótopo adequado e barato desse elemento, que permita distinguir entre alumínio presente no apoplasto e simplasto. Isso, associado à diversidade de reações das espécies e cultivares ao alumínio, tem contribuído para que os mecanismos de tolerância, ainda, não estejam perfeitamente esclarecidos.



3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. *Material Vegetal Utilizado e Condições de Cultivo*

No presente trabalho foram utilizados nove populações de café sendo seis das cultivares Mundo Novo e Catuaí (*Coffea arabica* L.) e três do grupo Catimor (descendências do Híbrido de Timor e variedade Caturra) (Quadro 1), provenientes da área do programa de melhoramento da UFV-EPAMIG.

As sementes foram selecionadas, eliminando-se as atacadas por insetos e aquelas mal-formadas. Em seguida foram colocadas para germinar em caixas com areia lavada em água. Quarenta e cinco dias após sementeira, as plântulas passaram a ser irrigadas com solução nutritiva de HOAGLAND e ARNON (1950), pH 4,0, com um quarto da concentração original.

Ao apresentarem dois pares de folhas definitivas, com aproximadamente três meses após a sementeira, as plantas foram selecionadas quanto à uniformidade de tamanho e transplantadas para vasos de polietileno de dez litros de capacidade, utilizando-se duas plantas

QUADRO 1 - Relação das Populações de Café Utilizadas na Condução do Experimento

Nº Identificação	Material de Origem	Variedade/Híbrido
1. UFV 2145	H 2077-2 -5-44	Catuaf Vermelho
2. UFV 2147	H 2077-2-5-99	Catuaf Vermelho
3. UFV 1359	CIFC HW26/5	Catimor
4. UFV 2877	UFV 1340	Catimor
5. UFV 2163	LCP 388-17-16	Mundo Novo
6. UFV 2149	H 2077-2-12-91	Catuaf Amarelo
7. UFV 2198	H 2077-2-5-51	Catuaf Vermelho
8. UFV 3880	UFV 1603	Catimor
9. UFV 2237	H 2077-2-5-15	Catuaf Vermelho

por vaso. Estes continham soluções nutritivas (HOAGLAND e ARNON, 1950) diluídas a $\frac{1}{4}$, modificadas quanto a concentração de fósforo e com 0 e 8 $\mu\text{g/mL}$ de alumínio, adicionado como $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (Quadro 2). A escolha da solução nutritiva baseou-se nos trabalhos de PAVAN (1982), PAVAN e BINGHAM (1982a; 1982b) e as concentrações de alumínio no trabalho de MARTINEZ e MONNERAT (1991). A concentração de fósforo (0,025 mmol/L) e o pH da solução nutritiva foram mantidos baixos para minimizar as possíveis precipitações do alumínio.

O pH das soluções foi mantido a $4,0 \pm 0,2$, mediante ajustes diários com HNO_3 , durante o período experimental de 115 dias. Após a instalação do experimento a primeira troca das soluções foi realizada aos 30 dias, posteriormente a cada 15 dias até aos 60 dias; a cada 10 dias até aos 90 dias e finalmente a cada 5 dias nos 25 dias restantes.

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

QUADRO 2 - Composição da Solução Nutritiva Usada para Caracterizar a Toxidez de Alumínio em Mudanças de Cafeeiros

Macronutrientes (mmol/l)	N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	S-SO ₄
	3,750	0,025	1,250	1,250	0,500	0,500
Micronutrientes mmol/L (10 ⁻³)	B	Cu	Fe	Mn	Mo	Zn
	11,570	0,078	22,380	2,275	0,026	0,190

Após medições da altura de cada uma das duas plantas (AP) foram obtidas as seguintes porções: folhas superiores, que corresponderam a 3 ou 4 pares de folhas; folhas inferiores, constando de 3 pares de folhas; primeiro par de folha totalmente expandido, caule e raízes. O peso de matéria seca de cada parte da planta foi determinado após a secagem das amostras em estufa de circulação forçada de ar a 72°C por 72 horas.

Determinou-se o comprimento da raiz principal (CR) 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, álcool etílico na proporção 9:1:1 para posterior contagem do número de raízes secundárias (NRS), em uma amostra composta pelos 15 cm terminais da raiz, enquanto o sistema radicular da outra planta, foi destinado às análises químicas de minerais na matéria seca.

3.2. Determinação da Composição Mineral

Amostras de 100 mg do material vegetal seco e moído foram digeridas em uma mistura de ácido nítrico e perclórico concentrados na proporção 4:1 (GANJE e PAGE, 1974) e foram analisadas quanto a Ca, P e Al. O cálcio foi determinado por espectrofotometria de absorção

atômica, o fósforo colorimetricamente pelo método da vitamina C descrito por BRAGA e DEFELIPO (1974) e o alumínio por colorimetria pelo método do aluminon descrito por ALVAREZ V. (1985).

As concentrações de P e Ca foram expressas em dag/kg e de Al em $\mu\text{g/g}$ nas folhas superiores, inferiores e nas raízes. Os conteúdos dos elementos analisados (mg/planta) foram calculados para a parte aérea, raízes e planta toda.

Para P e Ca foram avaliadas a eficiência de utilização [EFU = (mg de matéria seca)²/mg do nutriente absorvido] segundo SIDDIQI e GLASS (1981); eficiência de translocação [EFT = (mg do nutriente na parte aérea/mg total do nutriente absorvido)] e eficiência de enraizamento [EFR = (mg matéria seca de raiz/mg total do nutriente absorvido)], baseando-se no trabalho de BAILIAN et al. (1991).

3.3. Delineamento Experimental e Análise Estatística

Utilizou-se o delineamento experimental inteiramente ao acaso, com 18 tratamentos, constituídos pela combinação de nove populações de café e dois níveis de alumínio, com três repetições. A parcela foi constituída de duas plantas por vaso.

Os dados das características de crescimento e de análises químicas foram submetidos a análise de variância e na presença de interações entre efeitos de populações e níveis de alumínio significativas até 10%, foram feitos os desdobramentos das somas de quadrados de nível dentro de população e de população dentro de nível. As médias foram comparadas pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

Para identificação da característica mais importante na discriminação das populações e agrupamento das mesmas quanto a

tolerância à toxidez de alumínio, utilizaram-se métodos multivariados

A adoção de técnicas estatísticas apropriadas, como os métodos multivariados, permite combinar as múltiplas informações contidas na unidade experimental, possibilitando discriminar as populações que diferem na tolerância diferencial ao alumínio, levando-se em consideração várias características.

Para esta análise, os dados das características de crescimento e de análises químicas foram expressos em percentagem de redução ou aumento causado pelo alumínio, em relação à planta controle, sem alumínio, permitindo assim melhores comparações dos efeitos do alumínio sobre as diversas características estudadas nas nove populações.

Os percentuais de redução envolvendo as características de crescimento $\{\%RC = [1 - (\text{Crescimento com Al}/\text{Crescimento sem Al})] \times 100\}$; redução no conteúdo de nutrientes $\{\%RCN = [1 - (\text{Conteúdo com Al}/\text{Conteúdo sem Al})] \times 100\}$; e alteração na eficiência de utilização $[REU = (\text{Eficiência de Utilização sem Al}) - (\text{Eficiência de Utilização com Al})]$ foram submetidos à análise multivariada.

As características de crescimento foram analisadas utilizando-se a técnica de componentes principais e agrupamento das populações pelo método de Tocher.

As populações foram agrupadas individualmente em relação aos percentuais de redução no conteúdo de fósforo e de cálcio e alteração na eficiência de utilização destes nutrientes, nas diversas partes em que a planta foi dividida, pelo método de otimização de Tocher. Posteriormente fez-se o agrupamento das populações, em relação à nutrição de fósforo e de cálcio.

As populações foram também agrupadas quanto à concentração de alumínio na planta.

3.3.1. *Análise de Componentes Principais*

Componentes principais são, segundo ANDERSON (1958), combinações lineares de variáveis aleatórias, as quais possuem propriedades especiais, em termos de variâncias. Dentre estas destaca-se o fato de que o primeiro componente principal possui a máxima variância, tendo o segundo a segunda maior variância e, assim, sucessivamente, de forma que o máximo de informação, em termos de variação total, esteja contido nos primeiros componentes. Além disso, os componentes principais são independentes entre si.

Um dos propósitos do uso da técnica de componentes principais, segundo CRUZ e REGAZZI (1994), é o de resumir um grande conjunto de características em outro menor e de sentido biológico, além de examinar as correlações entre as características estudadas, avaliar a importância de cada caráter e promover a eliminação daqueles que contribuem pouco e permitir o agrupamento de indivíduos com o mais alto grau de similaridade, mediante exames visuais em dispersões gráficas.

O método de análise de componentes principais consiste em transformar um conjunto de variáveis X_1, X_2, \dots, X_p para um novo conjunto CP_1, CP_2, \dots, CP_p e, segundo MARRIOT (1974), com as seguintes propriedades:

a) Cada componente principal (CPC) é uma combinação linear das características originais (X_j 's), ou seja:

$$CP_c = a_{c1}X_1 + a_{c2}X_2 + \dots + a_{cp}X_p, (c = 1, 2, \dots, p).$$

b) A soma dos quadrados dos coeficientes a_{cj} com $j = 1, 2, \dots, p$ é igual à unidade, ou seja:

$$a_{c1}^2 + a_{c2}^2 + \dots + a_{cp}^2 = 1.$$

c) Dentre todos os componentes, CP_1 apresenta a maior variância, CP_2 a segunda maior e assim sucessivamente:

$$V(CP_1) \geq V(CP_2) \geq \dots \geq V(CP_p).$$

d) As combinações lineares formadas *são* independentes, isto é:

$$\text{Cov}(CP_1, CP_2) = \text{Cov}(CP_1, CP_3) = \dots = \text{Cov}(CP_{p-1}, CP_p) = 0.$$

Desta forma, um novo conjunto de p variáveis não correlacionadas entre si e arranjadas numa ordem decrescente de variâncias é definido. A idéia principal desse procedimento é que poucos dentre os primeiros componentes principais podem conter a maioria da variabilidade dos dados originais e possibilita, também, descartar aquelas variáveis que não são importantes para a interpretação dos resultados. Este procedimento é avaliado, reduzindo, desta forma, mão-de-obra, tempo e custos despendidos na experimentação agrícola (CRUZ e REGAZZI, 1994; CRUZ et al., 1994).

Apesar dos dados serem expressos na mesma unidade, ou seja, percentuais de redução ou aumento, apresentavam uma magnitude de valores muito grande, desta forma, optou-se pela padronização dos dados, pelo uso de variáveis reduzidas, que são tomadas como razões de seus desvios-padrão, ou seja:

$$X_{ij} = \frac{\bar{X}_{ij}}{s(X_j)}, \forall j; j = 1, 2, \dots, p;$$

em que

\bar{X}_{ij} = média estimada da população i para a característica j ;

x_{ij} = variável reduzida da população i para a característica j ; e

$s(X_j)$ = desvio-padrão amostral entre as médias estimadas das populações na característica j .

As estimativas dos autovalores, a matriz de autovetores associados às características e a matriz de correlação entre os dados originais foram obtidos utilizando-se o programa GENES I, desenvolvido pelo setor de Genética da Universidade Federal de Viçosa.

3.3.2. *Análise de Agrupamento*

A análise de agrupamento teve por finalidade estratificar, mediante um esquema de classificação, as populações em vários grupos de tal forma a existir homogeneidade dentro e heterogeneidade entre grupos.

O processo de agrupamento envolve basicamente duas etapas: a primeira relaciona-se com a estimativa de uma medida de similaridade (ou dissimilaridade) entre as populações e a segunda, com a adoção de uma técnica de agrupamento para a formação dos grupos (CRUZ e REGAZZI, 1994). Os agrupamentos são construídos a partir das informações contidas na matriz de dados multivariados.

3.3.2.1. *Caracterização da Dissimilaridade entre as Populações*

No presente trabalho, foi utilizada como medida de dissimilaridade a distância Euclidiana Média. Quando os dados apresentavam uma magnitude de valores muito grande, procedeu-se à

padronização dos dados. Desta forma, a distância Euclidiana Média ($d_{ii'}$) foi obtida a partir da seguinte equação:

$$D_{ii'} = \left[\frac{1}{n} \sum_j (x_{ij} - x_{i'j})^2 \right]^{1/2}$$

em que

n = número de variáveis analisadas;

x_{ij} = observação na i -ésima população ($i = 1, 2, \dots, g$) em relação à j -ésima variável ($j = 1, 2, \dots, n$) estudada;

$x_{i'j}$ = observação na i' -ésima população ($i' = 1, 2, \dots, g$) em relação à j -ésima variável ($j = 1, 2, \dots, n$) estudada.

3.3.2.2. *Agrupamento das Populações*

Para o agrupamento das populações utilizou-se o método de otimização proposto por Tocher, citado por RAO (1952). No método de Tocher, adota-se o critério de que a média dos valores das distâncias intragrupos deve ser menor que as distâncias intergrupos. Inicialmente, para a formação do primeiro grupo, identifica-se o par de populações que apresenta a menor distância ($d_{ii'}$) na matriz de dissimilaridade entre as populações. De acordo com o critério adotado é avaliada a possibilidade de inclusão de outras populações no primeiro grupo. A entrada de uma população num grupo aumenta o valor médio de distância intragrupo. A inclusão ou não desta população no grupo será permitida se o acréscimo no valor da distância média intragrupo não ultrapassar um valor máximo permitido. Este valor máximo pode ser arbitrariamente estabelecido ou pode corresponder ao valor máximo de $d_{ii'}$, obtido no conjunto de menores distâncias envolvendo cada par de populações, sendo esta a

medida adotada neste trabalho. Esquemáticamente, pode-se mostrar este critério de agrupamento da seguinte forma:

$$d_{(jk)i} = d_{ij} + d_{ik}$$

então

$$\text{se } \frac{d(\text{Grupo})_i}{n} \leq \alpha \Rightarrow \text{inclui-se } i \text{ no grupo; ou}$$

$$\text{se } \frac{d(\text{Grupo})_i}{n} > \alpha \Rightarrow \text{inclui-se } i \text{ no grupo}$$

j, k = populações do grupo;

i = população a ser incluída ou não no grupo;

n = número de populações do grupo que poderá receber i ;

α = limite utilizado para inclusão da população i no grupo.

As distâncias médias intergrupos são calculadas somando-se as distâncias de todos os pares possíveis de populações entre dois grupos, esse valor é, então, dividido pelo número de pares formados.

O cálculo das matrizes de dissimilaridade, bem como a formação dos grupos, foram obtidos por meio do programa GENES I, desenvolvido pelo setor de genética da Universidade Federal de Viçosa.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Sintomas de Toxidez de Alumínio

Na parte aérea a toxidez de alumínio manifestou-se por encurta dos entrenós, o que resultou em plantas mais baixas, e por redução no tamanho das folhas tornando-as levemente necróticas. A população UFV 2237 apresentou glóbulos amarelados de contorno difuso no limbo foliar, na presença de 8 $\mu\text{g/mL}$ de alumínio, semelhante ao sintoma de deficiência de fósforo descrito por MALAVOLTA et al. (1981b).

Nas raízes, os sintomas de toxidez de alumínio foram bastante evidentes, começando a manifestar-se cerca de 20 dias após a instalação do experimento, pelo engrossamento e amarelecimento das pontas das raízes. As ramificações laterais de raízes sob estresse demoraram mais a iniciar-se e foram caracterizadas por um maior diâmetro, apresentavam uma superfície externa irregular e eram menores, a maioria não passando de 4 a 6 mm de comprimento. As raízes das plantas controle eram longas, filiformes e de superfícies externas regulares e de coloração mais clara (Figura 1).

UFV 2237

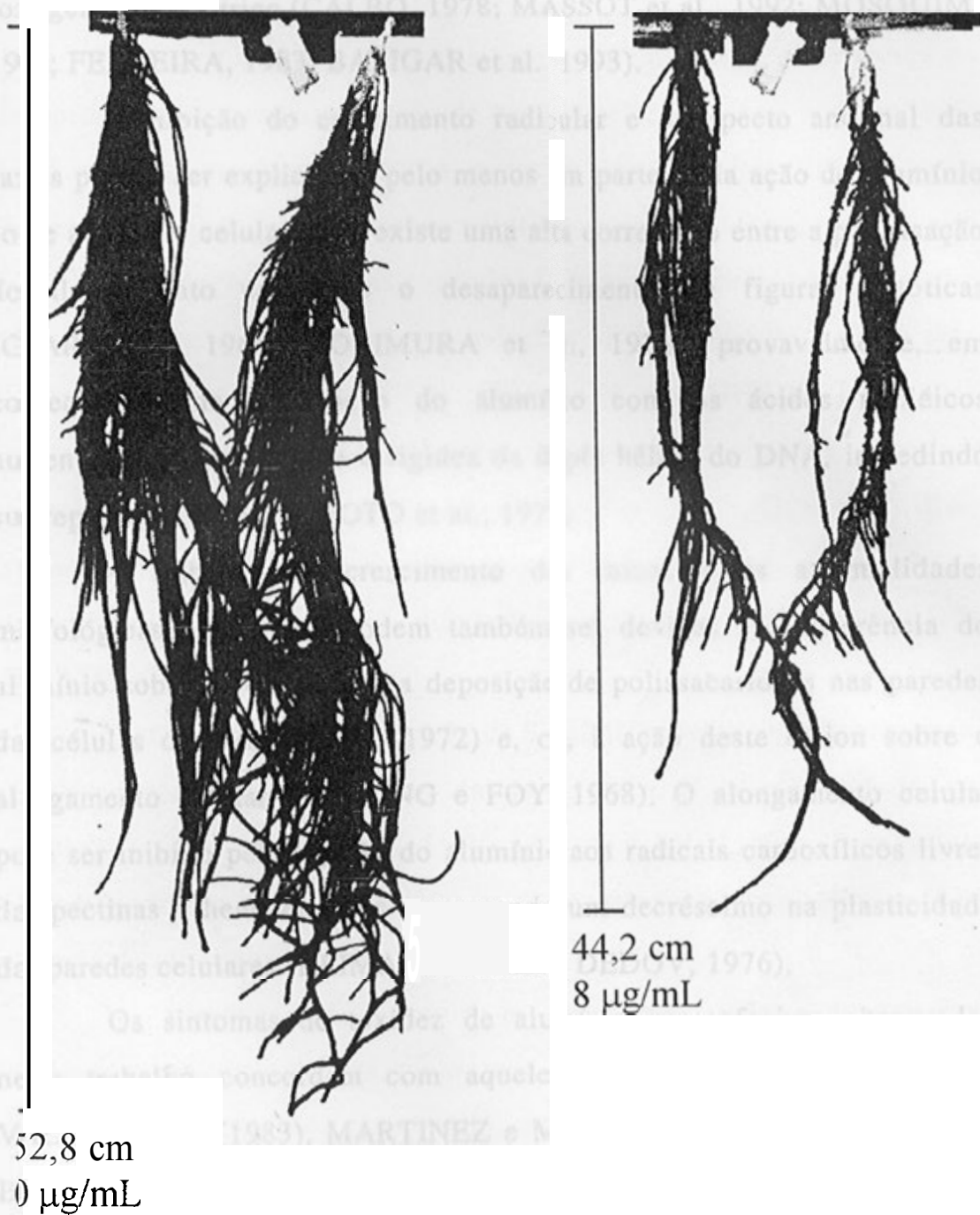


FIGURA 1 - Efeito do Alumínio, em Solução Nutritiva, sobre o Crescimento do Sistema Radicular de Café, da População UFV 2237.

As anormalidades morfológicas observadas no sistema radicular do cafeeiro são típicas da injúria provocada pelo alumínio e foram verificadas em outras espécies como sorgo, feijão, leguminosas forrageiras, soja, trigo (CALBO, 1978; MASSOT et al., 1992; MOSQUIM, 1978; FERREIRA, 1983; BALIGAR et al., 1993).

A inibição do crescimento radicular e o aspecto anormal das raízes podem ser explicados, pelo menos em parte, pela ação do alumínio sobre a divisão celular, pois existe uma alta correlação entre a paralisação do alongamento celular e o desaparecimento de figuras mitóticas (CLARKSON, 1966; MORIMURA et al., 1978), provavelmente, em consequência da associação do alumínio com os ácidos nucléicos aumentando a estabilidade e rigidez da dupla hélice do DNA, impedindo sua replicação (MATSUMOTO et al., 1976).

A inibição no crescimento das raízes e as anormalidades morfológicas observadas podem também ser devidas à interferência do alumínio sobre a formação e a deposição de polissacarídeos nas paredes das células da raiz (HUCK, 1972) e, ou, à ação deste cátion sobre o alongamento celular (FLEMING e FOY, 1968). O alongamento celular pode ser inibido pela ligação do alumínio aos radicais carboxílicos livres das pectinas e hemiceluloses provocando um decréscimo na plasticidade das paredes celulares (KLIMASHEVSKII e DEDOV, 1976).

Os sintomas de toxidez de alumínio em cafeeiros observados neste trabalho concordam com aqueles relatados por LONDOÑO e VALENCIA A. (1983), MARTINEZ e MONNERAT (1991) e PAVAN e BINGHAM (1982a).

4.2. *Efeito do Alumínio sobre as Características de Crescimento*

4.2.1. *Interpretação pela Análise Univariada*

As nove populações testadas apresentaram grande semelhança de comportamento quanto à produção de matéria seca de raízes, ocorrendo de forma geral, um decréscimo na presença de alumínio (Quadro 3). Entretanto, quando se analisa o percentual de inibição causada pelo alumínio em relação às plantas controles (Quadro 5), observam-se grandes diferenças entre as populações. As reduções na produção de matéria seca de raiz variaram de 15% para UFV 2149 até 47% para UFV 2237.

Na ausência de alumínio, observaram-se diferenças significativas no peso de matéria seca da parte aérea e da planta toda (Quadro 3). Esse fato evidencia diferenças nas taxas de crescimento de cada população. A mais produtiva foi UFV 2147, diferindo significativamente da população UFV 1359 a menos produtiva.

O alumínio na concentração de 8 µg/mL reduziu significativamente a produção de matéria seca da parte aérea e da planta toda das populações, com exceção da UFV 1359 e UFV 2149. Estas duas populações foram as que apresentaram menor produção de matéria seca na ausência de alumínio (Quadro 3).

Na presença de alumínio as nove populações apresentaram comportamentos semelhantes, tanto para o peso de matéria seca da parte aérea como para o peso de matéria seca total (Quadro 3). Entretanto, considerando que a intensidade da redução do peso de matéria seca total pode medir o grau de tolerância, as populações UFV 1359 e UFV 2149, apresentando reduções no peso de matéria seca total de 20% e 17%, respectivamente, seriam classificadas como tolerantes, enquanto

QUADRO 3 - Peso de Matéria Seca da Parte Aérea (PSPA), da Raiz (PSR), e Total (PST), das Plantas de Nove Populações de Café, em Resposta a Duas Concentrações de Alumínio em Solução Nutritiva'

Populações	PSPA		PSR		PST	
	-Al	+Al	-Al	+Al	-Al	+Al
W 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
W 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
W 2237	2,47 abA	1,45 aB	1,10	0,58	3,57abA	2,03 aB
Media	2.28	1,50	1,07 A	0,72 B	3,34	2.22

¹ As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na linha, ou minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

que as populações UFV 2147 e UFV 2237, 'com reduções no peso de matéria seca total de 46% e 43%, respectivamente, seriam as mais sensíveis (Quadro 5). Segundo MALAVOLTA et al. (1981a) o peso de matéria seca total mostrou melhor correlação com' 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% do controle permitiram classificar os cultivares como sensíveis. MARTINEZ e MONNERAT (1991) detectaram reduções na matéria seca total de 53% para a variedade de café Caturra e 31% para Mundo Novo e concluíram que esta característica refletiu a diferença de sensibilidade ao alumínio.

A presença do alumínio afetou também o número de raízes secundárias, o comprimento da raiz principal, a altura das plantas e área

foliar do primeiro par de folhas totalmente expandido (Quadro 4).

No sistema radicular o alumínio aumentou no número de raízes secundárias, avaliado a partir de amostras de 15 cm terminais da raiz (Quadro 4). Provavelmente, o efeito tóxico de alumínio na destruição das células da região meristemática apical da raiz principal tenha impedido a produção de hormônios que controlam o crescimento de raízes laterais. RENGEL (1992) cita que o alumínio promove redução da síntese e transporte de citocininas nos meristemas da raiz, afeta a direção do movimento de auxinas, favorecendo o transporte acrópeto ao invés do basípeto e aumenta os níveis de ácido abscísico.

As populações que manifestaram maior sensibilidade ao alumínio, UFV 2147 e UFV 2237, com base no peso de matéria seca total e da parte aérea, apresentaram ligeiro aumento no número de raízes secundárias, da ordem de 68% e 20%, respectivamente. Enquanto que as populações que mostraram ser mais tolerantes, UFV 1359 e UFV 2149, apresentaram maior proliferação de raízes secundárias, com percentual de aumento acima de 100% (Quadro 5) sugerindo ser este um possível mecanismo para compensar a restrição na absorção de nutrientes. Resultados semelhantes foram obtidos por BENNET et al. (1985) em plantas de milho tratadas com alumínio, que apresentaram alterações na morfologia da raiz, com maior proliferação de raízes laterais. Segundo SALINAS e SANCHES (1976), a maior extensão radicular pode promover melhor eficiência na absorção de fósforo em solos tropicais.

Considerando que o efeito primário do alumínio é a inibição do crescimento das raízes, que se tornam curtas e grossas, o seu comprimento tem sido a característica mais sensível para avaliar a tolerância ao alumínio, em solução nutritiva, entre cultivares de diversas espécies (FOY et al., 1967; HOWELER e CADAVID, 1976; CAMARGO, 1984).

QUADRO 4 - Médias do Número de Raízes Secundárias nos 15 cm Terminais (NRS), Comprimento da Raiz Principal (CR), Altura de Planta (AP) e Area Foliar do Primeiro Par de Folhas Totalmente Expandido (AF), de Nove Populações de Café, em Resposta a Duas Concentrações de Alumínio em Solução Nutritiva¹

Populações	NRS		CR			AP		AF	
	-AI	+AI	-AI	+AI	Media	-AI	+AI	-AI	+AI
	----- 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
W 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
W 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
UN 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
UN 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	11,78	22,07	56,70 A	47,51 B		13,46	11,04	95,35	67,02

¹ As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na linha, ou minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

QUADRO 5 - Percentuais de Redução do Peso de Matéria Seca da Parte Aérea (PSPA), da Raiz (PSR) e Total (PST), 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 Populações de Café, Submetidas a Dois Níveis de Alumínio

Populações	Características de Crescimento						
	PSPA	PSR	PST	NRS	CR	AP	AF
W 2145	32,44	29,14	31,44	28,85	16,69	13,43	31,77
W 2147	49,26	39,80	46,35	68,41	15,83	30,33	37,35
W 1359	18,69	22,57	19,99	150,01	17,26	12,38	14,49
W 2877	34,52	30,72	33,36	144,73	11,78	13,83	30,68
W 2163	29,23	24,88	27,80	36,84	13,03	20,44	33,72
W 2149	18,43	15,15	17,32	112,12	19,61	7,10	11,14
W 2198	38,80	37,63	38,42	83,33	15,97	19,47	31,05
W 3880	37,39	37,30	37,36	232,15	19,03	12,11	28,81
W 2237	41,36	47,40	43,22	20,52	16,19	29,70	44,11

Os resultados obtidos neste trabalho também mostraram que o comprimento das raízes foi severamente afetado pela presença do alumínio (Quadro 4). Entretanto, não foi possível detectar diferenças significativas entre as populações tanto na ausência como na presença de alumínio. Resultados semelhantes foram obtidos por MARTINEZ e 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.

As populações UFV 1359, UFV 2149 e UFV 3880, apesar de apresentarem porte mais baixo na ausência de alumínio, não foram significativamente afetadas por este íon na concentração de 8 $\mu\text{g/mL}$

(Quadro 4). As maiores reduções na altura das plantas, da ordem de 30%, ocorreram nas populações UFV 2147 e UFV 2237 (Quadro 5). LONDOÑO e VALENCIA A. (1983) consideraram ser a altura da planta a característica mais adequada para medir o efeito do alumínio em plantas de café da variedade Caturra.

O alumínio, na concentração de 8 $\mu\text{g/mL}$, também afetou a área foliar do primeiro par de folhas totalmente expandido (Quadro 4). Para esta característica os dados mostraram a mesma tendência, ou seja, as populações UFV 1359 e UFV 2149 não foram **significativamente** afetadas pelo tratamento com alumínio (Quadro 4), enquanto o oposto foi observado para as populações UFV 2147 e UFV 2237, apresentando reduções de 37% e 44% respectivamente (Quadro 5). MASSOT et al. (1992) também detectaram reduções de 30% na área foliar de cultivares de feijão, sensível ao alumínio.

Pela análise convencional tornou-se difícil uma boa discriminação das populações quanto à tolerância ao alumínio, em função de se analisar cada característica individualmente, mas de uma forma geral, o peso de matéria seca da parte aérea, peso de matéria seca total, altura das plantas e área foliar foram as que possibilitaram, pelo menos, separar as populações tolerantes das demais.

4.2.2. *Interpretação pela Análise Multivariada*

4.2.2.1. *Análise de Componentes Principais*

Os valores das características de crescimento avaliadas, após transformados em percentagem de redução ou aumento causados pelo alumínio, em relação às plantas controles, crescidas na ausência deste

elemento (Quadro 5), foram submetidos à análise *multivariada*.

A tolerância à toxidez de alumínio é um caráter complexo, sendo alcançada pela atuação de diversos fatores, interagindo ao mesmo tempo. Desta forma, em estudos para se identificar a característica mais promissora para separar populações de café quanto à tolerância ao alumínio, técnicas multivariadas como componentes principais e análise de agrupamento podem ser utilizadas.

A análise multivariada com base em componentes principais avalia a dissimilaridade das populações 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, o que foi obtido no presente trabalho viabilizando portanto, a utilização desta técnica. Com apenas os dois primeiros componentes principais, foi possível reunir mais de 85% da variação total disponível, sendo que o primeiro componente responsável por cerca de 68% e o segundo, por 18%, aproximadamente, dessa variação (Quadro 6).

Na Figura 2, está representada a dispersão gráfica no espaço bidimensional das nove populações, utilizando-se o primeiro e o segundo componentes principais, correspondentes aos eixos Y e X, respectivamente. Constata-se que a população UFV 3880 apresentou-se mais distanciada em relação às demais, enquanto que, as populações UFV 2237 e UFV 2147; UFV 2145 e UFV 2877; UFV 1359 e UFV 2149 apresentaram-se menos distanciadas entre si, portanto são mais similares. Estes resultados são coerentes com os obtidos pela técnica de agrupamento, fundamentada na distância Euclidiana Média, apresentados em 4.2.2.2.

O estudo das importâncias relativas das características, para discriminar as populações quanto à tolerância ao alumínio, foi determinado com base nos coeficientes de ponderação (autovetor) das

QUADRO 6 - Estimativas das Variâncias (Autovalores), Explicação e Variação Acumulada Associada aos Componentes Principais, Obtidas a Partir dos Percentuais de Redução ou Aumento das Características de Crescimento Avaliadas em Nove Populações de Café, Submetidas a Dois Níveis de Alumínio

Componentes Principais	Autovalores	Explicação (%)	Vadação Acumulada (%)
CP ₁	4,72840786	67,54869	67,54869
CP ₂	1,23027325	17,57533	85,12402
CP ₃	0,72038686	10,29124	95,41527
CP ₄	0,16156856	2,39384	97,80910
CP ₅	0,11555434	1,65078	99,45988
CP ₆	0,03779404	0,53991	99,99979
CP ₇	0,00001437	0,00020	100,00000

características nos componentes principais (Quadro 7). 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) e MARDIA et al. (1979) recomendam o descarte das características de maior coeficiente (em valor absoluto) a partir do último componente até aquele cujo autovalor não exceda a 0,70. Desta forma, conclui-se que a característica peso de matéria seca total (PST) apresentou a menor importância, seguida, sucessivamente, pelas características de área foliar (AF), peso de matéria seca da parte aérea (PSPA) e altura de planta (AP). Essas características são dispensáveis e, ou, redundantes, em função de apresentarem alta correlação (Quadro 8) com as características mais importantes: percentual de redução no peso de matéria seca de raiz (PSR), aumento do número de raízes secundárias (NRS) e redução no

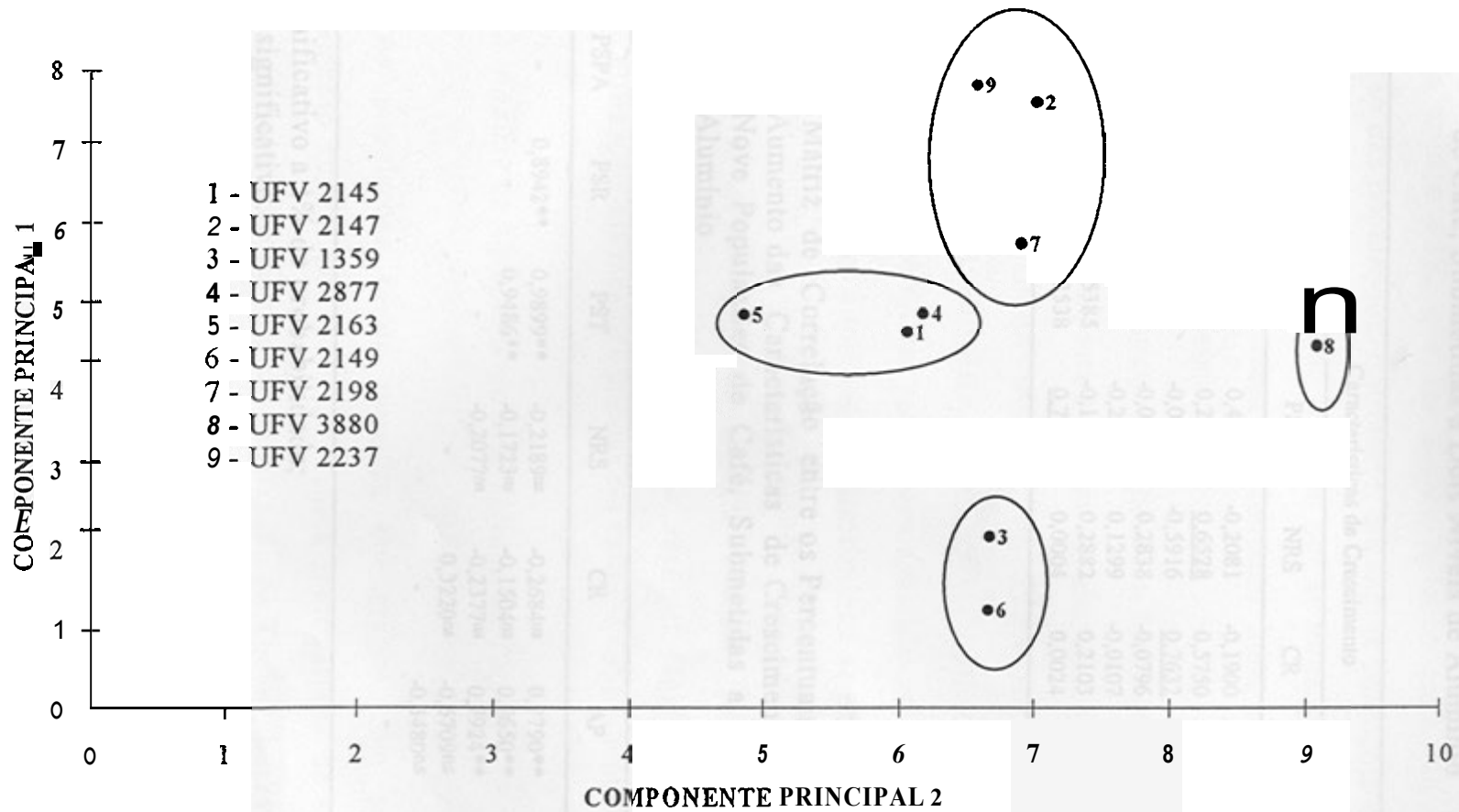


FIGURA 2 - Gráfico de dispersão das nove populações de Café, em Relação aos Seus Escores, nos Dois Primeiros Componentes Principais, Avaliados em Sete Características de Crescimento.

QUADRO 7 - Matriz de Autovetores dos Componentes Principais Associada aos Percentuais de Redução ou Aumento das Características de Crescimento Avaliadas em Nove Populações de Café, Submetidas a Dois Níveis de Alumínio

Componentes Principais	Características de Crescimento						
	PSPA	PSR	PST	NRS	CR	AP	AF
CP ₁	0,4312	0,4182	0,4370	-0,2081	-0,1900	0,4162	<u>0,4422</u>
CP ₂	0,2295	0,3096	0,2610	<u>0,6528</u>	0,5750	-0,1310	-0,0968
CP ₃	-0,0823	0,0184	-0,0541	-0,5916	<u>0,7632</u>	0,2334	-0,0539
CP ₄	-0,0830	-0,0967	-0,0863	0,2838	4,0796	<u>0,8383</u>	-0,4320
CP ₅	-0,6595	0,6043	-0,2757	0,1299	-0,0107	0,0926	0,3135
CP ₆	0,0024	-0,5385	-0,1783	0,2882	0,2103	0,2092	<u>0,7122</u>
CP ₇	-0,5593	-0,2538	<u>0,7891</u>	0,0004	0,0024	0,0001	0,0067

QUADRO 8 - Matriz de Correlação entre os Percentuais de Redução ou Aumento das Características de Crescimento Avaliadas em Nove Populações de Café, Submetidas a Dois Níveis de Alumínio

	PSPA	PSR	PST	NRS	CR	AP	AF
PSPA		0,8942**	0,9899**	-0,2189—	-0,2684ns	0,7790**	0,8595**
PSR			0,9486**	-0,1723—	-0,1504ns	0,7650**	0,8513**
PST				-0,2077ns	-0,2377ns	0,7924**	0,8761**
NRS					0,3220ns	-0,5709ns	-0,4982ns
CR						-0,3480ns	-0,4845ns
AP						-	0,8251**
AF							

** r significativo a 1% de probabilidade;
ns r não-significativo.

comprimento da raiz **principal** (CR). Portanto, são características passíveis de descarte, em função de apresentar uma correlação altamente significativa com o PSR, que foi a característica mais importante na discriminação das populações. Entretanto, em outras condições como, por exemplo, experimentos utilizando solo, em que se torna difícil a avaliação do sistema radicular, elas podem ser bastante úteis na separação de populações tolerantes e sensíveis.

Neste trabalho, as características radiculares, foram as mais sensíveis na detecção do diferencial de resposta à toxidez do alumínio. Isto é amplamente confirmado na literatura (CAMARGO, 1984; FLEMING e FOY, 1968; FURLANI e CLARK, 1981; KERRIDGE et al., 1971; CAMBRAIA et al., 1991).

Dentre as características radiculares avaliadas, a redução no peso de matéria seca de raiz foi a que melhor discriminou as populações quanto à tolerância ao alumínio. Essa é entretanto uma avaliação destrutiva, enquanto que a percentagem de redução causada pelo alumínio no alongamento radicular, além de ser uma variável fácil de ser medida, permite estudos subseqüentes.

4.2.2.2. *Análise de Agrupamento pelo Método de Tocher*

As populações foram reunidas 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 (Quadro 9).

As distâncias estimadas tiveram o valor máximo de 2,5099 entre as populações 6 (UFV 2149) e 9 (UFV 2237), sendo estas as mais dissimilares, e o mínimo de 0,5630 entre as populações 2 (UFV 2147) e 9 (UFV 2237), que foram as mais semelhantes.

QUADRO 9 - Matriz de Distância Euclidiana Média Padronizada entre Nove Populações de Café, em Função do Percentual de Redução ou Aumento Causado pelo Alumínio, em Sete Características de Crescimento Avaliadas

Populações*	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1,2724	1,1651	0,9779	0,6905	1,3778	0,6425	1,2416	1,2608
2	-	2,0974	1,3676	1,3517	2,4332	0,7557	1,4744	0,5630
3			1,3180	1,2906	0,5772	1,4264	1,3368	2,1784
4			-	0,7882	1,7628	0,8421	1,2321	1,5157
5					1,6339	0,8939	1,6039	1,3614
6					-	1,7747	1,6444	2,5099
7							0,9977	0,8688
8								1,6478

*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).

Os grupos foram formados, utilizando-se, como referencial, a distância máxima entre o conjunto de menores distâncias entre cada população. O valor do limite máximo para a inclusão de uma população no grupo, com referência às distâncias mínimas, foi de 0,9977.

Em decorrência da análise por este método, foram formados quatro grupos distintos quanto à tolerância ao alumínio (Quadro 10). Cada grupo exibiu diferenças marcantes em relação aos outros, com respeito à todas as características medidas. As médias dos grupos, para as características avaliadas, são mostradas no Quadro 10.

O grupo I, representado pelas populações UFV 2147, UFV 2237 e UFV 2198, apresentou os maiores percentuais de redução no peso de matéria seca, da parte aérea (PSPA), raiz (PSR) e total (PST); altura de planta (AP) e área foliar (AF), sendo este o grupo de maior sensibilidade ao alumínio.

O grupo II foi o que apresentou os menores percentuais de redução nas características avaliadas, sendo as populações UFV 1359 e

QUADRO 10 - 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 de Crescimento Avaliadas e Respectivas Médias por Grupo Formado, de Nove Populações de Café

Grupos	Populações*	Características de Crescimento						
		PSPA	PSR	PST	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
N	8	37,39	37,30	37,36	232,15	19,03	12,11	28,81

*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).

UFV 2149 [REDACTED] alumínio na concentração de $8\mu\text{g/mL}$. Os grupos I e II apresentaram as maiores distâncias intergrupos, com medida de 2,070 (Quadro 11), contendo, portanto, as populações mais divergentes.

Os grupos III e IV apresentaram médias intermediárias entre ao grupos II (tolerante) e I (sensível) (Quadro 10). Entretanto o grupo IV, representado pela população UFV 3880, apresentou maiores reduções no comprimento da raiz principal, peso de matéria seca da parte aérea, raízes e total, que o grupo III. O grupo IV apresentou, também, maior distância (1,491) em relação ao grupo II (tolerante) que o grupo III (1,425) (Quadro 11), sendo, portanto, classificado como moderadamente sensível e o grupo III moderadamente tolerante.

[REDACTED]
[REDACTED]

QUADRO 11 - Distâncias Médias Intra e Intergrupos de Nove Populações de Café, com Base no Agrupamento pelo Método de Tocher, Proveniente da Avaliação de Sete Características de Crescimento

Grupos	Populações*	I	II	m	IV
I	2, 9, 7	0,729	2,070	1,168	1,373
II	3, 6		0,577	1,425	1,491
III	1, 5, 4			0,819	1,359
IV	8				

*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).

4.3. Efeito do Alumínio sobre a Composição Química das Plantas

A menor produção de matéria seca da parte aérea e do sistema radicular na presença do alumínio refletiu o efeito marcante deste íon, sobre a absorção, translocação e uso eficiente de fósforo e de cálcio, nas diversas partes em que a planta foi dividida. A distribuição e o acúmulo do alumínio nas populações de café estudadas foi significativamente diferente.

As análises químicas das plantas quanto à fósforo, cálcio e alumínio foram realizadas com o intuito de elucidar os possíveis mecanismos fisiológicos envolvidos, considerando o grau de tolerância estabelecido pelo agrupamento em função das características de crescimento, uma vez que, as alterações ocorridas na composição química são refletidas pelo crescimento da planta.

Os agrupamentos das populações, pelo método de Tocher, quanto a redução no conteúdo e na eficiência de utilização de fósforo e cálcio foram realizados com o objetivo de resumir as informações, facilitar e simplificar a interpretação dos dados, separando as populações em grupos

que refletem de forma diferenciada os efeitos tóxicos do alumínio quanto ao acúmulo e eficiência de uso destes nutrientes.

Nas nove populações estudadas, a presença de alumínio alterou a concentração (Quadro 12), o conteúdo (Quadro 13) e a eficiência de utilização de fósforo (Quadro 15), nas diversas partes em que a planta foi dividida.

QUADRO 12 - Concentração de Fósforo em Folhas Superiores, Inferiores e Raízes das Plantas de Nove Populações de Café, em Resposta a Duas Concentrações de Alumínio em Solução Nutritiva¹

Populações	Folha Superior		Folha Inferior		Raiz	
	-Al	+Al	-Al	+Al	-Al	+Al
	----- dag/kg -----					
UFV 2147	0,270 bcA	0,210 aB	0,180 aA	0,113 bcdB	0,283	0,300
UFV 1359	0,273 bA	0,217 aB	0,173 aA	0,117 bcdB	0,280	0,313
UFV 2877	0,270 bcA	0,200 aB	0,173 aA	0,117 bcdB	0,297	0,340
UFV 2163	0,280 abA	0,233 aB	0,187 aA	0,133 aB	0,283	0,323
UFV 2149	0,290 aA	0,217 aB	0,177 aA	0,107 dB	0,280	0,313
UFV 2198	0,257 cdA	0,223 aB	0,183 aA	0,110 cdB	0,277	0,330
UFV 3880	0,267 bcA	0,233 aA	0,183 aA	0,120 bcB	0,253	0,317
UFV 2237	0,243 dA	0,230 aA	0,163 aA	0,123 abB	0,270	0,327
Media	0,266	0,221	0,178	0,118	0,279B	0,321A

¹ As médias se cula na linha, ou minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste Duncan, a 5% de probabilidade.

As populações apresentaram diferenças marcantes quanto à concentração do fósforo nos componentes da planta (Quadro 12). Na presença de alumínio, houve reduções médias de 16,5% e 33,9% em folhas superiores e inferiores, respectivamente. Maiores reduções em folhas

QUADRO 13 - Conteúdo de Fósforo na Parte Aérea, Raízes e Total das Plantas de Nove Populações de Café e Respetivos Percentuais de Redução em Resposta a Duas Concentrações de Alumínio em Solução Nutritiva¹

Populações	Parte Aérea			Raiz			Total		
	-Al	+Al	Redução	-Al	+Al	Redução	-Al	+Al	Redução
	----- mg/planta -----		--%--	----- mg/planta -----		--%--	----- mg/planta -----		--%--
UFV 2145	5,009 abA	2,762 aB	43,77	3,124	2,512	19,7	8,132 abA	5,273 aB	34,48
UFV 2147	5,235 aA	2,115 aB	59,35	3,436	2,168	33,5	8,671 aA	4,283 aB	49,67
UFV 1359	3,495 eA	2,359 aB	31,35	2,519	2,197	17,4	6,014 cA	4,555 aA	22,66
UFV 2877	3,885 deA	2,261 aB	39,69	3,020	2,402	19,91	6,870 bcA	4,663 aB	31,74
UFV 2163	4,137 cdeA	2,497 aB	39,63	2,980	2,537	13,87	7,117 bcA	5,034 aB	29,19
UFV 2149	4,251bcdeA	2,555 aB	40,02	2,957	2,794	12,17	7,558 abA	5,350 aB	25,69
UFV 2198	4,498abcdA	2,118 aB	52,47	2,852	2,122	25,69	7,350 abcA	4,240 aB	42,12
UFV 3880	4,669abcdA	2,274 aB	51,13	2,889	2,250	21,72	7,558 abA	4,524 aB	39,95
UFV 2237	4,719 abcA	2,468 aB	48,69	2,961	1,855	36,84	7,702 abA	4,323 aB	44,18
Média	4,432	2,379		2,971 A	2,315 B		7,402	4,694	

¹ As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na linha, ou **minúscula** na coluna, não diferem pelo teste Duncan, a 5% de probabilidade.

inferiores, provavelmente, se deve a melhor suprimento de fósforo para as regiões de metabolismo mais intenso, onde observou-se menor redução na concentração de fósforo. RAJU et al. (1987) relataram que plantas mais eficientes no uso do fósforo apresentam maiores taxas de retranslocação (fósforo em folhas superiores/fósforo em folhas inferiores), mostrando maior redistribuição do fósforo de tecidos velhos e inativos para tecidos jovens em desenvolvimento.

Nas raízes, por sua vez, o teor de fósforo elevou-se 15,4%, na presença de alumínio (Quadro 12). Os resultados indicam que reduções na concentração deste elemento nas folhas superiores e inferiores, estão associados com o acúmulo deste elemento nas raízes. Esses resultados sugerem a ocorrência de precipitação de fosfato de alumínio nos tecidos radiculares. Resultados similares têm sido reportados na literatura, para várias espécies de plantas (WRIGHT, 1943; CLARKSON, 1969; BENNET et al., 1986; PAVAN e BINGHAM, 1982a), que admitiram, além de uma precipitação interna, uma interferência na translocação desse elemento para a parte aérea das plantas. WRIGHT (1943) e CLARKSON (1977) sugerem que, pelo menos nos estágios iniciais, a maior parte do alumínio incorporado pelas raízes liga-se a sítios de adsorção na parede celular, e sobre essas superfícies o fosfato se precipita. Seja por precipitação nos espaços livres, seja por adsorção-precipitação na superfície das paredes celulares, ocorreu um impedimento da movimentação do fósforo dos tecidos radiculares.

A absorção de nutrientes, principalmente fósforo, é influenciada pela morfologia na raiz (FLEMING e FOY, 1968; CLARK, 1977). Os efeitos do alumínio restringindo o comprimento e alterando a estrutura das raízes podem ser considerados um possível mecanismo para restringir a absorção de fósforo. Entretanto, em solução nutritiva, alterações ocorridas

no sistema radicular não parecem ser o principal fator das mudanças ocorridas na composição das plantas submetidas ao estresse de alumínio, uma vez que o transporte de fósforo para a parte aérea foi mais afetado do que a própria absorção, em função das possíveis reações de adsorção-precipitação de fósforo nas raízes, reduzindo a translocação para a parte aérea. Resultados semelhantes foram obtidos por BENNET et al. (1986).

Estudos têm mostrado que a ação indireta do alumínio sobre o transporte de fósforo está relacionada com o declínio na atividade respiratória das raízes, na presença do alumínio (BENNET et al., 1986; LOUGHMAN, 1981). Segundo BENNET et al. (1986), a habilidade de diferentes cultivares de milho em manter a respiração radicular na presença do alumínio, coincidiu com cultivares eficientes em transportar fósforo para a parte aérea.

Pela concentração de fósforo, nos diversos componentes da planta, não foi possível estabelecer uma ordem de tolerância ao alumínio, entretanto, menores reduções na concentração de fósforo em folhas superiores foram observadas nas populações UFV 2145, UFV 3880 e UFV 2237. Nas raízes o menor aumento na concentração de fósforo (6%) foi observado pela população UFV 2147 (sensível), enquanto que a população UFV 3880 apresentou 25,3% de aumento na concentração de fósforo.

O alumínio reduziu significativamente o conteúdo de fósforo da parte aérea, raízes e da planta como um todo (Quadro 13).

Verifica-se que na ausência de alumínio, as populações apresentaram diferenças no conteúdo de fósforo tanto da parte aérea, assim como, na planta toda. Entretanto, este metal atua igualando a resposta das nove populações. Desta forma, quando se analisa a inibição causada pelo alumínio, no conteúdo de fósforo, observa-se que as maiores reduções ocorreram na parte aérea e na planta como um todo (Quadro

13). Em função das possíveis reações de adsorção-precipitação, a redução no conteúdo de fósforo na raiz foi menos acentuada.

O agrupamento das populações, pelo método de Tocher, em função do percentual de redução no conteúdo de fósforo causado pelo alumínio, permitiu reunir as populações em quatro categorias, com padrão de comportamento similar (Quadro 14).

Não foi observada redução significativa na eficiência de utilização

QUADRO 14 - Agrupamento de Nove Populações de Café, pelo Método de Otimização de Tocher, Baseado na Distância Euclidiana Média, em Função do Percentual de Redução no Conteúdo de Fósforo e Respectivas Médias, por Grupo Formado, das Características Avaliadas

Grupos	Populações*	Conteúdo de Fósforo			Média Geral
		Parte Aérea	Raiz	Total	
I	5, 6, 4, 1	40,78	16,41	30,27	29,15
n	7, 8	51,80	23,70	41,03	38,84
III	2, 9	54,02	35,21	46,92	45,38
IV	3	31,35	17,49	22,66	23,83

*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).

O grupo III, representado pelas populações UFV 2147 e UFV 2237, foi o que apresentou maior percentual de redução no conteúdo de fósforo, em média 45,4%, e estas foram também as populações que apresentaram maior sensibilidade ao alumínio, segundo as características de crescimento.

A população UFV 1359 (tolerante) apresentou menor redução no conteúdo de fósforo (23,8%). O grupo I contém as populações que, segundo as características de crescimento, foram classificadas como

moderadamente tolerante, apresentando uma redução média de 29,2% no conteúdo de fósforo. Segundo BALIGAR et al. (1993), para genótipos de sorgo sensíveis e tolerantes ao alumínio, características de absorção de nutrientes, influxo nas raízes, transporte de nutrientes para parte aérea e inibição na absorção, permitiu discriminação. Os genótipos sensíveis apresentaram em média 80% de redução na absorção de fósforo e os tolerantes 23%.

Não foi observada redução significativa na eficiência de utilização de fósforo na parte aérea, com exceção das populações UFV 2163, UFV 3880 e UFV 2237 (Quadro 15). Nas raízes ocorreu uma redução generalizada, não sendo constatada diferença significativa entre as populações. Por outro lado, a eficiência de utilização de fósforo da planta toda, permitiu discriminar as populações mais tolerantes, UFV 2145, UFV 1359 e UFV 2149, das demais, nas quais não se observou redução significativa na eficiência de utilização de fósforo na presença do alumínio (Quadro 15).

Apesar de o alumínio atuar igualando a resposta das nove populações, quando se analisa a redução na eficiência de utilização de fósforo, nas diversas partes da planta (Quadro 15), observa-se que as populações apresentam comportamentos bastante distintos em função do tratamento com alumínio. Menor redução foi verificada pela população UFV 2149 que, inclusive na parte aérea, apresentou aumento na eficiência de utilização de fósforo. Maiores reduções estão relacionadas as populações que apresentaram também maior sensibilidade ao alumínio, UFV 2147, UFV 2237, seguida da população UFV 3880.

O agrupamento, segundo o Método de Tocher, discriminou as populações em cinco grupos (Quadro 16). No grupo I estão as populações que apresentaram maior sensibilidade ao alumínio, enquanto que no grupo V, seguido pelo grupo II, encontram-se aquelas mais tolerantes.

QUADRO 15 - Eficiência de Utilização de Fósforo na Parte Aérea, Raizes e Total das Plantas de Nove Populações de Café e Respeitvas Reduções em Resposta a Duas Concentrações de Alumínio em **Solução** Nutritiva¹

Populações	Parte Aérea			Raiz			Total		
	-Al	+Al	Redução	-Al	+Al	Redução	-Al	+Al	Redução
	----- (mg materia seca) ² /mg P -----								
UFV 2145	939,19 abA	784,27 aA	154,92	379,14	237,85	141,29	1304,83 abcA	953,45 aA	351,38
UFV 2147	988,74 aA	686,09 aA	302,65	421,16	241,89	179,27	1390,73 aA	867,62 aE	523,11
UFV 1359	681,05 cA	672,68 aA	8,37	324,16	223,33	100,83	995,07 dA	843,64 aA	151,43
UFV 2877	716,02 cA	748,81 aA	32,79	346,14	207,85	138,29	1046,55 cdA	862,96 aE	183,59
UFV 2163	732,88 cA	636,57 aB	96,31	369,92	246,07	123,85	1093,71 cdA	834,49 aE	259,22
UFV 2149	749,55 cA	831,70 aA	-82,15	377,23	287,53	89,70	1119,30 cdA	1033,33 aA	85,97
UFV 2198	799,22 bcA	643,36 aA	155,86	372,77	194,67	178,10	1165,27abcdA	772,34 aB	392,93
UFV 3880	858,98abcA	645,23 aB	213,75	452,47	228,43	224,04	1308,48 abcA	820,86 aB	487,62
UFV 2237	947,23 abA	662,14 aB	285,09	406,17	180,76	225,41	1342,75 abA	795,27 aB	547,48
Media	823,64	701,20		383,24A	227,60B		1196,30	864,88	

¹ As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na linha, ou minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste Duncan, a 5% de probabilidade.

QUADRO 16 - Agrupamento de Nove Populações de Café, pelo Método de Otimização de Tocher, Baseado na Distância Euclidiana Média, em Função da Redução na Eficiência de Utilização de Fósforo e Respectivas Médias, por Grupo Formado, das Características Avaliadas

Grupos	Populações*	Eficiência de Utilização de Fósforo			Media Geral
		Parte Aérea	Raiz	Total	
I	2, 9, 8	267.16	209,57	519.40	332,04
II	3, 4	20.58	119,56	167,51	102,55
III	1,7	155.39	159,69	372.15	229,08
IV	5	96,31	123,85	259.22	159,79
V	6	-82,15	89.70	85.97	31.17

*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).

Neste trabalho, a tolerância mostrou estar associada à maior eficiência no uso do fósforo na presença do alumínio, menor redução na translocação deste nutriente. uma vez que, o conteúdo de fósforo na parte aérea foi mais reduzido do que o conteúdo nas raízes, e à menor precipitação do fósforo nos tecidos radiculares. Esses resultados concordam com aqueles obtidos por PAVAN e BINGHAM (1982a).

Segundo BALIGAR et al. (1993), genótipos de sorgo tolerantes apresentaram maior potencial para produzir matéria seca, principalmente porque eles tinham maior eficiência na absorção e transporte de fósforo quando submetidos ao estresse de alumínio.

Em certos cultivares de trigo, tomate e milho, a tolerância ao alumínio coincide com a habilidade de tolerar baixos níveis de fósforo na solução nutritiva, tanto na ausência, assim como na presença de alumínio (FOY et al., 1978).

A toxidez de alumínio implicou em redução na concentração (Quadro 17), no conteúdo (Quadro 18) e na eficiência de utilização de cálcio (Quadro 20), nos diversos componentes da planta.

QUADRO 17 - Concentração de Cálcio em Folhas Superiores, Inferiores e Raízes das Plantas de Nove Populações de Café, em Resposta a Duas Concentrações de Alumínio em Solução Nutritiva¹

Populações*	Folha Superior		Folha Inferior		Raiz	
	-Al	+Al	-Al	+Al	-Al	+Al
----- dag/kg -----						
UFV 2145	1,257aA	0,893 abB	1,887 aA	1,207 aB	0,347 cdA	0,313 aA
UFV 2147	1,133bA	0,837 bcB	1,740bcA	1,150 aB	0,430 bcA	0,293 aB
UFV 1359	1,200bA	0,833 bcB	1,667 cA	1,267 aB	0,507 abA	0,360 aB
UFV 2877	1,267aA	0,773 cB	1,843abA	0,833 aB	0,523 aA	0,340 aB
UFV 2163	1,137bA	0,950 aB	1,793abA	1,377 aB	0,313 dA	0,297 aA
UFV 2149	1,190bA	0,887 abB	1,843abA	1,233 aB	0,380 cdA	0,313 aB
UFV 2198	1,217aA	0,833 bcB	1,883 aA	1,257 aB	0,387 cdA	0,317aA
UFV 3880	1,040cA	0,890 abB	1,533 dA	1,177 aB	0,420 cA	0,310 aA
UFV 2237	1,250 aA	0,793 bcB	1,850abA	1,100 aB	0,390 cdA	0,320 aA
Média	1,188	0,854	1,782	1,178	0,411	0,318

¹ As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na linha, ou minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste Duncan, a 5% de probabilidade.

A concentração de cálcio nas folhas inferiores apresentou tendência de ser maior, do que a observada nas folhas superiores. Entretanto, em ambas as partes ocorreu redução nos teores de cálcio quando as plantas foram submetidas ao estresse de alumínio. A população UFV 2237 (sensível) apresentou maiores quedas na concentração de cálcio nas folhas superiores (36,6%) e inferiores (40,5%). Nas raízes, foi

QUADRO 18 - Conteúdo de Cálcio na Parte Aérea, Raizes e Total das Plantas de Nove Populações de Café e Respetivos Percentuais de Redução em Resposta a Duas Concentrações de Alumínio em Solução Nutritiva¹

Populações	Parte Aérea			Raiz			Total		
	-Al	+Al	Redução	-Al	+Al	Redução	-Al	+Al	Redução
	mg/planta -----		-- % --	---- mg/planta ----		-- % --	--- mg/planta -----		-- o/, --
UFV 2145	29,797 aA	14,572 aB	50,32	3,774	2,395	35,97	33,571 abA	16,968 aB	48,77
UFV 2147	29,828 aA	11,457 aB	60,87	5,223	2,120	57,27	34,052 aA	13,577 aB	60,43
UFV 1359	20,629 cA	12,163 aB	40,44	4,660	2,519	39,03	25,298 dA	14,681 aB	40,70
UFV 2877	23,176 cA	10,251 aB	54,55	5,324	2,398	54,65	28,499 bcdA	12,649 aB	54,84
UFV 2163	23,740 bcA	13,758 aB	41,93	3,290	2,327	28,80	27,030 cdA	16,086 aB	40,34
UFV 2149	25,317 abcA	14,650 aB	42,15	4,010	2,839	28,75	29,326abcdA	17,489 aB	40,30
UFV 2198	25,467 abcA	11,458 aB	54,76	3,992	2,042	28,74	29,458 abcdA	13,500 aB	53,86
UFV 3880	23,937 bcA	11,910 aB	50,26	4,790	2,246	53,50	28,499 bcdA	14,156 aB	50,80
UFV 2237	28,592 abA	11,783 aB	59,49	4,290	1,818	56,91	32,883 abcA	13,607 aB	59,23
Media	25,609	12,445		4,373A	2,301B		29,982	14,746	

¹ As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na linha, ou minúscula na coluna, **não** diferem entre si, pelo teste Duncan, a **5%** de probabilidade.

observada redução significativa na concentração de cálcio, apenas para as populações UFV 2147, UFV 1359, UFV 2877 e UFV 2149.

A redução na concentração de cálcio nas folhas pode ser atribuída ao efeito direto de alumínio na absorção deste nutriente pelas raízes, uma vez que a translocação parece não ter sido tão severamente afetada, como será mostrado adiante.

O alumínio pode reduzir a quantidade de cálcio associado ao espaço livre e também o seu movimento através da plasmalema (CLARKSON e SANDERSON, 1971). O papel do cálcio, na manutenção da integridade das membranas, na formação e estrutura da parede celular (RENGEL, 1992), sugere a possibilidade de que a injúria provocada pelo alumínio, resulte da substituição do cálcio por este elemento na plasmalema, alterando a configuração estrutural e decrescendo a permeabilidade (RENGEL e ROBINSON, 1989b). HUANG et al. (1992) sugeriram que a inibição no influxo de cálcio através da plasmalema é possivelmente via bloqueio dos canais de cálcio, enquanto que CAMBRAIA et al. (1987) relatam que a redução no acúmulo de cations na parte aérea e no sistema radicular de cultivares de sorgo está associada a um efeito inibitório do alumínio sobre a atividade de uma ATPase catiônica da membrana plasmática, que atuaria no transporte de cations através dessa membrana.

A concentração de cálcio nas folhas superiores reduziu-se, em média, de 1,19% para 0,85%, enquanto que nas folhas inferiores esse decréscimo foi de 1,78% para 1,18%. MALAVOLTA et al. (1979) citam que uma concentração de cálcio em folhas do cafeeiro de 1,01% seria suficientemente baixa para não suportar uma ótima produção de café. Portanto, os resultados obtidos neste experimento, acerca dos efeitos dos ions de alumínio na absorção de cálcio, indicam que o excesso

de alumínio pode ser importante na indução da deficiência de cálcio e, conseqüentemente, na diminuição

FOY et al. (1969), tra

MASSOT et al. (1992) com três variedades de feijão, encontraram que a toxidez de alumínio foi associada com uma concentração reduzida de cálcio na parte aérea e raízes, e que a inibição na absorção deste nutriente, pelo efeito do alumínio, foi mais pronunciado na variedade susceptível do que na tolerante.

Para os diversos componentes da planta, o alumínio reduziu significativamente o conteúdo de cálcio entretanto este íon atua igualando a resposta das nove populações (Quadro 18). Na ausência de alumínio, estas apresentam comportamentos bastante distintos para o conteúdo na parte aérea e da planta toda. Desta forma, o percentual de redução no conteúdo de cálcio, permitiu uma boa discriminação das populações.

Foram observadas reduções da ordem de 60% no conteúdo de cálcio da parte aérea para as populações sensíveis, UFV 2147 e UFV 2237. Enquanto que nas tolerantes reduções de 40,4% (UFV 1359) e 42,2% (UFV 2149) (Quadro 18).

O agrupamento das populações em função da redução no conteúdo de cálcio encontra-se no Quadro 19.

O grupo II apresentou maiores quedas no conteúdo da parte aérea, raízes e da planta como um todo, com redução média de 57,6%. Neste grupo estão as populações de maior sensibilidade ao alumínio. Enquanto nos grupos I e IV estão as populações mais tolerantes, com reduções de 37,0% e 40,0% respectivamente. BALIGAR et al. (1993) constatou que genótipos de sorgo tolerantes apresentaram em média 48% de inibição na absorção de cálcio, enquanto que os sensíveis 89%.

QUADRO 19 - Agrupamento de Nove Populações de Café, pelo Método de Otimização de Tocher, Baseado na Distância Euclidiana Média, em Função do Percentual de Redução no Conteúdo de Cálcio e Respectivas Médias, por Grupo Formado, das Características Avaliadas

Grupos	Populações*	Conteúdo de Cálcio			Média Geral
		Parte Aérea	Raiz	Total	
I	5, 6	42,04	28,77	40,32	37,04
II	2, 9, 4	58,30	56,28	58,16	57,58
III	1, 7	52,54	32,35	51,31	45,40
IV	3	40,44	39,03	40,70	40,06
V	8	50,26	53,50	50,80	51,52

*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).

A tolerância do alumínio entre certas variedades de trigo, cevada, soja e feijão parece estar associada com diferentes capacidades das plantas em absorver ou transportar cálcio na presença de alumínio (FOY e FLEMING, 1978).

Em café a tolerância parece estar relacionada, além da menor redução na absorção de cálcio, com aumento na eficiência de utilização deste nutriente, na presença de alumínio, ou seja, a redução na absorção é compensada pela maior conversão em biomassa.

As populações tolerantes, UFV 1359 e UFV 2149, apresentaram aumento na eficiência de utilização de cálcio em todos os componentes da planta, enquanto o contrário foi observado para as populações sensíveis, UFV 2147 e UFV 2237 (Quadro 20).

Em função da queda ou aumento na eficiência de utilização de cálcio (Quadro 20) fez-se o agrupamento das populações, que permitiu separar aquelas que apresentaram aumento, UFV 1359, UFV 2149 e UFV

QUADRO 20 - Eficiência de Utilização de Cálcio na Parte Aérea, Raízes e Total das Plantas de Nove Populações de Café e Respectivas Reduções em Resposta a Duas Concentrações de Alumínio em Solução Nutritiva¹

Populações	Parte Aérea			Raiz				Total		
	-Al	+Al	Redução	-Al	+Al	Média	Redução	-Al	+Al	Redução
----- (mg matéria seca) ² /mg P -----										
UFV 2145	157,92 abcA	148,24 aA	9,68	315,31	248,52	281,92 ab	66,79	316,04 abA	295,96 aA	20,08
UFV 2147	172,99 aA	126,56 aA	46,43	217,23	244,52	262,87 ab	28,71	344,07 aA	273,71 aA	70,36
UFV 1359	115,46 dA	130,57 aA	-15,11	178,54	195,50	187,02 d	-16,96	236,63 bA	261,75 aA	-25,12
UFV 2877	118,84 cdA	174,44 aA	-55,60	195,92	210,26	203,09 cd	-14,34	252,13 bA	331,56 aA	-79,43
UFV 2163	127,74 bcdA	115,62 aA	12,12	334,85	268,31	301,58 a	66,54	288,05 abA	261,05 aA	27,00
UFV 2149	125,84 cdA	144,94 aA	-19,10	278,88	284,63	281,76 ab	-5,75	275,16 abA	316,88 aA	-41,72
UFV 2198	141,06abcdA	119,18 aA	21,88	269,37	202,59	235,98 bcd	66,78	290,85 abA	243,08 aA	47,77
UFV 3880	167,51 abA	123,36 aB	44,15	275,79	230,02	252,90 abc	48,77	344,68 aA	262,54 aB	82,14
UFV 2237	157,03 abcA	138,92 aA	18,11	280,41	186,58	233,49 bcd	93,83	314,51 abA	253,06 aA	61,45
Média	142,71	135,76		267,37A	230,55B		295,79	277,73		

¹ As médias seguidas de pelo menos **uma** mesma letra maiúscula na linha, ou minúscula na **coluna**, **nao** diferem entre si, pelo teste Duncan, a **5%** de probabilidade.

2877 das demais, onde observou-se redução na eficiência de conversão em biomassa (Quadro 21).

QUADRO 21 - Agrupamento de Nove Populações de Café, pelo Método de Otimização de Tocher, Baseado na Distância Euclidiana Média, em Função da Redução na Eficiência de Utilização de Cálcio e Respectivas Médias, por Grupo Formado, das Características Avaliadas

Grupos	Populações*	Eficiência de Utilização de Cálcio			Media Geral
		Parte Aérea	Raiz	Total	
I	1, 5, 7, 9	15,45	73,48	39,07	42,67
II	3, 6	-17,10	-11,35	-33,42	-20,62
III	2, 8	45,29	37,24	76,25	52,93
IV	4	-55,60	-14,34	-79,43	-49,79

*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).

Numerosas evidências indicam que a tolerância de algumas plantas ao alumínio está relacionada com a capacidade delas absorverem e metabolizarem o fósforo e o cálcio na presença do alumínio. Desta forma, plantas tolerantes seriam aquelas capazes de absorver mais ou utilizar mais eficientemente o fósforo e o cálcio (FOY et al., 1972; CLARK, 1977).

O agrupamento, envolvendo concomitantemente o percentual de redução no conteúdo de fósforo e de cálcio, discriminou as populações, em quatro grupos (Quadro 22).

O grupo I, com percentual médio de redução no conteúdo de fósforo e cálcio de 31,9%, confirmando a maior tolerância das populações UFV 1359 e UFV 2149, sendo neste caso, incluído a UFV 2163 que, pelas

QUADRO 22 - Agrupamento de Nove Populações de Café, pelo Método de Otimização de Tocher, Baseado na Distância Euclidiana Média, em Função do Percentual de Redução no Conteúdo de Fósforo e de Cálcio, e Respectivas Médias, por Grupo Formado, das Características Avaliadas

Grupos	Populações*	Fósforo			Cálcio			Média Geral
		Parte Aérea	Raiz	Total	Parte Aérea	Raiz	Total	
I	5, 6, 3	37,00	14,51	25,85	41,51	32,19	40,45	31,92
II	2, 9	54,02	35,21	46,93	60,18	57,09	59,82	52,21
III	4, 8	45,41	20,82	35,85	52,41	54,08	52,82	43,57
IV	1, 7	48,12	22,70	38,30	52,54	32,36	51,32	40,89

*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).

características de crescimento, era classificada como moderadamente tolerante.

As populações UFV 2147 e UFV 2237, com redução média de 52,2%, apresentaram maior sensibilidade ao alumínio, concordando com os resultados obtidos para outras características avaliadas. As demais apresentaram tolerância intermediária.

PAVAN e BINGHAM (1982a) constataram que a taxa de absorção de cálcio, magnésio, manganês, ferro e fósforo diminuíram progressivamente como aumento da concentração de alumínio na solução, de plantas de café da variedade Catuaí Vermelho (H 2077-2-5-99), correspondente a população UFV 2147 (sensível), utilizada neste experimento. Estes autores verificaram, também, redução na translocação de fósforo e de cálcio para a parte aérea.

A eficiência de translocação de fósforo, dada pela proporção do elemento alocada na parte aérea, sofreu redução significativa na presença do alumínio (Quadro 23). Entretanto para o cálcio não foi observado efeito do alumínio na translocação (Quadro 24).

QUADRO 23 - Eficiência de Translocação de Fósforo (EFT) e de Enraizamento (EFR) das Plantas de Nove Populações de Café, em Resposta a Duas Concentrações de Alumínio em Solução Nutritiva¹

Populações*	EFT			EFR		
	-Al	+Al	Média	-Al	+Al	Média
UFV 2145	0,617	0,524	0,570 ab	133,7	144,9	139,3 bc
UFV 2147	0,609	0,493	0,551 abc	137,8	169,3	153,6 a
UFV 1359	0,581	0,518	0,550 bc	149,6	153,8	151,7 ab
UFV 2877	0,558	0,485	0,521 c	150,0	151,5	150,8 abc
UFV 2163	0,582	0,496	0,539 bc	147,2	156,5	151,9 ab
UFV 2149	0,590	0,476	0,533 bc	146,2	167,1	156,8 a
UFV 2198	0,611	0,500	0,556 abc	140,4	151,4	145,9 abc
UFV 3880	0,618	0,502	0,561 abc	150,7	157,6	154,1 a
UFV 2237	0,616	0,565	0,590 a	142,2	133,5	137,8 c
Média	0,598 A	0,507 B		144,2 B	154,0 A	

¹ As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na linha, ou minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste Duncan, a 5% de probabilidade.

QUADRO 24 - Eficiência de Translocação de Cálcio (EFT) e de Enraizamento (EFR) das Plantas de Nove Populações de Café, em Resposta a Duas Concentrações de Alumínio em Solução Nutritiva¹

Populações*	EFT			EFR		
	-Al	+Al	Média	-Al	+Al	Média
UFV 2145	0,887	0,859	0,873 a	32,50	45,17	38,83 bc
UFV 2147	0,853	0,844	0,848 abc	34,13	53,37	43,75 abc
UFV 1359	0,819	0,827	0,823 cd	35,59	47,78	41,68 abc
UFV 2877	0,811	0,805	0,808 d	36,26	58,11	47,18 a
UFV 2163	0,878	0,855	0,867 a	38,79	48,96	43,87 a
UFV 2149	0,863	0,839	0,851 ab	35,99	51,51	43,75 ab
UFV 2198	0,865	0,849	0,857 ab	35,10	47,58	41,34 abc
UFV 3880	0,834	0,843	0,839 bc	39,69	50,45	45,07 a
UFV 2237	0,870	0,862	0,866 a	33,20	42,93	38,06 c
Média	0,853	0,843		35,70 B	49,54 A	

¹ As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na linha, ou minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste Duncan, a 5% de probabilidade.

A menor translocação de fósforo está relacionada ao acúmulo deste elemento nas raízes. ASP et al. (1991) constataram maior concentração de fósforo nas camadas mais externas do córtex, formando complexo Al-P ou precipitados de fosfato de alumínio. McCORMICK e BORDEN (1974) observaram que os precipitados de fosfato de alumínio ocorriam na forma de glóbulos na superfície radicular e nas regiões intercelulares das raízes de cevada.

BENNET et al. (1986) relataram que a translocação de fósforo e potássio para a parte aérea foi mais afetada do que a própria absorção, em dois cultivares de milho. Por outro lado, esses autores observaram que o transporte de cálcio não foi alterado pela presença de alumínio, a semelhança do obtido neste trabalho.

Houve maior eficiência de enraizamento, na presença de alumínio, tanto em relação ao fósforo, quanto em relação ao cálcio (Quadro 23 e 24). Tal fato pode ser atribuído a uma estratégia da planta em aumentar a produção de matéria seca de raiz por miligrama do nutriente absorvido, numa condição de estresse, uma vez que o alumínio afetou drasticamente o comprimento e a morfologia do sistema radicular das plantas de café.

Apesar de a parte aérea ter sido ligeiramente mais prejudicada pelo alumínio, em função da maior redução na produção de matéria seca e na absorção de fósforo e cálcio, foi observado maior acúmulo deste elemento no sistema radicular (Quadro 25).

A presença de alumínio, nas plantas crescendo na ausência deste elemento, é atribuída à contaminação, mais provavelmente da areia utilizada na produção das mudas, da água deionizada ou dos reagentes utilizados no preparo das soluções nutritivas, o mesmo foi constatado por WHEELER et al. (1992). trabalhando com sete espécies de dicotiledôneas.

QUADRO 25 - Concentração de Alumínio em Folhas Superiores, Inferiores e Raízes das Plantas de Nove Populações de Café, em Resposta a Duas Concentrações de Alumínio em Solução Nutritiva¹

Populações*	Folha Superior		Folha Inferior		Raiz	
	-Al	+Al	-Al	+Al	-Al	+Al
	----- -- µg/g					
UFV 2145	56,20	92,50	221,04	193,55	75,34 aB	4902,28 abA
UFV 2147	40,53	75,14	182,97	220,83	60,07 aB	4341,19 dA
UFV 1359	38,04	68,19	188,68	177,22	64,26 aB	4538,04 bcdA
UFV 2877	50,37	82,65	211,88	220,60	81,83 aB	4972,94 aA
UFV 2163	38,10	71,03	221,88	218,33	77,55 aB	4455,06 cdA
UFV 2149	45,96	61,58	216,60	212,16	60,94 aB	4494,46 cdA
UFV 2198	45,91	73,13	280,12	205,79	69,98 aB	4981,12 aA
UFV 3880	54,20	76,43	231,58	224,62	96,56 aB	4341,11 dA
UFV 2237	53,48	74,47	223,91	183,42	70,84 aB	4805,85 abcA
Média	46,98 B	75,01 A	219,85	206,28	73,04	4648,01

¹ As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na linha, ou minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste Duncan, a 5% de probabilidade.

A concentração de alumínio nas folhas inferiores foi ligeiramente superior nas plantas controle, sugerindo que os mecanismos de restrição na translocação deste elemento, a partir de um certo grau de estresse, passa a ser ativado, resultando no acúmulo de alumínio nas raízes, reduzindo a translocação para a parte aérea (Quadro 25).

Nas folhas superiores observou-se um pequeno aumento na concentração de alumínio. Embora não haja diferença estatística, as populações tolerantes UFV 1359 e UFV 2149 foram as que apresentaram menores concentrações.

Nas raízes detectaram-se elevadas concentrações de alumínio, entretanto, não foi possível estabelecer um padrão definido quanto ao

acúmulo deste elemento, talvez porque, a concentração de 8 $\mu\text{g}/\text{mL}$ de alumínio, tenha sido suficientemente tóxica a ponto de igualar a resposta das nove populações. PAVAN e BINGHAM (1982a) não observaram produção de grãos em plantas de café da variedade Catuaí Vermelho, com dois anos de idade, utilizando a mesma concentração de alumínio.

Nas raízes o alumínio se liga a grupos carboxílicos livres de ácidos poligalacturônicos ou forma ligações cruzadas com pectinas da lamela média (CLARKSON, 1967; KLIMASHEVSKII e DEDOV, 1976) nas células da coifa, epiderme e do córtex (McCORMICK e BORDEN, 1974).

A população UFV 2147 (sensível) apresentou menor concentração de alumínio nas raízes, enquanto que a UFV 2237, também sensível, obteve alta concentração, a qual não diferiu estatisticamente da observada nas populações tolerantes (UFV 1359 e UFV 2149), embora nestas últimas tenha sido verificado uma concentração um pouco inferior (Quadro 25).

Pode-se observar, que apenas uma pequena quantidade de alumínio translocou-se para a parte aérea, confirmando mais uma vez a observação de que o alumínio é um elemento de baixa mobilidade na planta (WAGATSUMA, 1984). O acúmulo de alumínio na parte aérea não teve papel importante, uma vez que parece não haver relação evidente entre a tolerância ao alumínio e o acúmulo deste elemento na parte aérea (FOY et al., 1972).

Em função da concentração de alumínio as populações foram agrupadas em três categorias com padrões de comportamento bastante peculiares (Quadro 26).

A tolerância ao alumínio não se relacionou com a concentração deste elemento nos tecidos. A princípio pode parecer contraditório o fato da população UFV 1359 (tolerante) estar no mesmo grupo da UFV 2237

QUADRO 26 - Agrupamento de Nove Populações de Café, pelo Método de Otimização de Tocher, Baseado na Distância Euclidiana Média Padronizada, em Função da Concentração de Alumínio, e Respectivas Médias, por Grupo Formado, das Características Avaliadas nas Plantas Submetidas ao Estresse de Alumínio

Grupos	Populações*	Concentração de Alumínio		
		Folha Superior	Folha Inferior	Raiz
I	2, 8, 5, 6	,05	218,99	4407,95
II	3, 9, 7	,93	188,81	4775,00
III	1, 4	,58	207,08	4937,61

*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).

(sensível). Entretanto, a UFV 1359 se caracteriza por possuir uma menor taxa de crescimento, o que leva a maior concentração do elemento por unidade de matéria seca produzida. No entanto, esta população apresentou menor redução na produção de matéria seca tanto da parte aérea, assim como das raízes, na presença de alumínio e também menor interferência na nutrição do fósforo e do cálcio.

A população sensível (UFV 2237), sob 8 $\mu\text{g/mL}$ de alumínio em solução, apresentou alta concentração de alumínio, tendo sido a produção de matéria seca de raiz severamente afetada. Queda de 1,10g para 0,58g. Portanto, a concentração de alumínio tornou-se maior, muito embora o conteúdo de alumínio em suas raízes (2,79 mg) tenha sido o menor (Quadro 27). Tal fato confirma sua maior sensibilidade.

A tolerância de cafeeiros ao alumínio pode estar associada à maior compartimentalização deste elemento nas raízes, uma vez que a população UFV 2149 (tolerante), apesar de possuir baixa concentração de

QUADRO 27 - Conteúdo de Alumínio (mg/planta) na Parte Aérea, Raizes e Total das Plantas de Nove Populações de Café, em Resposta a Duas Concentrações de Alumínio em Solução Nutritiva

Populações	Parte Aérea		Raiz		Total	
	-Al	+Al	-Al	+Al	-Al	+Al
UFV 2145	0,196	0,146	0,083	3,740	0,279	3,887
UFV 2147	0,187	0,137	0,072	3,138	0,259	3,275
W 1359	0,144	0,118	0,058	3,191	0,202	3,309
UFV 2817	0,167	0,149	0,084	3,513	0,252	3,663
W 2163	0,172	0,140	0,078	3,492	0,251	3,632
W 2149	0,183	0,151	0,065	4,034	0,247	4,185
UFV 2198	0,196	0,128	0,072	3,204	0,268	3,332
UFV 3880	0,218	0,142	0,109	3,089	0,327	3,231
UFV 2237	0,193	0,139	0,011	2,786	0,271	2,925
Media	0,184 A	0,139 B	0,078 B	3,354 A	0,262 B	3,493 A

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra maiúscula na linha, ou minúscula na coluna, não diferem entre si, pelo teste Duncan, a 5% de probabilidade.

alumínio (Quadro 25), foi a que apresentou maior conteúdo do elemento no sistema radicular (4,03 mg) (Quadro 27). Entretanto, a baixa concentração está associada ao efeito de diluição, uma vez que esta população apresentou a maior produção de matéria seca de raiz (0,90g), na presença de alumínio. Também para a parte aérea possui alta conversão em biomassa, apesar de o conteúdo de alumínio nas raízes ser elevado, o que sugere a existência de algum mecanismo de tolerância interna nesta população, tal como, compartimentalização do alumínio em determinados sítios, ou formação de quelatos com proteínas e ácidos orgânicos (TAYLOR, 1988; 1991), resultando em menor translocação de alumínio para a parte aérea.

A população **UFV 2147** (sensível) apresentou concentração de alumínio similar a que foi observada para **a UFV 2149** (tolerante) (Quadro 25), por isso foi incluída no mesmo grupo (Quadro 26). Entretanto, neste caso **a** maior sensibilidade está associada a grande interferência do alumínio na nutrição do fósforo e do cálcio. Essa população apresenta uma das maiores reduções na absorção, no acúmulo e na eficiência de utilização destes nutrientes.

As maiores concentrações de alumínio foram detectadas **nas** populações, **UFV 2145** e **UFV 2877**, de tolerância intermediária (Quadro 25), o que reforça a idéia de que a tolerância esteja associada à capacidade de crescer em presença de alumínio e a atuação de um mecanismo de tolerância interna.

A presença de alumínio reduziu o crescimento da parte aérea, do sistema radicular e interferiu na absorção e translocação de fósforo e cálcio, sendo estes efeitos mais severos, nas populações sensíveis, **UFV 2147** e **UFV 2237**.

A análise multivariada permitiu evidenciar melhor os efeitos tóxicos do alumínio na nutrição e no crescimento da planta, separando **as** populações em grupos que apresentaram comportamentos similares, com relação a concentração de alumínio e quanto ao acúmulo e eficiência no uso do fósforo e do cálcio.

A discrepância, em algumas situações, entre os grupos formados de acordo com as características químicas envolvidas em relação aos obtidos com **as** características de crescimento, reflete a atuação de diferentes mecanismos de tolerância. Como as características de crescimento são em última análise o somatório da ação conjunta desses mecanismos, estas devem ser escolhidas para classificar as populações quanto a tolerância ao alumínio.

Uma vez constatado que as populações de café diferem amplamente quanto à tolerância ao alumínio, é importante que sejam realizados estudos com variedades de conhecida tolerância e sensibilidade, na tentativa de elucidar os possíveis mecanismos envolvidos.

A tolerância à toxidez de alumínio é um fator importante para garantir bom desenvolvimento do sistema radicular do cafeeiro, permitindo a obtenção de água em maior profundidade em condições de seca, maior competitividade com ervas daninhas e ter maior aproveitamento dos fertilizantes aplicados. Desta forma, plantas com amplo sistema radicular e bem nutridas, especialmente em fósforo e cálcio, podem suportar estresses moderados de alumínio no solo.

de folhas totalmente
peso de matéria seca

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Foi conduzido um experimento em casa-de-vegetação, com o objetivo de estudar o comportamento de nove populações de café quanto à tolerância ao alumínio. Avaliou-se a influência deste metal no crescimento da parte aérea, de raízes e na composição mineral, de mudas de café submetidas a ausência e presença de alumínio ($8 \mu\text{g/mL}$), em solução nutritiva, com pH 4,0, por um período de **115** dias.

Ao final do experimento, após observação dos sintomas de toxidez de alumínio, as plantas foram divididas em folhas superiores, folhas inferiores, primeiro par de folhas totalmente expandido, caule e raízes, para determinação do peso de matéria seca e concentração de fósforo, cálcio e alumínio, nos diversos componentes das plantas. Avaliaram-se também peso de matéria seca da parte aérea e de raízes, altura das plantas, comprimento da raiz principal, número de raízes secundárias e área foliar do primeiro par de folhas totalmente expandido.

Pelos resultados apresentados e discutidos neste trabalho, as principais conclusões obtidas foram:

- A presença do alumínio inibiu tanto o crescimento da parte aérea, quanto das raízes, as quais apresentaram anormalidades morfológicas típicas de injúria **provocada** por este metal.

- A análise multivariada mostrou-se mais adequada para classificar as populações quanto à tolerância ao alumínio. Com base neste tipo de análise, envolvendo as características de crescimento, o percentual de redução no peso de matéria seca das raízes, foi a que possibilitou melhor discriminação, seguida do percentual de aumento no número de raízes secundárias e redução no comprimento da raiz principal.

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

- A análise de agrupamento, baseada no método de Tocher, envolvendo todas as características de crescimento estudadas, permitiu separar as populações em quatro categorias: tolerante (**UFV 1359** e **UFV 2149**), moderadamente tolerante (**UFV 2145**, **UFV 2877** e **UFV 2163**), moderadamente sensível (**UFV 3880**) e sensível (**UFV 2147**, **UFV 2198** e **UFV 2237**).

- A tolerância ao alumínio foi associada à menor precipitação do fósforo nas raízes, menor redução na translocação deste nutriente para a parte aérea e à maior eficiência no uso do fósforo na presença deste metal.

- Quanto à nutrição de cálcio, a tolerância está associada a menor redução na absorção e aumento na eficiência de utilização deste nutriente, na presença de alumínio.

- As populações de café estudadas acumularam quantidades elevadas de alumínio nas raízes, restringindo o transporte para a parte aérea.

- A maior concentração de alumínio nas raízes não se relacionou com a tolerância ou sensibilidade a este elemento.

- Para a população UFV **2149** a tolerância pareceu relacionar-se à compartimentalização do alumínio nas raízes e à capacidade de produzir biomassa em presença deste íon, o que sugere a atuação de algum mecanismo de tolerância interna.

BIBLIOGRAFIA

R.B. SANTOS,
aluminum effect

GREEN, C.M.; BANDO, V. Aluminum toxicity
of the root cap: preliminary evidence for a
wed morphogen in the primary root of *Zea mays*. *S*
3-370, 1985.

M.; FEY M.V. Alumi
involving the uptake an
S. Afr. J. Plant Soil, 3:
BIBLIOGRAFIA

Determinação es
ntas. Rev. Cere

ALAM, S.M. Influence of aluminum on plant growth and mineral nutrition of barley. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, **12**: 121-138, 1981.

ALAM, S.M. Effect of aluminum on the dry matter and mineral content of rice. **J. Sci. Tech.**, **7**: 01-03, 1983.

ALVARES V., V.H. *Caracterização química de solos*. Viçosa, UFV, 1985. 77 p.

ANDERSON, T.W. *An introduction to multivariate statistical analysis*. New York, John Wiley & Sons, 1958. 374 p.

ANIOL, A. Induction of aluminum tolerance in wheat seedlings by low doses of aluminum in the nutrient solution. **Plant Physiol.**, **76**: 551-555, 1984.

ASP, H.; BENGTTSSON, B.; JENSÉN, P. Influence of aluminum on phosphorus and calcium localization in roots of beech (*Fagus sylvatica*). **Physiol. Plant.**, **83**: 41-46, 1991.

BAILIAN, L.; McKEAND, S.E.; ALLEN, H.L. Genetic variation in nitrogen use efficiency of loblolly pine seedlings. **Forest Sci.**, **37**: 613-626, 1991.

EVÃO, M.D.M.; OLIVA, M.A.
magnesium, iron, manganese and
65-54, 1983b.

- 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 and Soil*, **150**: 271-277, 1993
- BENNET, R.J.; BREEN, C.M.; BANDU, V. Aluminium toxicity and regeneration of the root cap: preliminary evidence for a golgi apparatus derived morphogen in the primary root of *Zea mays*. *S. Afr. J. Bot.*, **51**: 363-370, 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*, **3**: 11-17, 1986.
- BRAGA, J.M. & DEFELIPO, B. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extratos de solos e plantas. *Rev. Ceres*, **21**: 73-85, 1974.
- CALBO, A.G. *Efeito do alumínio sobre a absorção, o transporte e a distribuição de alguns elementos minerais, em dois cultivares de sorgo (Sorghum bicolor L. Moench)*. Viçosa, MG, UFV, 1978. 43 p. (Tese M.S.).
- CALBO, A.G. & CAMBRAIA, J. Efeito do alumínio sobre a composição mineral de dois cultivares de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Rev. Ceres*, **27**: 369-378, 1980.
- CAMARGO, C.E.O. Tolerância de cultivares de trigo, triticale e centeio em diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva. *Bragantia*, **43**: 09-16, 1984.
- CAMARGO, C.E.O. & OLIVEIRA, O.F. Tolerância de cultivares de trigo a diferentes níveis de alumínio em solução nutritiva e no solo. *Bragantia*, **40**: 21-31, 1981.
- CAMBRAIA, J. Mecanismos de tolerância à toxidez de alumínio em plantas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FISILOGIA VEGETAL, 2, Piracicaba, 1989. Anais... Piracicaba, SBFV/USP, 1989. p. 85-92.
- CAMBRAIA, J.; GALVANI, F.R.; ESTEVÃO, M.D.M.; SANT'ANNA, R. Effects of aluminum on organic acid, sugar and amino acid composition of the root system of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *J. Plant Nutr.*, **6**: 313-322, 1983a.
- CAMBRAIA, J.; PIRES, D.L.F.J.; ESTEVÃO, M.D.M.; OLIVA, M.A. Effects of aluminum on the levels of magnesium, iron, manganese and copper in sorghum. *Rev. Ceres*, **30**: 45-54, 1983b.

- CAMBRAIA, J.; TREJO CHANDÍAS, J.A.; ESTEVÃO, M.M.; SANT'ANNA, R. Efeito do alumínio sobre o balanço iônico e sobre a capacidade das plantas de sorgo para modificar o pH das soluções nutritivas. **Rev. Ceres**, **34**: 284-292, 1987.
- CAMBRAIA, J.; PIMENTA, J.A.; ESTEVÃO, M.M.; SANT'ANNA, R. Aluminum effects on nitrate uptake and reduction in sorghum. **J. Plant Nutr.**, **12**: 1435-1445, 1990.
- CAMBRAIA, J.; SILVA, M.A.; OLIVA CANO, M.A.; SANT'ANNA, R. Método simples para avaliação de cultivares de sorgo quanto a tolerância ao alumínio. **R.Bras. Fisiol. Veg.**, **3**:87-95, 1991.
- CLARK, R.B. Effect of aluminum on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant corn. **Plant and Soil**, **47**: 633-662, 1977.
- CLARKSON, D.T. Effect of aluminum on the uptake and metabolism of phosphorus by barley seedlings. **Plant Physiol.**, **41**: 165-172, 1966.
- CLARKSON, D.T. Interactions between aluminum and phosphorus on root surfaces and cell wall materials. **Plant and Soil**, **27**: 347-356, 1967.
- CLARKSON, D.T. Metabolic aspects of aluminum toxicity and some possible mechanisms for resistance. In: RORINSON, I.H. (ed.). *Ecological aspects of the mineral nutrition of plants*. Oxford and Edinburg, Blackwell Scientific Publications, 1969. p. 381-397.
- CLARKSON, D.T. Effect of aluminum on uptake and metabolism of phosphorus by barley seedlings. **Plant Physiol.**, **41**: 635-662, 1977.
- CLARKSON, D.T. & SANDERSON, J. Inhibition of the uptake and long-distance transport of calcium by aluminum and other polyvalent cations. **J. Exp. Bot.**, **22**: 837-851, 1971.
- CORDEIRO, A.T. *Efeito de níveis de nitrato, amônio e alumínio sobre o crescimento e sobre a absorção de fósforo e de nitrogênio em Stylosanthes guianensis e Stylosanthes macrocephala*. Viçosa, MG, UFV, 1981. 53 p. (Tese M.S.)
- CRUZ, C.D. & REGAZZI, A.J. *Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético*. Viçosa, UFV, Imp. Univ., 1994. 390 p.
- CRUZ, C.D.; VENCOVSKY, R.; CARVALHO, S.P. Estudos sobre divergência genética. III. Comparação de técnicas multivariadas. **Rev. Ceres**, **41**: 191-201, 1994.

- EDWARDS, J.H.; HORTON, B.D.; KIRKPATRICH, H.C. Aluminum toxicity symptoms in peaches seedlings. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 101: 139-142, 1976.
- EVANS, C.E. & KAMPRATH, E.J. Lime response as related to percent aluminum saturation, solution aluminum and organic matter content. *Soil Sci. Amer. Proc.*, 34: 893-896, 1970.
- FERREIRA, A.A.A. *Efeito do alumínio sobre o desenvolvimento e o teor de alguns nutrientes em dois cultivares de soja (Glycine max (L.) Merrill)*. São Paulo, USP, 1983. 79 p. (Tese M.S.),
- FLEMING, A.L. & FOY, C.D. Root structure reflects differential aluminum tolerance in wheat varieties in acid soils. *Agron. J.*, 60: 172-176, 1968.
- FOY, C.D. Effects of aluminum in plant growth. In: CARSON, E.W. (ed.) *The plant root and its environment*, Chatottesville, Univ. Press of Virginia, 1974. p. 601-642.
- FOY, C.D. Physiological effects of hydrogen, aluminum, and manganese toxicities in acid soil. In: ADAMS, F. (ed.). *Soil acidity and liming*. 2nd edition. Madison, Soil Sci. Soc. Am., 1984. p. 57-97.
- FOY, C.D. Plant adaptation to acid aluminum-toxic soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 19: 959-987, 1988.
- FOY, C.D. & BROWN, J.C. Toxic factors in acid soils. I. Characterization of aluminum toxicity in cotton. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 27: 403-407, 1963.
- FOY, C.D. & FLEMING, A.L. The physiology of plant tolerance of excess available aluminum and manganese in acid soils. In: JUNG, G.A. *Crop tolerance to suboptimal land conditions*. Madison, Am. Soc. of Agron., 1978. p. 301-328.
- FOY, C.D.; FLEMING, A.L.; ARMIGER, W.H. Aluminum tolerance of soybean varieties in relation to calcium nutrition. *Agron. J.*, 61: 505-511, 1969.
- FOY, C.D.; FLEMING, A.L.; GERLOFF, G.C. differential aluminium tolerance in two snapbean varieties. *Agron. J.*, 64: 815-818, 1972.
- FOY, C.D.; CHANEY, R.L.; WHITE, M.C. The physiology of metal toxicity in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol.*, 29: 511-566, 1978.

- FOY, C.D.; FLEMING, A.L.; BURNS, G.R.; ARMIGER, W.H. Characterization of differential aluminum tolerance among varieties of wheat and barley. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **31**: 513-521, 1967.
- FURLANI, P.R. & CLARK, R.B. Screening sorghum for aluminum tolerance in nutrient solutions. *Agron. J.*, **73**: 587-594, 1981.
- GAHOONIA, T.S. Influence of root-induced pH on the solubility of soil aluminum in the rhizosphere. *Plant and Soil*, **149**: 289-291, 1993.
- GANJE, T.J. & PAGE, A.L. Rapid dissolution of tissue for cadmium determination by atomic absorption spectrophotometry. *At. Absorp. News*, **13**: 131-134, 1974.
- GOMES, M.M.S.; CAMBRAIA, J.; SANT'ANNA, R.; ESTEVÃO, M.M. Aluminum effects on uptake and translocation of nitrogen in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). *J. Plant Nutr.*, **8**: 457-466, 1985.
- GRIMME, H. Aluminum induced magnesium deficiency in oats. *Z. Pflanzenernehr. Bodenk.*, **146**: 666-676, 1983.
- HECHT-BUCHHOLZ, C. & FOY, C.D. Effect of aluminum toxicity on root morphology of barley. In: BROWER, R. (ed.). *Structure and function of plant root*. Martinus Nijhoff/Dr. W. Junk Publishers, The Hague, 1981. p. 343-345.
- HOAGLAND, D.R. & ARNON, D.I. *The water culture method for growing plants without soil*. Cal. Agric. Exp. Sta. Cir. 1950. 347 p.
- HORST, W.J.; WAGNER, A.; MARSCHNER, H. Effect of aluminum on root growth, cell division rate and mineral element contents in roots of *Vigna unguiculata* genotypes. *Z. Pflanzenphysiol. Bd.*, **109**: 95-103, 1983.
- HOWELER, R.H. & CADAVID, L.F. Screening of rice cultivars for tolerance to Al-toxicity in nutrient solutions as compared with a field screening method. *Agron. J.*, **68**: 551-555, 1976.
- HUANG, J.W.; SHAFF, J.E.; GRUNES, D.L.; KOCHIAN, L.V. Calcium fluxes in Al-tolerant and Al-sensitive wheat roots measured by Ca-selective microelectrodes. *Plant Physiol.*, **98**: 230-237, 1992.
- HUCK, M.G. Impairment of sucrose utilization for cell wall formation in the roots of aluminum-damage cotton seedlings. *Pl. Cell Physiol.*, **13**: 07-14, 1972.

- HUE, N.V.; CRADDOCK, G.R.; ADAMS, F. Effects of organic acids on aluminum toxicity in subsoils. *J. Soil Sci. Soc. Amer.*, **50**: 28-34, 1986.
- JENSEN, P.; PETTERSSON, S.; DRAKENBERG, T.; ASP, H. Aluminum effects on vacuolar phosphorus in roots of beech (*Fagus sylvatica* L.). *J. Plant Physiol.*, **134**: 37-42, 1989.
- JOHNSON, R.E. & JACKSON, W.A. Calcium uptake and transport by wheat seedlings as affected by aluminum. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **28**: 381-386, 1964.
- JOLLIFFE, I.T. Discarding variables in a principal component analysis; 1. Artificial data. *Appl. Stat.*, **21**: 160-173, 1972.
- KAMPRATH, E.J. Soil acidity in well drained soils of the tropics as a constraints for food production. In: *Soil - related constraints to food production in the tropics*. Los Baños, International Rice Research Institute, 1980. p. 172-187.
- KERRIDGE, P.C.; DAWSON, M.D.; MOORE, D.P. Separation of degrees of aluminum tolerance in wheat. *Agron. J.*, **63**: 586-591, 1971.
- KLIMASHEVSKII, E.L. & DEDOV, V.M. Localization of the mechanism of growth-inhibiting actions of Al_3^+ in elongating cell walls. *Sov. Plant Physiol.*, **22**: 1040-1046, 1976.
- LARKIN, P.J. Calmodulin levels are not responsible for aluminium tolerance in wheat. *Aust. J. Plant Physiol.*, **14**: 377-385, 1987.
- LEE, C.R. Influence of aluminum on plant growth and mineral nutrition of potatoes. *Agron. J.*, **63**: 604-608, 1971.
- LEE, E.H. & FOY, C.D. Aluminum tolerances of two snapbean cultivars related to organic acid content evaluated by high-performance liquid chromatography. *J. Plant Nutr.*, **9**: 1481-1498, 1986.
- LEMOES 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. 46 p. (Tese M.S.).
- LINDBERG, S. Aluminum interactions with K^+ ($^{86}Rb^+$) and $^{45}Ca_2^+$ fluxes in three cultivars of sugar beet (*Beta vulgaris*). *Physiol. Plant.*, **79**: 275-282, 1990.

- LONDOÑO, M.E.A. & VALENCIA A.,G. Toxicidad de aluminio en plantas de café. *Cenicafé*, **34**: 61-97, 1983.
- LOUGHMAN, B.C. Metabolic aspects of the transport of ions by cells and tissues of roots. *Plant and Soil*, **63**: 47-55, 1981.
- MACHADO, M.A. *Cinética da absorção de fosfato em Stylosanthes guianensis e S. macrocephala na presença de alumínio*. Viçosa, MG, UFV, 1981. 51 p. (Tese M.S.).
- MACKLON, A.E.S. & SIM, A. Modifying effects of a non-toxic level of aluminium on phosphate fluxes and compartmentation in root cortex cells of intact ryegrass seedlings. *J. Exp. Bot.*, **43**: 1483-1490, 1992.
- MACLEOD, L.B. & JACKSON, L.P. Aluminum tolerance of two barley varieties in nutrient solution, peat, and soil culture. *Agron. J.*, **59**: 181-227, 1965.
- MALAVOLTA, E.; DANTAS, J.P.; MORIAS, R.S.; NOGUEIRA, F.D. Calcium problems in Latin America. *Soil Sci. Plant Anal.*, **10**: 29-40, 1979.
- 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, 1981a.
- MALAVOLTA, E.; YAMADA, T.; GUIDOLIN, J.A. *Nutrição e adubação do cafeeiro*. Piracicaba, Instituto da Potassa & Fosfato/Instituto Internacional da Potassa, 1981b. 224 p.
- MARDIA, K.V.; KENT, J.T.; BIBBY, J.M. *Multivariate analysis*. London, Academic Press, 1979. 521 p.
- MARRIOT, F.H.C. *The interpretation of multiple observations*. New York, Academic Press, 1974. 117 p.
- MARSCHNER, H. *Mineral nutrition of higher plants*. London, Academic Press, 1986. 674 p.
- 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, SBSCS/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, *Pl. Cell Physiol.*, **17**: 127-137, 1976.
- McCORMICK, L.H. & BORDEN, F.Y. The occurrence of aluminium phosphate in plant roots. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **38**: 931-933, 1974.
- McLEAN, E.O. Chemistry of soil aluminum. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, **7**: 619-636, 1976.
- McLEAN, I.B. *The toxic aluminum reaction in corn and barley roots: an ultrastructural and morphological study*. Michigan, Michigan State University, **18**: 259, 1980. (Master's Abstr.).
- MILLARD, M.M.; FOY, C.D.; CORADETTI, C.A.; REINSEL, M.D. X-ray photoelectron spectroscopy surface analysis of aluminum ion stress in barley roots. *Plant Physiol.*, **94**: 578-583, 1990.
- MIYASAKA, S.C.; BUTA, J.G.; HOWEL, R.K.; FOY, C.D. Mechanism of aluminum tolerance in snapbeans - root exudation of citric acid. *Plant Physiol.*, **96**: 737-743, 1991.
- MORIMURA, S.; TAKAHASHI, E.; MATSUMOTO, H. Association of aluminum with nuclei and inhibition of cell division in onion (*Allium cepa*) roots. *Z. Pflanzenphysiol. Bd.*, **88**: 395-401, 1978.
- MOSQUIN, P.R. *Influência do alumínio sobre o crescimento e o metabolismo em plantas de Stylosanthes humilis H.B.K.* Viçosa, MG, UFV, 1978. 29 p. (Tese M.S.).
- MULLETTE, K.J. Stimulation of growth in eucalyptus due to aluminum. *Plant and Soil*, **42**: 495-499, 1975.
- NAIDOO, G.; STEWART, J.McD.; LEWIS, R.J. Accumulation sites of Al in snapbean and cotton roots. *Agron. J.*, **70**: 489-492, 1978.
- OJIMA, K. & OHIRA, K. Aluminum-tolerance and citric acid release from a stress-selected cell line of carrot. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, **19**: 1229-1236, 1988.

- OLMOS, I.L.J. & CAMARGO, M.N. Ocorrência de alumínio tóxico nos solos do Brasil, sua caracterização e distribuição. **Ciência e Cultura**, **28**: 171-180, 1976.
- PAVAN, M.A. *Toxicity of Al (III) to coffee (Coffea arabica L.) in nutrient solution culture and in oxisols and ultisols amended with CaCO₃, MgCO₃, and CaSO₄.2H₂O*. Riverside, University of California, 1981. 214 f. (Tese Ph.D.).
- PAVAN, M.A. Efeitos tóxicos de alumínio em mudas de cafeeiro em relação à nutrição de cálcio. **Rev. Bras. Ci. Solo**, **6**: 209-213, 1982.
- PAVAN, M.A. & BINGHAM, F.T. Toxidez de alumínio em cafeeiros cultivados em solução nutritiva. **Pesq. Agropec. Bras.**, **17**: 1293-1302, 1982a.
- PAVAN, M.A. & BINGHAM, F.T. Toxicity of aluminum to coffee seedlings in nutrient solution. **Soil Sci. Soc. of Am. J.**, **46**: 993-997, 1982b.
- RAJU, P.S.; CLARK, R.B.; MAITI, R.K.; MARANVILLE, J.W. Phosphorus uptake, distribution and use by glossy and nonglossy sorghum. **J. Plant Nutr.**, **10**: 2017-2024, 1987.
- RAO, R.C. *Advanced statistical methods in biometrical research*. New York, John Wiley & Sons, 1952. 390 p.
- RENGEL, Z. Role of calcium in aluminum toxicity. **New Phytol.**, **121**: 499-513, 1992.
- RENGEL, Z. & ROBINSON, D.L. Competitive Al₃⁺ inhibition of net Mg₂⁺ uptake by intact *Lolium multiflorum* roots. **Plant Physiol.**, **91**: 1407-1413, 1989a.
- RENGEL, Z. & ROBINSON, D.L. Aluminum effects on growth and macronutrient uptake by annual ryegrass. **Agron. J.**, **81**: 208-215, 1989b.
- ROY, A.K.; SHARMA, A.; TALUKDER, G. Some aspects of aluminum toxicity in plants. **Bot. Rev.**, **54**: 145-178, 1988.
- RYAN, P.R.; DITOMASO, J.M.; KOCHIAN, L.V. Aluminium toxicity in roots: an investigation of spatial sensitivity and the role of the root cap. **J. Exp. Botany**, **44**: 437-446, 1993.

- SALINAS, J.G. & SANCHES, P.A. Soil-plant relationships affecting varietal and species differences in tolerance to low available soil phosphorus. **Ciência e Cultura**, **28**: 156-16, 1976.
- SIDDIQI, M.Y. & GLASS, A.D..M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient utilization efficiency in plants. **J. Plant Nutr.**, **4**: 289-302, 1981.
- SIEGEL, N. & HAUG, A. Calmodulin-dependent formation of membrane potential in barley root plasma membrane vesicles: a biochemical model of aluminum toxicity in plants. **Physiol. Plant.**, **59**: 285-291, 1983
- SIMON, L.; SMALLEY, T.J.; BENTON JONES JR., J.; LASSEIGNE, F.T. Aluminum toxicity in tomato. Part 1. Growth and mineral nutrition. **J. Plant Nutr.**, **17**: 293-306, 1994.
- SUHAYDA, C.G. & HAUG, A. Organic acids aluminum toxicity in maize root membranes. **Physiol. Plant.**, **68**: 189-195, 1986.
- TAYLOR, G.J. Exclusion of metals from the symplasm: a possible mechanism of metal tolerance in higher plants. **J. Plant Nutr.**, **10**: 1213-1222, 1987.
- TAYLOR, G.J. The physiology of aluminum tolerance in higher plants. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, **19**: 1179-1194, 1988.
- TAYLOR, G.J. Current views of the aluminum stress response; the physiological basis of tolerance. **Current Topics in Plant Biochem. Physiol.**, **10**: 57-93, 1991.
- TAYLOR, G.J. & FOY, C.D. Mechanisms of aluminum tolerance in *Triticum aestivum* L. (Wheat) I. Differential pH induced by winter cultivars in nutrient solutions. **Amer. J. Bot.**, **72**: 695-701, 1985.
- THOMAS, G.W. & HARGROVE, W.L. The chemistry of soil acidity. In: *Soil acidity and liming*. Madison, Soil Science Society of America, 1984. p. 03-56.
- WAGATSUMA, T. Characteristics of upward translocation of aluminum in plants. **Soil Sci. Plant Nutr.**, **30**: 345-358, 1984.
- WAGATSUMA, T. & AKIBA, R. Low surface negativity of root protoplasts from aluminum-tolerant plant species. **Soil Sci. Plant Nutr.**, **35**: 443-452, 1989.

- WAGATSUMA, T. & EZOE, Y. Effect of pH on ionic species of aluminum in medium and on aluminum toxicity under solution culture. **Soil Sci. Plant Nutr.**, **31**: 547-561, 1985.
- WAGATSUMA, T.; KAWASHIMA, T.; TAWARAYA, K. Comparative stainability of plant root cells with basic dye (methylene blue) in association with aluminum tolerance. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, **19**: 1207-1215, 1988.
- WHEELER, D.M.; EDMEADES, D.C.; CHRISTIE, R.A.; PUTTERILL, J.; GARDNER, R. Effect of aluminum and pH on relative yield and plant chemical concentrations of 7 dicotyledonous species grown in solution culture at low ionic strength. **J. Plant Nut.**, **15**: 419-433, 1992.
- WRIGHT, K.E. Internal precipitation of phosphorus in relation to aluminum toxicity. **Plant Physiol.**, **18**: 708-712, 1943.
- WRIGHT, R.J. Soil aluminum toxicity and plant growth. **Commun. In Soil Sci. Plant Anal.**, **20**: 1479- 1497, 1989.
- ZHANG, G. & TAYLOR, G.J. Kinetics of aluminum uptake by excised roots of aluminum-tolerant and aluminum-sensitive cultivars of *Triticum aestivum* L. **Plant Physiol.**, **91**: 1094-1099, 1989.
- ZHANG, G. & TAYLOR, G.J. Kinetics of aluminum uptake in *Triticum aestivum* L. Identity of the linear phase of aluminum uptake by excised roots of aluminum-tolerant and aluminum-sensitive cultivars. **Plant Physiol.**, **94**: 577-584, 1990.
- ZHAO, X.J.; SUCOFF, E.; STADELMANN, J. Al_3^+ and Ca_2^+ alteration of membrane permeability of *Quercus rubra* root cortex cells. **Plant Physiol.**, **86**: 159-162, 1987.

Atividade de Física
 Experimento de
 Física

CR	ΔP	ΔP	ΔP
0,3100*	78,0003**	10654,5100**	
1,2150*	43,1002**	103,3514**	
4,6070**	3,2070**	153,9853**	
1,3010	3,0002	56,8574	
7,40	0,30	12,12	

APÊNDICE

APÊNDICE A

QUADRO 1A - Resumo das Análises de Variância dos Caracteres Peso de Matéria Seca da Parte Aérea (PSPA), da Raiz (PSR) e Total (PST), Número de Raízes Secundárias (NRS), Comprimento da Raiz (CR), Altura da Planta (AP) e Area Foliar (AF), Avaliados em Nove Populações de Café, Submetidas a Dois Níveis de Alumínio, em Solução Nutritiva

Fontes de Variação	G.L.	Quadrados Médios						
		PSPA	PSR	PST	NRS	CR	AP	AF
Concentração (C)	1	8,2341**	1,5682**	16,9890**	1431,1850**	1140,3100**	78,9647**	10835,5100**
População (P)	8	0,1228*	0,0228 ^{ns}	0,2086 ^{ns}	58,4213*	41,8745*	23,2485**	103,8514 ^{ns}
Interação CxP	8	0,1414*	0,0224 ^{ns}	0,2661 ⁺	60,5602*	4,6078 ^{ns}	2,2673 ⁺	183,9882'
Resíduo	36	0,0544	0,0181	0,1250	24,2408	14,8814	1,0382	96,8574
C.V. (%)		12,35	15,05	12,70	29,09	7,40	8,32	12,12

** , * , + Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, pelo teste F.

ns Não-significativo pelo teste F.

QUADRO 2A - Resumo das Análises de Variância das Concentrações de Fósforo em Folha Superior, Inferior e Raiz, Conteúdos na Parte Aérea, Raiz e Total, Avaliados em Nove Populações de Café, Submetidas a Dois Níveis de Alumínio, em Solução Nutritiva

Fontes de Variação	GL	Quadrados Médios				Conteúdo	
		Concentração				Raiz	Total
		Folha Superior	Folha Inferior	Raiz	Parte Aérea		
Concentração (C)	1	2,711x10 ^{-2**}	4,981x10 ^{-2**}	2,449x10 ^{-2**}	56,889 ^{**}	5,804**	99,034**
População (P)	8	3,625x10 ^{-4ns}	2,018x10 ^{-4**}	5,602x10 ^{-4ns}	5,369x10 ^{-1*}	2,205x10 ^{-1ns}	1,046 ^{ns}
Interação CxP	8	7,255x10 ^{-4**}	1,574x10 ^{-4*}	2,991x10 ^{-4ns}	5,258x10 ^{-1*}	1,848x10 ^{-1ns}	1,216 ⁺
Resíduo	36	2,074x10 ⁻⁴	6,481x10 ⁻⁵	3,426x10 ⁻⁴	2,155x10 ⁻¹	1,527	6,065x10 ⁻¹
C.V.(%)		5,91	5,43	6,16	13,63	14,79	12,88

** , * , + Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, pelo teste F.

ns Não-significativo pelo teste F.

QUADRO 3A - Resumo das Análises de Variância das Concentrações de Cálcio em Folha Superior, Inferior e Raiz, Conteúdos na Parte Aérea, Raiz e Total, Avaliados em Nove Populações de Café, Submetidas a Dois Níveis de Alumínio, em Solução Nutritiva

Fontes de Variação	GL	Quadrados Médios					
		Concentração			Conteúdo		
		Folha Superior	Folha Inferior	Raiz	Parte Aérea	Raiz	Total
Concentração (C)	1	1,500**	4,932**	0,116**	2339,339**	57,967**	3133,796**
População (P)	8	6,137x10 ⁻³ *	4,807x10 ⁻² ns	1,092x10 ⁻² **	21,552'	7,612x10 ⁻¹ ns	18,942ns
Interação CxP	8	1,925x10 ⁻² **	6,198x10 ⁻² *	4,570x10 ⁻³ *	15,957+	8,852x10 ⁻¹ ns	20,597+
Resíduo	36	2,500x10 ⁻³	2,682x10 ⁻²	1,624x10 ⁻³	7,260	4,951x10 ⁻¹	10,467
C.V. (%)		4,90	11,07	11,06	14,16	21,09	14,47

** , * , † Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, pelo teste F.

ns Não-significativo pelo teste F.

QUADRO 4A - Resumo das Análises de Variância da Eficiência de Utilização de Fósforo na Parte Aérea, Raiz e Total, Eficiência de Translocação e de Enraizamento, Avaliadas em Nove Populações de Café, Submetidas a Dois Níveis de Alumínio, em Solução Nutritiva

Fontes de Variação	GL	Quadrados Médios				
		Eficiência de Utilização			Eficiência de Translocação	Eficiência de Enraizamento
		Parte Aérea	Raiz	Total		
População (P)	8	25597,86*	3807,64 ^{ns}	37891,17 ^{ns}	2,5345x10⁻³*	256,011*
Interação CxP	8	27955,14*	3652,26 ^{ns}	43446,31+	9,0992x10 ⁻⁴ ^{ns}	194,948 ^{ns}
Resíduo	36	10484,35	2661,43	20349,70	9,3908x10 ⁻⁴	113,920
C.V. (%)		13,43	16,89	13,84	5,55	7,16

** , * , + Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, pelo teste F.

ns Não-significativo pelo teste F.

QUADRO 5A - Resumo das Análises de Variância da Eficiência de Utilização de Cálcio na Parte Aérea, Raiz e Total, Eficiência de Translocação e de Enraizamento, Avaliadas em Nove Populações de Café, Submetidas a Dois Níveis de Alumínio, em Solução Nutritiva

Fontes de Variação	GL	Quadrados Médios				
		Eficiência de Utilização			Eficiência de Translocação	Eficiência de Enraizamento
		Parte Aérea	Raiz	Total		
Concentração (C)	1	653,22 ^{ns}	18301,05 ^{**}	4402,38 ^{nc}	1,1549x10 ^{-3nc}	2,5305x10 ^{-1**}
Populações (P)	8	856,16 ^{ns}	8615,49 ^{**}	2412,70 ^{ns}	2,7561x10 ^{-3*}	4,4998x10 ^{-3*}
Interação CxP	8	1575,60 ^{**}	2511,75 ^{ns}	4618,84 [*]	2,7751x10 ^{-4ns}	1,8780x10 ^{-3ns}
Resíduo	36	495,22	1597,46	1815,78	4,1589x10 ⁻⁴	1,7937x10 ⁻³
C.V.(%)		15,98	16,05	14,86	2,40	2,60

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

QUADRO 6A - Resumo das Análises de Variância das Concentrações de Alumínio em Folha Superior, Inferior e Raiz, Conteúdos na Parte Aérea, Raiz e Total, Avaliados em Nove Populações de Café, Submetidas a Dois Níveis de Alumínio, em Solução Nutritiva

Fontes de Variação	GL	Quadrados Medios					
		Concentração			Conteúdo		
		Folha Superior	Folha Inferior	Raiz	Parte Aérea	Raiz	Total
Concentração (C)	1	10612,860**	2485,276 ^{ns}	28255,91x10 ⁺⁴ **	2,729x10 ⁻² **	144,922**	140,972**
População (P)	8	303,063 ^{ns}	1750,563 ^{ns}	106870,30 ⁺	1,095x10 ⁻³ ^{ns}	2,115x10 ⁻¹ ^{ns}	0,216 ^{ns}
Interação CxP	8	74,234 ^{ns}	1496,989 ⁻	106278,90 ⁺	5,698x10 ⁻⁴ ^{ns}	2,181x10 ⁻¹ ^{ns}	0,230 ^{ns}
Resíduo	36	264,976	1296,802	48947,55	9,186x10 ⁻⁴	1,517x10 ⁻¹	21,202
C.V.(%)		26,69	16,90	9,37	18,75	22,70	21,20

** , * , + Significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade, pelo teste F.

ns Não-significativo pelo teste F.