

ANDRÉ VINICIUS ZABINI

**SELEÇÃO, CARACTERIZAÇÃO E TOLERÂNCIA DIFERENCIAL
À DEFICIÊNCIA DE ZINCO DE PROGÊNIES DE CAFEEIROS
(*Coffea arabica* L.)**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2004

Aos meus queridos pais, Aquiles e Madalena.

Dedico.

AGRADECIMENTO

A Deus, sempre presente iluminando meus caminhos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Fitotecnia, pela oportunidade de realizar o curso de mestrado.

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

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio nas decisões mais difíceis e por sempre estarem do meu lado com muito amor e amizade.

À Ana Paula, companheira em todos os momentos, pelo amor e carinho.

A professora Hermínia Emilia Prieto Martinez, pela orientação, pelos ensinamentos transmitidos e pela grande atenção e amizade.

Aos amigos José Márcio, Adriano, Marcelo Tomaz, Luis, Rafael, Yonara, Marinalva e Fernanda, pelo convívio agradável e pela colaboração.

Ao conselheiro Antonio Alves Pereira, pelo fornecimento das sementes dos cafeeiros avaliados neste trabalho e pelas sugestões.

Aos conselheiros Fernando Luiz Finger e Cosme Damião Cruz, pelas sugestões e críticas.

Aos Professores Antonio Carlos Gonçalves de Andrade, Alessandro de Lucca e Braccini e Pedro Soares Vidigal (UEM – Maringá, PR), pelo incentivo e apoio ao meu ingresso no curso de mestrado.

À Sra. Margarida, Sr. Silvio e Inês, pela acolhida em minha chegada à Viçosa.

Aos técnicos do Laboratório de Nutrição de Plantas, Domingos Sávio e Itamar, pela amizade e ajuda prestada durante a condução dos experimentos.

À acadêmica de agronomia Camila A. Silva, bolsista de iniciação científica, pela ajuda prestada durante a condução e avaliação dos experimentos.

A todos os professores que, de alguma forma, contribuíram para o enriquecimento dos meus conhecimentos.

Aos colegas pós-graduandos da UFV, pela mútua troca de conhecimentos.

Aos funcionários do Departamento de Fitotecnia, pelo atendimento prestado.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

ANDRÉ VINÍCIUS ZABINI, filho de Aquiles Zabini e Maria Madalena Buki Zabini, nasceu no dia 29 de janeiro de 1978, na cidade Cianorte, Paraná.

Em julho de 2002, graduou-se em Agronomia pela Universidade Estadual de Maringá, em Maringá, PR.

Em setembro de 2002, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, em nível de mestrado, da Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese em agosto de 2004.

CONTEÚDO

| | Página |
|---|---------------|
| RESUMO | vii |
| ABSTRACT | ix |
| 1. INTRODUÇÃO GERAL | 1 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 4 |
| CAPÍTULO 1 | 6 |
| TOLERÂNCIA DIFERENCIAL À DEFICIÊNCIA DE ZINCO DE PROGÊNIES DE CAFEEIROS (<i>Coffea arabica</i> L.)..... | 6 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 6 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS | 9 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 13 |
| 4. CONCLUSÕES | 41 |
| LITERATURA CITADA | 42 |
| CAPÍTULO 2 | 45 |
| SELEÇÃO DE PROGÊNIES DE CAFEEIROS (<i>Coffea arabica</i> L.) EFICIENTES NO USO DE ZINCO..... | 45 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 45 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS | 48 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 51 |
| CONCLUSÕES..... | 58 |
| LITERATURA CITADA | 59 |

| | Página |
|--|---------------|
| CAPÍTULO 3 | 62 |
| CONCENTRAÇÃO DE MICRONUTRIENTES E CARACTERÍSTICAS BIOQUÍMICAS DE PROGÊNIES DE CAFEEIROS (<i>Coffea arabica</i> L.) EFICIENTES NO USO DE ZINCO | 62 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 62 |
| 2. MATERIAL E MÉTODOS | 66 |
| 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 70 |
| 4. CONCLUSÕES..... | 79 |
| LITERATURA CITADA | 80 |
| 2. CONCLUSÕES GERAIS | 83 |
| APÊNDICES | 85 |

RESUMO

ZABINI, André Vinicius, M.S., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2004.
Seleção, caracterização e tolerância diferencial à deficiência de zinco de progênies de cafeeiros (*Coffea arabica* L.). Orientadora: Hermínia Emilia Prieto Martinez. Conselheiros: Antonio Alves Pereira, Cosme Damião Cruz e Fernando Luiz Finger.

Neste trabalho estudou-se a influência do zinco no crescimento, na concentração de micronutrientes e nas características bioquímicas de progênies de cafeeiros, com o objetivo de avaliar a tolerância diferencial à deficiência de zinco, selecionar progênies eficientes nutricionalmente e estudar o requerimento de micronutrientes e as características bioquímicas dessas progênies. Para tanto, mudas de 14 progênies de cafeeiros foram submetidas a 0,0 e 3,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, em solução nutritiva, durante cinco meses, e 0,0 e 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, por mais cinco meses, devido à constatação de engrossamento de raízes e à necrose de meristemas apicais radiculares em algumas progênies, pressupondo a ocorrência de deficiência de zinco. O experimento foi conduzido em casa de vegetação e solução de Clark modificada, no esquema fatorial 14 x 2 (14 progênies e duas concentrações de zinco), em delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições. Após o período experimental, as plantas foram divididas em folhas apicais, folhas inferiores, folhas completamente expandidas, caule (ramo ortotrópico e ramos plagiotrópicos) e raízes para determinações de matéria seca, do teor dos micronutrientes zinco, ferro, cobre e manganês e do conteúdo de zinco acumulado pelas progênies. A partir da concentração de zinco e da matéria seca das

diferentes partes analisadas foram calculadas as eficiências de absorção, de transporte, de produção de biomassa e nutricional. As concentrações de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total, carotenóides, compostos indólicos e o índice SPAD foram avaliadas no segundo par de folhas. O estado nutricional de zinco afetou a produção de matéria seca, a habilidade do cafeeiro em absorver, transportar e utilizar o micronutriente, as concentrações dos micronutrientes ferro, cobre e manganês e as características bioquímicas avaliadas. Dentre as características químicas e de crescimento estudadas, as reduções percentuais da área foliar, do número de folhas, do teor de zinco ativo na folha completamente expandida e de zinco total na raiz foram as variáveis que apresentaram maior importância relativa na discriminação das progênies dos cafeeiros. O agrupamento envolvendo as características de crescimento permitiu discriminar a progênie UFV 4066-3 (Tupi IAC 1669-33) como altamente exigente em zinco e a IAC 4376-5 (Tupi) como pouco exigente em zinco. A partir dos dados do acúmulo de zinco na matéria seca das plantas, as progênies IAC 4376-5 (Tupi) e UFV 4066-5 (Tupi IAC 1669-33) apresentaram baixa exigência em zinco, e as progênies Caturra Amarelo 1, UFV 4066-3 (Tupi IAC 1669-33), Caturra Amarelo 2 e Caturra Vermelho 2 apresentaram alta exigência em zinco. Com base no estudo das variáveis de crescimento e eficiência nutricional para zinco, a progênie UFV 4066-5 (Tupi IAC 1669-33) pôde ser classificada como pouco exigente em zinco e eficiente em baixo suprimento de zinco; a progênie UFV 4066-3 (Tupi IAC 1669-33) como exigente e eficiente em alto suprimento; a progênie IAC 4376-5 como pouco exigente e pouco eficiente; e a Caturra Vermelho 4 como intermediária quanto à exigência e eficiência nutricional. Os teores de clorofila *a*, clorofila *b*, clorofila total e carotenóides decresceram sob restrição no fornecimento de zinco nas progênies UFV 4066-5 (Tupi IAC 1669-33), UFV 4066-3 (Tupi IAC 1669-33) e IAC 4376-5 (Tupi), e foram incrementados na progênie Caturra Vermelho 4. Na solução em que se omitiu zinco, a progênie Caturra Vermelho 4 apresentou elevados teores de pigmentos e de zinco, de ferro, de cobre e de manganês, sugerindo metabolismo mais intenso que conduziu aos maiores teores de compostos indólicos observados para esta progênie. No entanto, a eficiência nutricional para zinco não está relacionada à manutenção de concentrações elevadas de micronutrientes, pigmentos e compostos indólicos nas folhas de mudas de cafeeiros.

ABSTRACT

ZABINI, André Vinicius, M.S., Universidade Federal de Viçosa, August 2004.
Selection, characterization and differential tolerance to zinc deficiency in progenies of coffee (*Coffea arabica* L.) plants. Adviser: Hermínia Emilia Prieto Martínez. Committee Members: Antonio Alves Pereira, Cosme Damião Cruz and Fernando Luiz Finger.

This work studied the influence of zinc on the growth, micronutrient concentration and biochemical characteristics of coffee plant progenies to evaluate the differential tolerance to zinc deficiency, to select nutritionally efficient progenies and to study their micronutrient requirement and biochemical characteristics. Thus, seedlings of 14 coffee plant progenies were submitted to 0.0 and 3.0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ of zinc in a nutritive solution for five months, and 0.0 and 6.0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ of zinc for five extra months. The experiment was conducted in a greenhouse and modified Clark solution in a 14 x 2 factorial scheme (14 progenies and two zinc concentrations), arranged in a completely randomized design, with four repetitions. After the experimental period, the plants were grouped into apical leaves, inferior leaves, completely expanded leaves, stem (orthotropic branch and plagiotropic branches) and roots to determine dry matter, and content of the micronutrients zinc, iron, copper and manganese as well as zinc content accumulated by the progenies. Based on the zinc and dry matter concentration of the different parts analyzed, absorption, transport, biomass and nutritional production efficiencies were calculated. Chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, total chlorophyll, carotenoids, indolic compounds and the SPAD index were evaluated in the second leaf pair. Zinc

nutritional state affected dry matter production; coffee plant ability to absorb, transport, and use this micronutrient; iron, copper, and manganese concentrations; and the biochemical characteristics evaluated. Among the chemical and growth characteristics studied, the variables percentual reductions of leaf area, leaf number, active zinc content in the completely expanded leaf and total zinc in the root presented higher relative importance in discriminating coffee plant progenies. The grouping involving growth characteristics allowed to discriminate the progeny UFV 4066-3 (Tupi IAC 1669-33) as highly zinc demanding and IAC 4376-5 (Tupi) as low zinc demanding. Based on the data on zinc accumulation in the dry matter of the plants, the progenies IAC 4376-5 (Tupi) and UFV 4066-5 (Tupi IAC 1669-33) presented a low zinc requirement, and the progenies Caturra Amarelo 1, UFV 4066-3 (Tupi IAC 1669-33), Caturra Amarelo 2 and Caturra Vermelho 2 presented a high zinc requirement. Based on the study of the variables growth and nutritional efficiency for zinc, the progeny UFV 4066-5 (Tupi IAC 1669-33) can be classified as low zinc demanding and efficient in low zinc supply; the progeny UFV 4066-3 (Tupi IAC 1669-33) as highly demanding and efficient in high zinc supply; the progeny IAC 4376-5 as low zinc demanding and inefficient; and Caturra Vermelho 4 as intermediary in nutritional requirement and efficiency. Chlorophyll *a*, chlorophyll *b*, total chlorophyll and carotenoids contents decreased with restricted zinc supply in the progenies UFV 4066-5 (Tupi IAC 1669-33), UFV 4066-3 (Tupi IAC 1669-33) and IAC 4376-5 (Tupi), and increased in the progeny Caturra Vermelho 4. Caturra Vermelho 4 presented high contents of zinc, iron, copper and manganese pigments in the solution without zinc, suggesting more intense metabolism which led to higher contents of indolic compounds observed for this progeny. However, the nutritional efficiency of zinc is not related to the maintenance of high concentrations of micronutrients, pigments, and indolic compounds in the leaves of coffee plant seedlings.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A cultura do cafeeiro no Brasil representa um percentual bastante expressivo na geração de divisas, sendo responsável por grande parte das receitas com exportações. Atualmente, o parque cafeeiro brasileiro ocupa cerca de 3,4 milhões de hectares, com aproximadamente 5,0 bilhões de pés de cafeeiros, dos quais 3,9 bilhões são da espécie *Coffea arabica* e 1,1 bilhão de *Coffea canephora*. Entre as variedades mais plantadas de *C. arabica* destaca-se a Catuaí, que compõe 65% da área plantada; a Mundo Novo, com 30%; e outras variedades ocupando cerca de 5%, enquanto 100% da área cultivada com cafeeiros da espécie *C. canephora* são da variedade Conilon (Matiello, 2004). A estimativa para a safra 2003/2004 de café brasileiro é de 38,5 milhões de sacas beneficiadas, o que deve gerar U\$ 1,6 bilhão em exportações (Conab, 2004; IBGE, 2004).

Após a introdução do cafeeiro no Brasil, por longo período as lavouras de café foram implantadas em áreas recém-desmatadas e solos de alta fertilidade, sendo ali cultivado até que as reservas naturais de nutrientes se esgotassem e a cultura demonstrasse sinais de depauperamento e queda acentuada de produtividade. Buscava-se, então, uma nova área para dar início a outro ciclo produtivo. No entanto, a partir de 1969/1970, a cafeicultura tem expandido para solos de baixa fertilidade, especialmente para as regiões de cerrado onde freqüentemente ocorrem problemas nutricionais, quer seja pela deficiência ou pelo excesso de elementos minerais. De acordo com Malavolta & Kliemann (1985), entre os fatores que contribuem para a deficiência de zinco sob solos de cerrado, destacam-se a pobreza do material de origem do solo, o emprego de

práticas de manejo inadequadas e a utilização de genótipos pouco eficientes na absorção e uso deste micronutriente.

O zinco é essencial em importantes eventos fisiológicos dos vegetais, afetando o crescimento e a produção das culturas. Esse micronutriente desempenha funções relacionadas à síntese de proteínas, carboidratos, triptofano e ácido indol acético (AIA); é ativador de vários tipos de enzimas, incluindo desidrogenases, aldolases, isomerases e transfosforilases, além de ser componente estrutural de várias enzimas outras enzimas, como cobre-zinco superóxido dismutase, anidrase carbônica e desidrogenase alcoólica. É ainda responsável pela integridade de biomembranas (Marschner, 1995). Sob deficiência de zinco, o cafeeiro apresenta folhas novas pequenas, retorcidas e coriáceas. Os ramos mostram-se com um número de folhas reduzido e internódios curtos, conferindo um aspecto de roseta na ponta dos galhos e a produtividade pode ser afetada seriamente (Malavolta, 1986). Segundo Corrêa et al. (2000), cerca de 54,7% das lavouras cafeeiras da região Sul do Estado de Minas Gerais apresentaram teores foliares de zinco abaixo da faixa crítica definida por Malavolta et al. (1997).

Segundo Baligar & Fageria (1997), a viabilidade de cultivo dos solos tropicais ácidos e pobres em nutrientes exige a adaptação do solo à planta ou da planta ao solo, ou ambos. No primeiro caso, esta adaptação requer correção e fertilização, as quais implicam em custos elevados e nem sempre são eficientes. A adaptação da planta ao solo diz respeito ao uso eficiente dos nutrientes disponíveis, onde a seleção e o desenvolvimento de cultivares capazes de crescer e produzir sob restrição no fornecimento de nutrientes é o principal componente dessa estratégia, ou seja, utilização de plantas eficientes nutricionalmente.

Genótipos tolerantes à deficiência de zinco desenvolvem-se melhor que os genótipos sensíveis; entretanto, os mecanismos responsáveis pela tolerância diferencial não são completamente entendidos (Rengel et al., 1998). Segundo Gerloff & Gabelman (1983), mecanismos genéticos controlam as variações nas necessidades nutricionais ao nível de aquisição dos nutrientes do ambiente, movimento dos nutrientes nas raízes e carregamento no xilema, alocação interna dos nutrientes e utilização no metabolismo e crescimento; ou seja, a resposta de determinado genótipo sob condição de estresse nutricional envolve a capacidade em adquirir o nutriente do meio externo, a eficiência em transportá-lo para a parte aérea e produzir eficientemente biomassa de acordo com a quantidade adquirida do nutriente.

O cafeeiro é considerado pouco eficiente na absorção e utilização de zinco; no entanto, poucos trabalhos relatam o comportamento de diferentes variedades em resposta a este micronutriente. Reis Jr. & Martinez (2002), em experimento com mudas de cafeeiro em solução nutritiva, verificaram que a variedade Catuaí é mais eficiente na absorção, em mg de zinco absorvido por g de matéria seca de raiz produzida, e na translocação de zinco para a parte aérea que a Conilon; porém esta última foi mais eficiente na utilização de zinco, em g de matéria seca produzida por mg de zinco absorvido. Souza et al. (2001) constataram que a variedade Catuaí foi mais eficiente na utilização de zinco que a Icatu e esta mais eficiente que a Mundo Novo, quando cultivadas em vasos com solo sob doses crescentes de zinco. Amaral (2002) verificou que a cultivar Rubi MG-1192 foi mais eficiente na utilização de zinco para produção de folhas que as cultivares Catuaí Vermelho IAC-99, Icatu Amarelo IAC-3282 e Acaí IAC-474-19 em nível baixo de adubação, não constatando diferenças entre as cultivares nos níveis normal e alto de adubação.

Embora extremamente importante na nutrição mineral e fisiologia vegetal, o zinco é requerido em quantidades muito pequenas pelas plantas, sendo difícil prevenir contaminações em nível de campo. Assim, trabalhos desta natureza devem ser realizados em casa de vegetação, preferencialmente em solução nutritiva, proporcionando elevado controle do substrato e maior uniformidade do ambiente radicular, o que permite uma avaliação mais precisa das variáveis de crescimento e nutrição das plantas (Martinez, 2002). Genc et al. (2002) selecionaram plantas de cevada (*Hordeum vulgare* L.) eficientes no uso de zinco, empregando o cultivo hidropônico, e verificaram elevada correlação com os experimentos de campo onde foram posteriormente cultivadas as variedades selecionadas. Segundo Fageria (1998), a produção de grãos ou produção comercial é o critério mais adequado para a avaliação da eficiência nutricional em nível de campo; porém, em condições controladas a produção de matéria seca pode ser utilizada adequadamente com essa finalidade de avaliação.

Os objetivos deste trabalho foram avaliar a tolerância diferencial à deficiência de zinco por progênies de cafeeiros, na fase de muda, caracterizar as progênies quanto à eficiência nutricional para zinco, identificar as características de crescimento e de concentração de zinco mais importantes na discriminação precoce das progênies e, adicionalmente, estudar o requerimento de zinco, ferro, cobre e manganês e as características bioquímicas das progênies contrastantes quanto à eficiência nutricional para zinco.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, J.F.T. **Eficiência de produção de raízes, absorção, translocação e utilização de nutrientes em cultivares de café arábica**. 2002. 97 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K. Nutrient use efficiency in acid soils: nutrient management and plant use efficiency. In: MONIZ, A.C. et al. (Ed.) **Plant soil interactions at low pH**. Brazilian Soil Science Society, 1997. p.75-95

CORREA, J. B.; REIS JR., R. A.; CARVALHO, J. G.; GUIMARÃES, P. T. G. Diagnose nutricional de cafeeiros do sul de Minas Gerais – safra 1999/2000: II. Micronutrientes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIEIRAS, 26., Marília, 2000. **Anais**. Rio de Janeiro, MA/PROCAFE, 2000. p.106-108.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/download/safra/safracafe.pdf>>. Acesso em: 26/05/2004

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional da produção das culturas. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 1, p. 6-16, 1998.

GENC, Y.; McDONALD, G. K.; GRAHAM, R. D. Critical deficiency concentration of zinc in barley genotypes differing in zinc efficiency and its relation to growth responses. **J. Plant Nutr.**, v. 25, n. 3, p. 545-560, 2002.

GERLOFF, G. C.; GABELMAN, W. H. Genetic basis of inorganic plant nutrition. In: LAUHLI, A.; BIELESKI, R. L. (Ed.) **Inorganic plant nutrition**. New York: Springer-Verlag, 1983. p. 453-480.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola**: maio/2004. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/ibge/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/default.shtm>>. Acesso em 26/05/1\2004.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações, 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed.) **Cultura do cafeeiro** – fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Potafos, 1986. p. 165-274.

MALAVOLTA, E.; KLIEMANN, H. J. **Desordens nutricionais no cerrado**. Piracicaba: Potafos, 1985. 136 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. New York: Academic Press, 1995. 889 p.

MARTINEZ, H. E. P. **O uso do cultivo hidropônico de plantas em pesquisa**. Viçosa: Editora UFV, 2002. 61 p. (Cadernos Didáticos, 1).

MATIELLO, J. B. **A cafeicultura no Brasil**: diversidade é principal característica. Disponível em: <<http://www.coffeebreak.com.br/ocafezal.asp>>. Acesso em: 22/05/2004.

REIS JR., R. A.; MARTINEZ, H. E. P. Adição de Zn e absorção, translocação e utilização de Zn e P por cultivares de cafeeiro. **Scientia Agrícola**, v. 59, n. 3, p. 537-542, 2002.

RENGEL, Z.; RÖMHELD, V.; MARSCHNER, H. Uptake of zinc and iron by wheat genotypes differing in tolerance to zinc deficiency. **J. Plant Physiol.**, v. 152, p. 433-438, 1998.

SOUZA, C. A. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; NETO, A. E. F.; NOGUEIRA, F. D. Efeito de doses de zinco via solo em três cultivares de cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Ciênc. Agrotec.**, v. 25, n. 4, p. 890-899, 2001.

CAPÍTULO 1

TOLERÂNCIA DIFERENCIAL À DEFICIÊNCIA DE ZINCO DE PROGÊNIES DE CAFEEIROS (*Coffea arabica* L.)

1. INTRODUÇÃO

A deficiência de zinco é uma das mais comuns entre os micronutrientes, tanto em solos de regiões temperadas quanto tropicais, afetando o crescimento e a produtividade das culturas (Kaya & Higgs, 2001). Segundo Malavolta & Kliemann (1985), entre os vários fatores que conduzem à deficiência de zinco, destaca-se a utilização de genótipos pouco eficientes na absorção e no aproveitamento deste elemento.

A importância do zinco para a fisiologia, o crescimento e a produção das plantas é amplamente reconhecida. De acordo com Marschner (1995), o zinco desempenha funções relacionadas à síntese de proteínas, carboidratos, triptofano e ácido indol acético (AIA); é ativador enzimático e componente estrutural de várias enzimas; e responsável pela integridade de membranas. Sob deficiência de zinco o cafeeiro (*Coffea arabica* L.) apresenta folhas novas pequenas, retorcidas e coriáceas. As nervuras formam uma rede verde contra um fundo pálido de tecido amarelado. Os ramos mostram-se com um número de folhas reduzido e internódios mais curtos, conferindo um aspecto de roseta na ponta dos galhos e a produtividade pode ser seriamente afetada (Malavolta, 1986).

Os valores de faixas críticas de zinco para o cafeeiro, com base no teor total do elemento em folhas recém-maduras, são diferentes segundo vários autores, variando entre 8,0 e 30,0 mg kg⁻¹ de matéria seca (Willson, 1985; Reuter & Robinson, 1988; Malavolta, 1993; Mills & Jones, 1996; Malavolta et al., 1997). Para Cakmak & Marschner (1987), a concentração de zinco total nas folhas pode não ser indicador satisfatório do estado nutricional da planta em relação ao elemento, sugerindo que apenas uma proporção do teor total estaria fisiologicamente disponível.

Há indicações de que o cafeeiro é pouco eficiente na absorção e translocação de zinco; entretanto, poucos trabalhos relatam o comportamento de diferentes cultivares de cafeeiros em resposta a este micronutriente. Reis Jr. & Martinez (2002) constataram que a cultivar Catuaí (*C. arabica*) foi mais eficiente na absorção e translocação de zinco, absorvendo em média 52,5 µg do elemento por grama de matéria seca de raiz, enquanto a cultivar Conilon (*C. canephora*) absorveu 29,8 µg por grama de matéria seca de raiz. Segundo os mesmos autores, embora menos eficiente na absorção e translocação de zinco para a parte aérea, o Conilon apresentou maior eficiência de utilização de zinco, produzindo em média 26,03% mais matéria seca por unidade de zinco absorvido que a cultivar Catuaí. Em experimento de campo, Correa & Garcia (1980) não verificaram diferença significativa no teor foliar de zinco em mudas de Catuaí e Mundo Novo aos seis meses após o plantio; entretanto, aos 18 meses os teores foliares foram 22,5 e 13,0 mg kg⁻¹ para Mundo Novo e Catuaí, respectivamente. Segundo Souza et al. (2001), os níveis críticos de zinco na parte aérea foram inferiores para a cultivar Catuaí em relação às cultivares Icatu e Mundo Novo; porém, a produção de matéria seca pela cultivar Catuaí foi superior em relação à produção das duas cultivares. Martinez et al. (2003b) definiram as faixas críticas de nutrientes nas folhas e avaliaram o estado nutricional de lavouras cafeeiras em quatro regiões de Minas Gerais, em anos de alta e baixa produção, determinando-se para o zinco as faixas de 13,0 – 30,0 mg kg⁻¹ (Patrocínio), 8,0 – 16,0 mg kg⁻¹ (Manhuaçu), 6,0 – 12,0 mg kg⁻¹ (Viçosa) e 9,0 – 20,0 mg kg⁻¹ (São Sebastião do Paraíso e Guaxupé). Quanto ao estado nutricional do cafeeiro, os mesmos autores verificaram os maiores desequilíbrios em relação aos micronutrientes e no ano de alta produção.

Nas últimas décadas tem-se conseguido aumentos de produtividade à custa de grande quantidade de nutrientes adicionados nas fertilizações, conduzindo a problemas como elevados custos energéticos, de trabalho e na aquisição de insumos, bem como poluição ambiental e depleção de recursos. Uma alternativa para este tipo de problema é

a seleção de genótipos tolerantes a condições de solos pobres em nutrientes (Yu & Rengel, 1999). A constatação de diferenças no comportamento nutricional é de grande interesse prático, pois permite alocar uma cultivar menos exigente para solos mais pobres em determinado nutriente ou adubar com maior intensidade com esse nutriente se uma cultivar pouco eficiente nutricionalmente for escolhida para ser implantada (Souza et al., 2001).

A obtenção de novos cultivares de cafeeiros, mais produtivos e exigentes em nutrientes, aliada à expansão da cafeicultura para solos de baixa fertilidade, requer melhor compreensão do metabolismo dos nutrientes na cultura do café, visando aumentar a eficiência dos programas de adubação.

Os objetivos deste trabalho foram estudar a tolerância diferencial de progênies de cafeeiros à deficiência de zinco e identificar características que melhor expressem as diferenças varietais.

2. MATERIAL E MÉTODOS

As sementes de café (*Coffea arabica* L.) das progênes avaliadas neste trabalho fazem parte do programa de melhoramento do cafeeiro da UFV-EPAMIG. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em solução nutritiva estática aerada, no período de novembro de 2002 a novembro de 2003. Utilizou-se a solução de Clark (1975) modificada com a seguinte composição: N-NO₃⁻ 7,26 mmol L⁻¹; N-NH₄⁺ 0,90 mmol L⁻¹; P-H₂PO₄⁻ 0,069 mmol L⁻¹; K⁺ 1,80 mmol L⁻¹; Ca⁺⁺ 2,56 mmol L⁻¹; Mg⁺⁺ 0,60 mmol L⁻¹; S-SO₄⁻ 0,60 mmol L⁻¹; B 19,0 μmol L⁻¹; Cu 0,50 μmol L⁻¹; Fe 40,0 μmol L⁻¹; Mn 7,0 μmol L⁻¹; e Mo 0,086 μmol L⁻¹. Todas as soluções-estoque de macronutrientes foram submetidas à técnica de purificação para remoção de zinco, com o reagente pirrolidina ditiocarbamato de amônio (APDC), segundo Fontes (1986). Entre os micronutrientes, apenas o cloreto férrico foi purificado, utilizando-se resina de troca catiônica Dowex 1 X-8 (Fontes, 1986).

As sementes de 14 progênes de cafeeiros (Quadro 1) foram germinadas em areia lavada, irrigadas com solução nutritiva de Clark (1975) modificada a ¼ de força sem zinco e as mudas transplantadas no estádio de folhas cotiledonares para bandejas contendo a mesma solução, sem zinco, onde permaneceram durante 15 dias para adaptação. Após este período, as mudas foram transferidas para as bandejas definitivas, as quais receberam solução modificada para obtenção das concentrações de 0,0 e 3,0 μmol L⁻¹ de zinco. O experimento constituiu-se de um fatorial 14 x 2 (14 progênes e duas concentrações de zinco) no delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições, sendo cada parcela composta de uma planta por progênie.

Quadro 1 – Relação das progênes de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) avaliadas no experimento

| Número | Progênie | Número | Progênie |
|---------------|-------------------------------|---------------|--|
| 1 | UFV 4066-5 (Tupi IAC 1669-33) | 8 | H-504-5-6-1 MS (Catuaí Verm. IAC 81x HT 438-1) |
| 2 | IAC 4376-1 (Tupi) | 9 | Caturra Amarelo 2 |
| 3 | Caturra Amarelo 4 | 10 | Caturra Vermelho 1 |
| 4 | Caturra Amarelo 1 | 11 | Caturra Vermelho 2 |
| 5 | Caturra Amarelo 3 | 12 | Caturra Vermelho 4 |
| 6 | UFV 4066-3 (Tupi IAC 1669-33) | 13 | IAC 4376-5 (Tupi) |
| 7 | UFV 4066-1 (Tupi IAC 1669-33) | 14 | Caturra vermelho 3 |

A solução foi mantida sob aeração constante com borbulhamento de ar comprimido; o pH ajustado semanalmente a $5,0 \pm 0,5$ com HCl a $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ou NaOH a $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e sua troca ou reposição foi realizada com base no monitoramento da condutividade elétrica (CE), adotando-se como critério de troca ou reposição 30% de depleção do valor inicial da CE. Foram necessárias quatro trocas e quatro reposições de solução durante o experimento, sendo que na quarta troca, a concentração de zinco nos tratamentos que receberam o elemento foi aumentada para $6,0 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$, em virtude da constatação de engrossamento de raízes e da necrose de meristemas apicais radiculares em algumas progênies, pressupondo a ocorrência de deficiência de zinco.

Ao final do ensaio foram realizadas avaliações do diâmetro da base do ramo ortotrópico (DCAU), altura de planta (ALT), medida da base do ramo ortotrópico ao ápice da planta, número de folhas totais (NFOL) e área foliar (AF), quantificada a partir do número de folhas totais em medidor de área foliar modelo LiCor 3100. Em seguida, as plantas foram coletadas, lavadas em água desionizada e separadas em raízes, caule (ramo ortotrópico e ramos plagiotrópicos), folhas apicais (brotações, primeiro e segundo pares de folhas), folhas inferiores (seis pares de folhas inferiores, exceto as cotiledonares) e folhas recém-maduras (folhas completamente expandidas). O material vegetal foi submetido à secagem em estufa com circulação forçada de ar, a 70° C , por 72 horas, obtendo-se a matéria seca de folhas – MSF (somatório da matéria seca de folhas apicais, inferiores e recém-maduras), matéria seca da parte aérea – MSPA (somatório da matéria seca de folhas e ramos), matéria seca de raízes – MSR, e matéria seca total – MST (somatório da MSPA e MSR). Depois de seco, o material foi moído em moinho tipo Wiley, com peneira de 20 mesh, tomando-se 500 mg para a mineralização nítrico-perclórica.

As concentrações de zinco total, em todas as partes das plantas (raízes, caule, folhas apicais, folhas inferiores e folhas recém-maduras), foram determinadas por espectrofotometria de absorção atômica no extrato da digestão nítrico-perclórica. A fração zinco ativo ou solúvel foi determinada em 250 mg de material seco e moído, segundo Cakmak & Marschner (1987). As amostras foram submetidas a agitação (41 rpm) em 10 ml de solução-tampão de MES $1,0 \text{ mM}$ pH 6,0 durante 5 horas, em seguida filtradas em papel de filtragem lenta e a concentração de zinco quantificada por espectrofotometria de absorção atômica. A concentração de zinco ativo nas folhas apicais foi determinada por espectrofotometria de emissão ótica com plasma acoplado por indução, em aparelho marca Perkin Elmer, modelo Optima 3300 DV.

Determinou-se o conteúdo de zinco total nas folhas, caule, raiz, parte aérea, planta toda e razão conteúdo na parte aérea/conteúdo na raiz, a partir dos resultados de matéria seca e da concentração de zinco total nas diferentes partes das plantas.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste F, a 5% de probabilidade, fazendo-se o desdobramento das interações, independentemente da significância, e as respectivas médias foram comparadas pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade. Para a identificação das características mais importantes na discriminação, as progênies e o agrupamento das mesmas quanto ao comportamento em relação às variáveis estudadas, utilizaram-se os métodos multivariados, empregando-se a técnica de dispersão gráfica, com base nas variáveis canônicas e no método de Singh (1981), com base em D^2 . A análise por variáveis canônicas possibilita a identificação de progênies similares em gráficos de dispersão bi ou tridimensionais, mantendo o princípio do processo de agrupamento com base na distância D^2 . O emprego da técnica de variáveis canônicas também permite a determinação dos caracteres de menor importância na discriminação do material genético avaliado, estimando-se a importância relativa dos caracteres para divergência por meio dos coeficientes de ponderação destes nas variáveis padronizadas (Cruz e Regazzi, 1994).

Todos os cálculos foram realizados com utilização do programa estatístico GENES (Cruz, 1997). Para a análise multivariada, as características de crescimento, concentrações de zinco total e ativo e conteúdo de zinco foram transformadas em porcentagem de redução, de acordo com a seguinte expressão: % redução = $100 - (\text{valor da variável em ausência de zinco} \times 100) / \text{valor da variável em presença de zinco}$. Observa-se que, de acordo com a expressão utilizada para obtenção dos percentuais de redução, considerou-se como 100% os valores dos tratamentos que receberam zinco e, desta forma, a expressão de resultados negativos representa percentuais de incremento e os valores positivos percentuais de redução.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As progênies de cafeeiros testadas apresentaram diferenças significativas entre si e em relação ao suprimento de zinco (presença ou ausência do elemento), evidenciadas pelas características de crescimento, de concentração e de conteúdo de zinco nas diferentes partes analisadas, embora não tenham sido constatados sintomas de deficiência nutricional de zinco ao final período experimental. As características de crescimento apresentaram as maiores diferenças entre progênies que entre o suprimento de zinco. A restrição no suprimento de zinco reduziu o diâmetro de caule (DCAU) das progênies Caturra Amarelo 3, UFV 4066-3 e Caturra Vermelho 2. Nesta condição, as progênies UFV 4066-5, Caturra Amarelo 4, UFV 4066-1, Caturra Vermelho 1 e Caturra Vermelho 3 apresentaram os maiores DCAU, não diferindo estatisticamente entre si, enquanto o menor DCAU foi verificado para a progênie IAC 4376-1 (Tupi). Com o fornecimento de $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, as progênies Caturra Amarelo 3, UFV 4066-3 e UFV 4066-1 evidenciaram os maiores DCAU. A restrição no suprimento de zinco reduziu o DCAU das progênies Caturra Amarelo 3, UFV 4066-3 e Caturra Vermelho 2, e incrementou esta variável nas progênies IAC 4376-5 (Tupi) e Caturra Vermelho 3 (Quadro 1). A altura de planta (ALT) foi reduzida pela omissão de zinco em solução para as progênies Caturra Amarelo 1, Caturra Amarelo 3, UFV 4066-3, H-504-5-6-1 MS e Caturra Amarelo 2, e incrementada na progênie UFV 4066-5, a qual apresentou o maior valor médio de altura (50,0 cm) entre as progênies na solução sem zinco (Quadro 2). Na concentração $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, a maior média de altura foi observada para a progênie H-504-5-6-1 MS (57,0 cm). Nota-se, ainda, que a redução ALT foi

Quadro 2 – Médias do diâmetro de caule (DCAU), da altura de planta (ALT), do número de folhas (NFOL) e da área foliar (AF) de 14 progênes de cafeeiros em resposta às duas concentrações de zinco em solução nutritiva

| Progênes | DCAU (mm)* | | | ALT (cm) | | | NFOL (un) | | | AF (m ²) | | | | | | |
|--------------------|--------------------------|-------|--------------------------|--------------------------|-------|--------------------------|--------------------------|--------|--------------------------|--------------------------|--------|--------------------------|-------|-------|--------|--------|
| | 6,0 µmol L ⁻¹ | | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | | 0,0 µmol L ⁻¹ | | | | |
| UFV 4066-5 | 11,68 | a BC | 12,08 | a A | 47,50 | b CDE | 50,00 | a A | 85,00 | a F | 87,50 | a C | 0,341 | a E | 0,360 | a CDE |
| IAC 4376-1 (Tupi) | 10,68 | a DE | 9,95 | a F | 27,25 | a F | 26,25 | a F | 104,00 | a ABCD | 104,50 | a B | 0,408 | a AB | 0,411 | a AB |
| Caturra Amarelo 4 | 11,35 | a CD | 12,03 | a AB | 47,50 | a CDE | 47,00 | a BCD | 85,00 | b F | 106,00 | a B | 0,322 | b E | 0,370 | a BCDE |
| Caturra Amarelo 1 | 11,55 | a BCD | 10,95 | a DE | 54,25 | a A | 46,75 | b BCD | 107,50 | a AB | 106,00 | a B | 0,429 | a AB | 0,367 | b BCDE |
| Caturra Amarelo 3 | 12,73 | a A | 11,15 | b BCDE | 50,50 | a B | 44,50 | b DE | 109,50 | a A | 110,00 | a AB | 0,391 | a BC | 0,377 | a BCD |
| UFV 4066-3 | 12,73 | a A | 11,08 | b CDE | 45,25 | a E | 42,25 | b E | 98,00 | a CD | 82,00 | b C | 0,417 | a AB | 0,372 | b BCDE |
| UFV 4066-1 | 12,40 | a AB | 11,88 | a ABC | 45,50 | a DE | 46,00 | a BCD | 98,75 | b BCD | 117,00 | a A | 0,448 | a A | 0,430 | a A |
| H-504-5-6-1 MS | 11,55 | a BCD | 10,93 | a DE | 57,00 | a A | 48,75 | b AB | 105,00 | a ABC | 101,50 | a B | 0,392 | a BC | 0,381 | a BCD |
| Caturra Amarelo 2 | 11,05 | a CD | 11,05 | a CDE | 49,00 | a BC | 46,25 | b BCD | 96,00 | b CDE | 105,00 | a B | 0,357 | a CDE | 0,378 | a BCD |
| Caturra Vermelho 1 | 11,63 | a BC | 11,68 | a ABCD | 48,25 | a BCD | 47,50 | a ABC | 88,00 | a EF | 80,50 | a C | 0,345 | a DE | 0,346 | a DE |
| Caturra Vermelho 2 | 11,40 | a CD | 10,35 | b EF | 48,00 | a BCDE | 47,25 | a ABCD | 82,50 | a F | 78,50 | a C | 0,342 | a DE | 0,339 | a DE |
| Caturra Vermelho 4 | 11,28 | a CD | 10,88 | a DE | 46,75 | a CDE | 45,25 | a CD | 95,50 | a DE | 87,50 | b C | 0,355 | a CDE | 0,329 | a E |
| IAC 4376-5 (Tupi) | 9,80 | b E | 10,70 | a EF | 23,50 | a G | 25,00 | a F | 82,00 | b F | 103,00 | a B | 0,386 | a BCD | 0,397 | a ABC |
| Caturra Vermelho 3 | 10,80 | b CD | 11,88 | a ABC | 48,25 | a BCD | 48,50 | a AB | 83,00 | a F | 86,00 | a C | 0,346 | a DE | 0,337 | a DE |
| Média | 11,47 | | 11,18 | | 45,61 | | 43,66 | | 94,27 | | 96,79 | | 0,377 | | 0,371 | |
| CV (%) | | | 7,91 | | | | 6,13 | | | | 9,74 | | | | 11,710 | |

*Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na horizontal ou maiúsculas na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

acompanhada pela redução do DCAU nas progênes Caturra Amarelo 3 e UFV 4066-3 (Quadro 1).

Os dados de crescimento referentes ao DCAU e ALT sugerem possível diferenciação dos materiais genéticos quanto à síntese e ao metabolismo do ácido indol acético (AIA), ou mesmo sensibilidade à concentração de zinco empregada, ocasionando efeito tóxico na progênie UFV 4066-5. O AIA é o principal composto do grupo das auxinas vegetais e desempenha funções relacionadas ao crescimento e à alongação celular, sendo amplamente dependente do *status* nutricional de zinco. Plantas deficientes em zinco apresentam redução no comprimento de entrenós, decorrente de menor síntese de AIA (Marschner, 1995). O crescimento radial do caule depende da atividade meristemática cambial e, portanto, é também dependente da ação do AIA (Kozlowski & Pallardy, 1997). O crescimento e a alongação celular ocorrem pela extensão da parede celular em resposta à pressão de turgor interna. Uma bomba de prótons na membrana plasmática é ativada pelo AIA, provocando a extrusão de íons H⁺ e a acidificação do pH apoplástico. Assim, enzimas responsáveis pela hidrólise da parede celular, como celulases, hemicelulases e pectinases, são ativadas pela redução de pH, proporcionando a extensibilidade da parede celular (Taiz & Zeiger, 1997). Neste contexto, é evidente que a carência de zinco afeta diretamente o crescimento celular; porém, a redução significativa de ALT e DCAU, verificada na dose 6,0 µmol L⁻¹ de zinco para algumas das progênes estudadas, pode indicar que esta dose seja excessiva para as progênes em questão.

As progênes avaliadas produziram, em média, 94,27 e 96,79 folhas nas concentrações 6,0 e 0,0 µmol L⁻¹ de zinco, respectivamente. O número de folhas (NFOL) foi incrementado nas progênes UFV 4066-3 e Caturra Vermelho 4 e reduzido nas progênes Caturra Amarelo 4, UFV 4066-1, Caturra Amarelo 2 e IAC 4076-5 (Tupi) com o suprimento de 6,0 µmol L⁻¹ de zinco. O maior e o menor NFOL nos tratamentos que receberam zinco foram obtidos pelas progênes Caturra Amarelo 3 (109,5 folhas) e IAC 4376-5 (Tupi) (82,0 folhas). Com a restrição no fornecimento de zinco, as progênes UFV 4066-1 e Caturra Vermelho 2 apresentaram o maior e o menor NFOL, respectivamente 117,0 e 78,5 folhas (Quadro 2). Reis Jr. & Martinez (2002) constataram diferenças significativas no número de folhas e ramos entre os cafeeiros das cultivares Catuaí e Conilon sob a mesma dose de zinco, com maiores médias para o Catuaí, atribuindo este resultado às diferenças existentes entre as cultivares de duas espécies diferentes do gênero *Coffea*. Amaral (2002) verificou que a cultivar Rubi MG-1192 foi

mais eficiente na utilização de zinco para produção de folhas que as cultivares Catuaí Vermelho IAC-99, Icatu Amarelo IAC-3282 e Acaiaí IAC-474-19 em nível baixo de adubação, não constatando diferenças entre as cultivares nos níveis normal e alto de adubação.

A área foliar (AF) foi diminuída pela restrição no fornecimento de zinco em 14,45% na progênie Caturra Amarelo 1 e 10,79% na UFV 4066-3. As médias de AF variaram de 0,329 a 0,448 m², com destaque para a progênie UFV 4066-1, independentemente do suprimento de zinco, produzindo em média 0,448 e 0,430 m² de folha nas concentrações 6,0 e 0,0 μmol L⁻¹ de zinco, respectivamente (Quadro 2). Na solução em que se omitiu zinco, a redução na AF foi acompanhada pela redução do NFOL apenas para a cultivar UFV 4066-3, indicando que para as demais progênies a redução da AF ocorreu devido à diminuição no tamanho de folhas. No entanto, a progênie Caturra Vermelho 4 apresentou redução do NFOL sem alterar a AF, demonstrando capacidade compensatória interessante diante da interação genótipo x ambiente, ou seja, a manutenção da área fotossintetizante quando o NFOL foi reduzido. Folhas de maior tamanho compensaram o menor número de folhas da cultivar Conilon em relação a Catuaí, não havendo diferença significativa na AF das duas cultivares sob a mesma dose de zinco (Reis Jr. e Martinez, 2002). Segundo Kim et al. (2002), o fornecimento de zinco (0,0 e 1,53 μmol L⁻¹) teve pouco efeito sobre as características de crescimento de duas variedades *Carya illinoensis* cultivadas em solução nutritiva, não afetando o comprimento de internódios e o índice de área foliar das mudas, provavelmente devido ao crescimento inicial lento desta espécie.

A menor média de matéria seca de folhas (MSF) na dose 6,0 μmol L⁻¹ de zinco foi constatada para a progênie Caturra Vermelho 1 (23,09 g), enquanto a Caturra Vermelho 2 exibiu a menor média (22,23 g) na dose 0,0 μmol L⁻¹ de zinco (Quadro 3). A progênie UFV 4066-3 apresentou as maiores produções de MSF, matéria seca da parte aérea (MSPA) e matéria seca total (MST), respectivamente 33,30, 55,94 e 70,34 g na dose 6,0 μmol L⁻¹ de zinco (Quadro 3). Esperava-se que a maior produção de MSF e MSPA fosse acompanhada por maior número de folhas, o que não foi constatado para a progênie UFV 4066-3, embora sua AF tenha sido estatisticamente semelhante ao melhor tratamento, o que indica a produção de folhas maiores por esta progênie. Por outro lado, a UFV 4066-3 demonstrou maior sensibilidade à restrição no suprimento de zinco, exibindo os maiores percentuais de redução de MSF (23,36%) e MSPA (24,31%). As mudas de cafeeiros produziram, em média, 45,48 g e 44,64 g de MSPA nas doses 6,0 e

Quadro 3 – Médias de matéria seca de folha (MSF), de matéria seca da parte aérea (MSPA), de matéria seca de raiz (MSR) e de matéria seca total (MST) de 14 progênies de cafeeiros em resposta às duas concentrações de zinco em solução nutritiva

| Progênies | MSF* (g) | | | MSPA (g) | | | MSR (g) | | | MST (g) | | | | | | |
|--------------------|----------------------------|-------|----------------------------|----------------------------|-------|----------------------------|----------------------------|-------|----------------------------|----------------------------|-------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | 0,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | 0,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | 0,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | 0,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | | | |
| UFV 4066-5 | 24,93 | b GHI | 27,76 | a DEF | 43,43 | b EF | 50,34 | a AB | 13,50 | a EF | 12,69 | a DE | 56,93 | b FGH | 63,03 | a BC |
| IAC 4376-1 (Tupi) | 29,78 | a BC | 27,00 | b DEFG | 42,71 | a F | 39,20 | b HI | 10,73 | b G | 12,88 | a DE | 53,44 | a GH | 52,08 | a FG |
| Caturra Amarelo 4 | 26,10 | a EFG | 27,27 | a DEFG | 43,30 | b EF | 47,17 | a BCD | 13,80 | a EF | 13,32 | a CDE | 57,10 | a FGH | 60,49 | a CD |
| Caturra Amarelo 1 | 28,41 | a CD | 26,04 | b EFG | 47,71 | a CD | 43,18 | b EFG | 11,98 | a FG | 13,08 | a CDE | 59,70 | a DEF | 56,26 | a DEF |
| Caturra Amarelo 3 | 30,08 | a BC | 27,99 | b BCD | 50,94 | a BC | 46,35 | b CDE | 13,30 | a EF | 13,52 | a CDE | 64,24 | a BC | 59,86 | b CD |
| UFV 4066-3 | 33,30 | a A | 25,52 | b GH | 55,94 | a A | 42,34 | b FGH | 14,40 | a DE | 14,85 | a BC | 70,34 | a A | 57,20 | b DE |
| UFV 4066-1 | 30,31 | b B | 32,29 | a A | 51,75 | a B | 53,33 | a A | 14,81 | a DE | 14,35 | a BCD | 66,56 | a AB | 67,68 | a A |
| H-504-5-6-1 MS | 28,78 | a BCD | 29,77 | a B | 48,11 | a CD | 49,08 | a BC | 16,89 | a BC | 16,87 | a A | 65,00 | a BC | 65,95 | a AB |
| Caturra Amarelo 2 | 27,62 | a DE | 27,85 | a CDE | 46,67 | a DE | 46,21 | a CDE | 17,55 | a AB | 16,19 | a AB | 64,22 | a BCD | 62,39 | a BC |
| Caturra Vermelho 1 | 23,09 | b I | 26,36 | a DEFG | 42,55 | a F | 44,18 | a DEF | 19,09 | a A | 15,95 | b AB | 61,64 | a CDE | 60,13 | a CD |
| Caturra Vermelho 2 | 25,58 | a FGH | 22,23 | b I | 43,09 | a F | 37,97 | b I | 11,35 | a G | 10,36 | a F | 54,43 | a GH | 48,34 | b G |
| Caturra Vermelho 4 | 23,77 | a HI | 23,66 | a HI | 40,58 | a FG | 40,55 | a GHI | 14,72 | b DE | 16,96 | a A | 55,30 | a FGH | 57,51 | a DE |
| IAC 4376-5 (Tupi) | 26,94 | b DEF | 29,70 | a BC | 37,26 | b G | 41,43 | a FGH | 15,76 | a BCD | 12,41 | b E | 53,02 | a H | 53,84 | a EF |
| Caturra Vermelho 3 | 26,03 | a EFG | 25,96 | a FG | 42,69 | a F | 43,69 | a EFG | 15,17 | a CDE | 12,82 | b DE | 57,87 | a EFG | 56,51 | a DEF |
| Média | 27,48 | | 27,10 | | 45,48 | | 44,64 | | 14,50 | | 14,02 | | 59,98 | | 58,66 | |
| CV (%) | | | 6,78 | | | | 7,40 | | | | 13,28 | | | | 7,50 | |

*Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na horizontal ou maiúsculas na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade

0,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, respectivamente. Na concentração 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, a MSPA das progênies UFV 4066-5, Caturra Amarelo 4 e IAC 4376-5 (Tupi) foi reduzida em 13,72%, 8,20% e 11,44%, respectivamente, enquanto apenas a progênie UFV 4066-5 apresentou redução da MST (9,68%), evidenciando a maior sensibilidade desta progênie à concentração de zinco aplicada e, ao mesmo tempo, um comportamento satisfatório com baixo suprimento de zinco, com produção de MSPA semelhante aos melhores tratamentos. As progênies IAC 4376-1 (Tupi) e IAC 4376-5 (Tupi) produziram as menores quantidades de MST, devido a sua característica de porte reduzido. Os baixos valores de MSPA da progênie Caturra Vermelho 2 foram acompanhados pelo menor NFOL, principalmente na ausência de zinco. Em experimento de campo, Amaral (2002) verificou maior produção de MSPA por unidade de zinco absorvido pela cultivar Rubi MG-1192, aos 31 meses de idade, nos três níveis de adubação estudados. A matéria seca de folhas em duas variedades de *Carya illinoensis*, cultivadas em solução nutritiva, foi levemente reduzida na concentração de 1,53 $\mu\text{mol L}^{-1}$ em comparação com o controle (sem zinco), porém, sem diferença estatística entre as médias (Kim et al., 2002).

As diferenças encontradas na produção de matéria seca podem ser resultantes não apenas do suprimento ou ausência de zinco, mas de possíveis interações entre o zinco e outros nutrientes. O fornecimento de zinco (5,0 mg kg^{-1} de solo) não alterou a produção de matéria seca total em mudas de cafeeiro cultivar Catuaí Amarelo em relação à testemunha; porém, a adição de zinco e boro, ambos na dose de 5,0 mg kg^{-1} de solo, incrementou a matéria seca total das mudas em 21% (Lima Filho & Malavolta, 1998). De modo geral, o desbalanço no fornecimento de micronutrientes catiônicos conduz à absorção em excesso do elemento presente em maiores quantidades, em detrimento da absorção dos demais (Fageria, 2001). Excesso de zinco reduz o transporte de ferro para a parte aérea, e zinco e manganês interferem com ferro na síntese de clorofila (Foy et al., 1978). Segundo Paiva et al. (2003), os conteúdos foliares de ferro, de cobre e de manganês em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* VELL.) foram reduzidos com o incremento da dose de zinco em solução nutritiva.

As progênies de cafeeiros avaliadas produziram, em média, 14,50 e 14,02 g de matéria seca de raízes (MSR) em dez meses de cultivo, nas concentrações 6,0 e 0,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco. A dose 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco reduziu a MSR das progênies IAC 4376-1 (Tupi) e Caturra Vermelho 4 em 16,69 e 13,21%, respectivamente. Os maiores incrementos na MSR com o suprimento de zinco foram constatados para as progênies

Caturra Vermelho 1, IAC 4376-5 (Tupi) e Caturra Vermelho 3 (19,68; 21,26 e 18,33% respectivamente). Houve destaque para a progênie Caturra Vermelho 1, com médias de 19,09 e 15,95 g de MSR nas duas situações, ou seja, com e sem zinco, respectivamente. A menor produção de MSR foi observada na progênie Caturra Vermelho 2, independentemente do suprimento de zinco (Quadro 3). A capacidade de absorção de nutrientes pelas plantas é influenciada pela morfologia do sistema radicular e pelos parâmetros cinéticos da absorção (K_m , $V_{máx}$ e $C_{mín}$), sendo que estas características não apresentam, necessariamente, correlação direta com a produção de matéria seca de raízes. Segundo Martinez et al. (1993), a eficiência de enraizamento, ou seja, a quantidade de MSR produzida por unidade de nutriente absorvido, foi uma das principais responsáveis pela maior eficiência nutricional em plantas de soja sob estresse fosfatado, pressupondo a importância da maior produção de MSR por plantas eficientes nutricionalmente. Plantas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Moneymaker) cultivadas em solução nutritiva com $1,50 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, incrementaram em 60% a matéria seca de raízes em relação à testemunha ($0,15 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco), sendo este acréscimo responsável pela maior produção de matéria seca da planta toda (Kaya & Higgs, 2001). Genc et al. (2002) avaliaram o crescimento de duas cultivares de cevada (*Hordeum vulgare*) distintas quanto à eficiência de uso de zinco, verificando incremento na matéria seca de parte aérea e raízes da cultivar eficiente apenas em baixos níveis de fornecimento de zinco; com o aumento no suprimento de zinco não houve diferença entre as cultivares de cevada.

A concentração de zinco total foi influenciada pelas progênies e pelo suprimento de zinco, apresentando interações significativas progênie x dose de zinco para as variáveis estudadas, exceto para a concentração de zinco total na raiz (ZTR) e zinco ativo na raiz (ZAR). O teor de zinco total em todas as partes analisadas foi significativamente inferior nos tratamentos que não receberam o elemento na solução nutritiva, exceto na folha apical da progênie H-504-5-6-1 MS. O teor foliar médio de zinco total observado nas soluções com $6,0$ e $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco foi, respectivamente, $11,87$ e $8,41 \text{ mg kg}^{-1}$ na folha apical (ZTFA), $12,43$ e $8,02 \text{ mg kg}^{-1}$ na folha inferior (ZTFI) e $11,83$ e $7,05 \text{ mg kg}^{-1}$ na folha recém-madura (ZTFR). O teor de ZTFA da progênie Caturra Amarelo 2 atingiu os valores $14,74$ e $10,69 \text{ mg kg}^{-1}$ nos tratamentos com e sem zinco, respectivamente, não diferindo Caturra Vermelho 3 na solução com zinco. As menores médias de concentração de ZTFA foram observadas nas

progênes UFV 4066-3 (9,38 mg kg⁻¹ na dose 6,0 μmol L⁻¹ de zinco) e UFV 4066-5 (5,86 mg kg⁻¹ na dose 0,0 μmol L⁻¹ de zinco) (Quadro 4). Quando foi omitido zinco na solução nutritiva, as progênes UFV 4066-5 e H-504-5-6-1 MS apresentaram a maior e a menor redução na concentração de ZTFA (43,0% e 1,05%, respectivamente). Este comportamento sugere maior mobilização de zinco para as folhas apicais na progênie H-504-5-6-1 MS comparada à UFV 4066-5. Na solução com restrição no fornecimento de zinco, o teor médio de ZTFA (8,41 mg kg⁻¹) foi superior ao teor médio de ZTFI e de ZTFR, respectivamente 8,02 e 7,05 mg kg⁻¹. Isto pode indicar o efeito de dreno que a região meristemática, metabolicamente mais ativa, exerce (Loneragan et al., 1987; Longnecker & Robson, 1993). A despeito disto, segundo Grusak et al. (1999), os micronutrientes freqüentemente são encontrados em altas concentrações em folhas maduras, com alta taxa de transpiração, comparadas a folhas novas, supridas principalmente pelo floema. As menores médias de ZTFI foram observadas para a progênie Caturra Vermelho 2, com 8,93 e 6,60 mg kg⁻¹ na solução com e sem zinco, respectivamente, enquanto a progênie UFV 4066-3 apresentou as maiores concentrações, 17,88 e 11,31 mg kg⁻¹ nas mesmas condições de suprimento de zinco (Quadro 4). Este acúmulo de zinco nas folhas velhas pode representar baixa mobilização do elemento na progênie UFV 4066-3, a qual também apresentou as menores concentrações de ZTFA quando comparada à progênie Caturra Vermelho 2.

A progênie Caturra Vermelho 1 destacou-se pela elevada concentração de ZTFR, independentemente do suprimento de zinco, exibindo valores médios de 15,21 e 8,28 mg kg⁻¹ nos tratamentos com e sem zinco na solução nutritiva, respectivamente. Estes valores estão dentro da faixa crítica de zinco em folhas maduras de cafeeiro, segundo Malavolta (1993). A progênie UFV 4066-1 apresentou comportamento inverso, com valores médios de ZTFR de 9,73 e 6,40 mg kg⁻¹ nas doses 6,0 e 0,0 μmol L⁻¹ de zinco na solução (Quadro 4). Souza et al. (2001) determinaram os níveis críticos de zinco em mudas de café Catuaí (49,40 mg kg⁻¹), Icatu (51,50 mg kg⁻¹) e Mundo Novo (88,82 mg kg⁻¹) cultivadas em vasos com solo, encontrando valores bastante elevados em relação às concentrações de ZTFR observadas neste experimento. A maior redução percentual na concentração de ZTFR foi observada na progênie Caturra Vermelho 3 (49,12%) e a menor redução na progênie Caturra Amarelo 2 (33,11%).

Quadro 4 – Médias das concentrações de zinco total (mg kg⁻¹) na matéria seca da folha apical (ZTFA), da folha inferior (ZTFI), da folha recém-madura (ZTFR), do caule (ZTC) e da raiz (ZTR) de 14 progênies de cafeeiros em reposta às duas concentrações de zinco em solução nutritiva

| Progênies | ZTFA* | | | ZTFI | | | ZTFR | | | | | |
|--------------------|--------------------------|-------|--------------------------|--------------------------|-------|--------------------------|--------------------------|-------|--------------------------|------|------|-------|
| | 6,0 µmol L ⁻¹ | | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | | 0,0 µmol L ⁻¹ | | | |
| UFV 4066-5 | 10,30 | a E | 5,86 | b H | 12,36 | a DE | 8,43 | b B | 10,51 | a E | 6,58 | b DEF |
| IAC 4376-1 (Tupi) | 10,30 | a E | 8,65 | b CDE | 15,18 | a B | 8,79 | b B | 11,43 | a D | 6,04 | b F |
| Caturra Amarelo 4 | 10,34 | a E | 8,27 | b EF | 9,13 | a HI | 6,90 | b DE | 12,08 | a C | 7,66 | b C |
| Caturra Amarelo 1 | 11,90 | a D | 8,25 | b EF | 11,03 | a F | 8,64 | b B | 11,56 | a CD | 6,99 | b DE |
| Caturra Amarelo 3 | 10,30 | a E | 7,69 | b FG | 12,10 | a E | 7,30 | b CDE | 11,80 | a CD | 6,84 | b DE |
| UFV 4066-3 | 9,38 | a F | 6,94 | b G | 17,88 | a A | 11,31 | b A | 11,43 | a D | 6,95 | b DE |
| UFV 4066-1 | 9,79 | a EF | 8,04 | b EF | 18,33 | a A | 8,75 | b B | 9,73 | a F | 6,40 | b EF |
| H-504-5-6-1 MS | 9,53 | a F | 9,43 | a B | 13,14 | a CD | 8,50 | b B | 10,73 | a E | 6,73 | b DE |
| Caturra Amarelo 2 | 14,74 | a AB | 10,69 | b A | 10,48 | a FG | 7,50 | b CD | 13,33 | a B | 8,91 | b A |
| Caturra Vermelho 1 | 14,14 | a BC | 8,66 | b BCDE | 9,55 | a HI | 7,60 | b CD | 15,21 | a A | 8,28 | b B |
| Caturra Vermelho 2 | 12,49 | a D | 8,29 | b EF | 8,93 | a I | 6,60 | b E | 12,98 | a B | 6,95 | b DE |
| Caturra Vermelho 4 | 14,26 | a ABC | 9,34 | b BC | 9,86 | a GH | 6,89 | b DE | 11,50 | a CD | 7,15 | b CD |
| IAC 4376-5 (Tupi) | 13,75 | a C | 9,15 | b BCD | 12,78 | a CDE | 8,04 | b BC | 10,60 | a E | 6,71 | b DE |
| Caturra Vermelho 3 | 14,93 | a A | 8,53 | b DE | 13,28 | a C | 7,09 | b DE | 12,75 | a B | 6,49 | b EF |
| Média | 11,87 | | 8,41 | | 12,43 | | 8,02 | | 11,83 | | 7,05 | |
| CV (%) | | | 7,38 | | | | 7,61 | | | | 6,16 | |

Continua...

Quadro 4, Cont.

| Progênes | ZTC | | | ZTR | | |
|--------------------|----------------------------|------|----------------------------|----------------------------|------|----------------------------|
| | 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | 0,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | 0,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ |
| UFV 4066-5 | 26,78 | a E | 3,76 b E | 69,15 | a J | 9,40 b AB |
| IAC 4376-1 (Tupi) | 54,61 | a B | 8,69 b B | 99,56 | a G | 9,59 b AB |
| Caturra Amarelo 4 | 20,75 | a I | 5,35 b DE | 138,10 | a C | 9,79 b AB |
| Caturra Amarelo 1 | 24,90 | a FG | 4,88 b E | 187,73 | a A | 10,94 b A |
| Caturra Amarelo 3 | 26,64 | a E | 4,31 b E | 119,73 | a E | 9,48 b AB |
| UFV 4066-3 | 22,46 | a H | 7,28 b BC | 161,18 | a B | 8,35 b AB |
| UFV 4066-1 | 34,40 | a C | 8,69 b B | 92,73 | a H | 9,88 b AB |
| H-504-5-6-1 MS | 28,20 | a E | 4,84 b E | 83,23 | a I | 8,58 b AB |
| Caturra Amarelo 2 | 25,90 | a EF | 12,56 b A | 106,98 | a F | 10,51 b A |
| Caturra Vermelho 1 | 23,64 | a GH | 4,83 b E | 119,92 | a E | 8,39 b AB |
| Caturra Vermelho 2 | 28,95 | a D | 5,14 b E | 133,01 | a D | 9,31 b AB |
| Caturra Vermelho 4 | 25,49 | a EF | 7,30 b BC | 90,39 | a H | 7,44 b B |
| IAC 4376-5 (Tupi) | 56,54 | a A | 6,98 b CD | 45,63 | a K | 8,84 b AB |
| Caturra Vermelho 3 | 26,41 | a EF | 4,61 b E | 97,84 | a G | 9,90 b AB |
| Média | 30,40 | | 6,37 | 110,37 | | 9,31 |
| CV (%) | | 9,00 | | | 4,36 | |

* Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na horizontal ou maiúsculas na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

Os dados do Quadro 4 demonstram que os ramos (ortotrópicos e plagiotrópicos) das progênies IAC 4376-5 (Tupi) e Caturra Amarelo 4 apresentaram a maior e a menor média de concentração de zinco total (ZTC), 56,54 e 20,75 mg kg⁻¹ respectivamente, com fornecimento de zinco na solução. Excluindo-se o fornecimento de zinco, o maior valor de ZTC foi obtido na progênie Caturra Amarelo 2 (12,56 mg kg⁻¹) e o menor valor na progênie UFV 4066-5 (3,76 mg kg⁻¹). Segundo Grusak et al. (1999), as paredes dos vasos do xilema possuem grupos carboxílicos carregados negativamente que se ligam fortemente a cátions divalentes, dificultando seu transporte. A complexação com ânions ou ligantes orgânicos, sobretudo nicotiamina, favorece o transporte de cátions metálicos polivalentes pela neutralização de cargas positivas. Em tomate e soja predomina o complexo Fe (III)-citrato. O Mn (II) pode mover-se na forma livre, o Zn (II) provavelmente é complexado com citrato ou malato e o Cu (II) com complexos nitrogenados (asparagina, histidina e glutamina), devido a elevada afinidade deste cátion por compostos orgânicos desta natureza. De acordo com Amaral (2002), as cultivares de cafeeiros que alocam menores quantidades de nutrientes no caule investem mais fotoassimilados no crescimento e desenvolvimento de outros órgãos, e tendem a ser as mais produtivas, como verificado em experimento de campo para as cultivares Rubi MG-1192 e Catuaí Vermelho IAC-99 em comparação com Icatu Amarelo IAC-3282 e Acaiá IAC-474-19.

A remobilização de nutrientes armazenados em raízes e caules ocorre preferencialmente via xilema, e de folhas via floema de tal forma que, a natureza do estoque de micronutrientes na planta e a capacidade de carregamento do floema ordenam a mobilidade destes elementos (Grusak et al., 1999). O acúmulo de nutrientes em caules pode ser importante, particularmente para nutrientes pouco móveis, ocorrendo trocas entre os vasos do xilema e floema que favorecem a remobilização destes nutrientes (Marschner, 1995). Em trigo, o acúmulo de zinco no caule pode atuar como fonte de reserva deste micronutriente para posterior suprimento, em possíveis situações onde a disponibilidade seja restrita (Pearson & Rengel, 1995).

A concentração de zinco total nas raízes (ZTR) demonstrou as maiores reduções percentuais entre os tratamentos com e sem zinco, variando de 80,63 a 94,82% nas progênies IAC 4376-5 (Tupi) e UFV 4066-3. Esta redução é devida, em grande parte, a elevada concentração de zinco nas raízes que estavam em contato com o elemento na solução, com média de 110,37 mg kg⁻¹, comparada à média de 9,31 mg kg⁻¹ nas raízes de plantas que não receberam zinco. As progênies Caturra Amarelo 1 e IAC 4376-5

(Tupi) apresentaram, respectivamente, a maior (187,73 mg kg⁻¹) e a menor (45,63 mg kg⁻¹) concentração de ZTR na solução com suprimento de zinco, não diferindo entre si quanto a concentração de ZTR na ausência de zinco em solução (Quadro 4). No entanto, no Quadro 2 observa-se que, embora a concentração de ZTR das progênies Caturra Amarelo 1 e IAC 4376-5 (Tupi) sejam estatisticamente iguais na solução sem zinco, apenas a MSR da progênie IAC 4376-5 (Tupi) foi reduzida pela falta do elemento. Entretanto, na solução com fornecimento de zinco, a MSR da progênie IAC 4376-5 (Tupi) foi superior à da progênie Caturra Amarelo 1, o que sugere melhor utilização do zinco fornecido para produção de raízes pela progênie IAC 4376-5 (Tupi).

Em experimentos com espécies florestais, em solução de Clark (1975) com 2,0 µmol L⁻¹ de zinco, a concentração de zinco em raízes de cedro (*Cedrela fissilis*) foi 31,90 mg kg⁻¹ (Paiva et al., 2003) e, em eucalipto 333,73 mg kg⁻¹ (Soares et al., 2001), demonstrando grande a variabilidade existente na absorção de zinco por diferentes espécies perenes e, neste trabalho, sendo constatado o mesmo entre as diferentes progênies de cafeeiros.

Independentemente do suprimento de zinco, os valores médios de concentração para ZTFA, ZTFI e ZTFR estiveram dentro da faixa crítica do elemento para o cafeeiro, estabelecida entre 8 e 16 mg kg⁻¹ (Malavolta, 1993; Martinez et al., 2003a), exceto o ZTFR com pequena redução (7,05 mg kg⁻¹) nos tratamentos que não receberam o micronutriente na solução nutritiva; porém, não foram observados sintomas visuais de deficiência na parte aérea durante o período experimental. No entanto, a deficiência de zinco compromete primeiramente importantes funções fisiológicas antes que sintomas visuais sejam observados. Segundo Yu & Rengel (1999), a carência de zinco reduziu drasticamente a atividade da Cu/Zn superóxido dismutase (Cu/ZnSOD) e a concentração de proteínas solúveis, resultando em diminuição na matéria seca da parte aérea, como observado em tremoço (*Lupinus angustifolius* L.).

No presente experimento, os teores foliares de Zn para as plantas que não receberam zinco em solução podem ser explicados por três possibilidades: primeiro, pode ter ocorrido contaminação da solução nutritiva devido à deficiência no processo de desionização da água utilizada; segundo, a contaminação pode ter ocorrido por ineficiência do processo de purificação das soluções-estoque de macronutrientes ou cloreto férrico, conduzindo ao efeito acumulativo de zinco; e terceiro, fornecimento de zinco através da poeira depositada sobre as folhas das mudas de cafeeiros, durante o tempo em que estas permaneceram na casa de vegetação.

Admitindo-se que as folhas foram adequadamente lavadas após a coleta e que a parte aérea das plantas não foi molhada durante o ensaio, a terceira hipótese parece ser pouco provável, pois a penetração de zinco através da cutícula e epiderme da folha, em quantidades suficientes para atingir as concentrações observadas, exigiria a presença de um agente molhante. Entretanto, as progênes de cafeeiros permaneceram durante um período considerável na casa de vegetação, ou seja, dez meses de cultivo, e diante disto a possibilidade de absorção de zinco presente na poeira sobre as folhas não pode ser descartada. As folhas apresentavam elevada umidade, especialmente no período noturno, o que pode resultar na formação de um sistema contínuo entre a superfície foliar, a cutícula e as células da epiderme, com umidade suficiente para proporcionar a absorção de íons.

A concentração de zinco total nas folhas pode não ser um indicador satisfatório para diagnóstico do estado nutricional da planta com relação ao elemento, como demonstrado por Cakmak & Marschner (1987), sugerindo que apenas uma proporção do zinco total esteja realmente disponível fisiologicamente, denominando esta fração zinco solúvel em água ou zinco ativo.

A concentração de zinco ativo em todas as partes da planta apresentou diferença significativa para progênes, suprimento de zinco e interação progênie x dose de zinco, exceto para o zinco ativo na raiz. Como esperado, a concentração de zinco ativo em todos os tratamentos foi inferior à concentração de zinco total, exceto para zinco ativo no caule (ZAC) na solução sem zinco, em que os valores foram muito próximos (Quadros 4 e 5). Este resultado sugere que nesta condição todo o Zn presente em caules estava ativo fisiologicamente.

A concentração de zinco ativo nas folhas apicais (ZAFA) atingiu maiores valores nas progênes UFV 4066-1 (3,36 mg kg⁻¹) e UFV 4066-3 (2,90 mg kg⁻¹), respectivamente com e sem zinco na solução, enquanto a progênie Caturra Vermelho 1 apresentou as menores médias (1,03 e 0,94 mg kg⁻¹) nas mesmas condições. Apenas as progênes Caturra Vermelho 1, Caturra Vermelho 4, IAC 4376-5 (Tupi) e Caturra Vermelho 3 não sofreram reduções na concentração de ZAFA quando submetidos à ausência do elemento (Quadro 5). A manutenção de níveis elevados de ZAFA provavelmente favoreça o desenvolvimento dos meristemas foliares, evitando ou minimizando os sintomas típicos de deficiência de zinco nos pontos de crescimento. Em plantas de tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill. cv. Moneymaker), em solução nutritiva com baixo fornecimento de zinco (0,15 µmol L⁻¹), Kaya & Higgs (2001)

Quadro 5 – Médias das concentrações de zinco ativo (mg kg⁻¹) na matéria seca da folha apical (ZAFA), da folha inferior (ZAFI), da folha recém-madura (ZAFR), do caule (ZAC) e da raiz (ZAR) de 14 progênies de cafeeiros em resposta à duas concentrações de zinco em solução nutritiva

| Progênies | ZAFA* | | ZAFI | | ZAFR | | ZAC | | ZAR | |
|--------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ |
| UFV 4066-5 | 1,50 a F | 1,19 b F | 3,52 a I | 2,24 b G | 1,33 a G | 1,36 a E | 21,69 a E | 3,53 b I | 54,49 a H | 8,23 b A |
| IAC 4376-1 (Tupi) | 1,32 a FG | 1,12 b FG | 3,19 a J | 1,96 b H | 2,65 a B | 0,87 b F | 31,25 a B | 8,99 b CD | 89,65 a E | 8,28 b A |
| Caturra Amarelo 4 | 1,29 a G | 1,01 b FG | 2,70 a K | 1,99 b H | 1,80 a D | 0,86 b F | 13,24 a H | 5,20 b GH | 110,50 a BC | 7,45 b A |
| Caturra Amarelo 1 | 1,51 a F | 1,16 b F | 4,20 a H | 2,28 b G | 1,39 a G | 0,93 b F | 16,24 a G | 4,62 b HI | 130,58 a A | 8,76 b A |
| Caturra Amarelo 3 | 1,29 a G | 1,11 b FG | 4,41 a H | 4,30 a C | 1,69 b E | 2,08 a B | 25,97 a D | 6,82 b EF | 91,28 a DE | 9,01 b A |
| UFV 4066-3 | 3,16 a B | 2,90 b A | 8,65 a A | 4,13 b C | 1,51 b F | 2,19 a A | 19,44 a F | 11,09 b B | 116,08 a B | 6,77 b A |
| UFV 4066-1 | 3,36 a A | 2,36 b CD | 6,44 a E | 3,27 b E | 2,25 a C | 2,07 b B | 25,11 a D | 10,51 b B | 73,07 a G | 8,07 b A |
| H-504-5-6-1 MS | 2,01 b E | 2,48 a BC | 7,64 a C | 5,05 b A | 2,31 a C | 1,89 b C | 28,00 a C | 5,30 b GH | 68,93 a G | 6,26 b A |
| Caturra Amarelo 2 | 1,40 a FG | 1,07 b FG | 6,01 a F | 4,23 b C | 3,39 a A | 1,60 b D | 21,00 a E | 13,00 b A | 90,21 a E | 10,02 b A |
| Caturra Vermelho 1 | 1,03 a H | 0,94 a G | 5,03 a G | 4,64 b B | 1,73 a DE | 0,59 b G | 21,05 a E | 7,77 b DE | 97,16 a D | 8,01 b A |
| Caturra Vermelho 2 | 2,54 a C | 2,27 b DE | 3,73 a I | 3,73 a D | 0,47 a I | 0,13 b I | 19,22 a F | 6,42 b FG | 106,27 a C | 8,50 b A |
| Caturra Vermelho 4 | 2,29 a D | 2,16 a E | 6,40 a E | 4,59 b B | 0,97 a H | 0,38 b H | 16,43 a G | 8,91 b CD | 82,75 a F | 6,25 b A |
| IAC 4376-5 (Tupi) | 2,55 a C | 2,63 a B | 8,09 a B | 4,23 b C | 1,64 a E | 0,38 b H | 39,73 a A | 10,12 b BC | 39,12 a I | 8,13 b A |
| Caturra Vermelho 3 | 2,25 a D | 2,09 a E | 6,69 a D | 2,89 b F | 0,44 a I | 0,40 a H | 16,82 a G | 6,55 b EF | 88,19 a EF | 8,60 b A |
| Média | 1,96 | 1,75 | 5,48 | 3,54 | 1,68 | 1,12 | 22,51 | 7,77 | 88,45 | 8,02 |
| CV (%) | 10,54 | | 5,22 | | 6,70 | | 7,99 | | 13,59 | |

* Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na horizontal ou maiúsculas na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade,

observaram sintomas visuais de deficiência de zinco nas folhas novas que apresentaram concentração de $4,80 \text{ mg kg}^{-1}$ de zinco ativo.

A progênie Caturra Amarelo 4 teve a menor concentração de zinco ativo nas folhas inferiores (ZAFI), respectivamente $2,70$ e $1,99 \text{ mg kg}^{-1}$ nos tratamentos com e sem zinco na solução (Quadro 5). As maiores médias para esta característica foram observadas nas progênies UFV 4066-3 ($8,65 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco) e H-504-5-6-1 MS ($5,05 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco). Os dados indicam que na progênie UFV 4066-3 as folhas inferiores, as quais apresentavam sinais de senescência, possivelmente seja um local de acúmulo de zinco quando o suprimento do elemento é adequado, o que não foi observado para o caule desta progênie, evidenciando o transporte de zinco ativo na seiva xilemática. Na progênie Caturra Amarelo 4, a baixa concentração de ZAFI foi acompanhada de baixo valor de ZAC (Quadro 5).

Nas folhas recém maduras, na solução nutritiva em que se omitiu zinco, a progênie UFV 4066-3 destacou-se com a maior concentração de ZAFR ($2,19 \text{ mg kg}^{-1}$) e a progênie Caturra Vermelho 2 com a menor concentração ($0,13 \text{ mg kg}^{-1}$). Quando o zinco foi fornecido via solução, as progênies Caturra Amarelo 2 e Caturra Vermelho 3 apresentaram a maior e a menor concentração de ZAFR, respectivamente $3,39$ e $0,44 \text{ mg kg}^{-1}$ (Quadro 5). Cakmak & Marschner (1987) determinaram como níveis críticos de zinco solúvel em água e zinco total em folhas de algodoeiro (*Gossypium hirsutum*), valores de $6,0 \text{ mg kg}^{-1}$ e $12,0 \text{ mg kg}^{-1}$ de matéria seca, respectivamente. Em folhas maduras de tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill.), as concentrações deficiente e normal de zinco ativo foram $4,90$ e $27,70 \text{ mg kg}^{-1}$ nas doses de $0,15$ e $1,53 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, respectivamente, em solução nutritiva (Kaya & Higgs, 2001).

A concentração de zinco ativo na raiz (ZAR) foi reduzida em todos os tratamentos na ausência de zinco em solução, os quais não diferiram entre si nesta condição. Na progênie Caturra Amarelo 1 foram constatadas as maiores concentrações de ZAR ($130,58 \text{ mg kg}^{-1}$) e ZTR ($187,73 \text{ mg kg}^{-1}$), apesar desta progênie apresentar pequena MSR em comparação com as demais, podendo-se presumir maior eficiência nos mecanismos cinéticos de absorção de zinco por esta progênie. A progênie IAC 4376-5 (Tupi) exibiu as menores concentrações de ZAR ($39,12 \text{ mg kg}^{-1}$) e ZTR ($45,63 \text{ mg kg}^{-1}$), porém, com maior produção de MSR que a progênie Caturra Amarelo 1.

A quantidade do nutriente acumulado na matéria seca vegetal, expressa na forma de conteúdo total do nutriente, é uma das principais maneiras de se determinar a exigência nutricional da planta. O conteúdo de zinco total em todas as partes das plantas cultivadas na solução contendo $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco foi significativamente superior ao conteúdo de zinco total das plantas crescidas sob restrição de zinco em solução nutritiva (Quadro 6). O conteúdo médio de zinco total nas folhas dos cafeeiros foi 325,73 e 204,41 μg , nas concentrações $6,0$ e $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco em solução nutritiva, respectivamente, o que corresponde a uma redução média de 37,25% no conteúdo de zinco nas folhas das plantas que não receberam o micronutriente em solução. Nas plantas tratadas com $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco em solução, a progênie UFV 4066-3 apresentou a maior média para conteúdo de zinco total nas folhas, 388,11 μg , não diferindo da progênie Caturra Amarelo 2, com 363,37 μg , enquanto a progênie UFV 4066-5 apresentou a menor média, 267,41 μg , estatisticamente semelhante à progênie Caturra Amarelo 4, com 290,36 μg . Na solução em que se omitiu zinco, a progênie Caturra Amarelo 2 foi superior às demais progênies para o conteúdo de zinco total nas folhas (261,38 μg).

O conteúdo de zinco total no caule, para os cafeeiros que receberam zinco na solução foi, em média, 78,77% superior ao conteúdo de zinco no caule das plantas que não receberam o elemento, com destaque para as progênies IAC 4376-1 (Tupi) e UFV 4066-1 (Quadro 6). Na solução em que se omitiu zinco, as progênies Caturra Amarelo 2 e UFV 4066-1 apresentaram as maiores médias de conteúdo de zinco total no caule, e as demais progênies não diferiram entre si. Assim, quando houve restrição no fornecimento de zinco em solução, notou-se que a progênie Caturra Amarelo 2 apresentou elevado conteúdo de zinco nas folhas e no caule, o que pode estar associado ao grande volume de raízes produzidas por esta progênie (Quadro 3) e sugerir elevada eficiência de absorção e de transporte de zinco para a parte aérea. No entanto, a produção de biomassa de folhas pela progênie Caturra Amarelo 2 foi baixa (Quadro 3), o que a coloca em posição de baixa eficiência de produção de biomassa frente à elevada demanda de zinco.

O sistema radicular foi a parte da planta de maior acúmulo de zinco, para os cafeeiros cultivados na concentração $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco em solução. Nesta condição, os cafeeiros acumularam, em média, 1575,18 μg de zinco nas raízes, enquanto na concentração $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco em solução, o conteúdo médio do elemento nas

Quadro 6 – Médias do conteúdo de zinco, em ug, em diferentes partes da planta e razão entre conteúdo de zinco na parte aérea e na raiz (Pa/R) de 14 progênies de cafeeiros em resposta às duas concentrações de zinco em solução nutritiva

| Progênies | Folhas* | | | Caule | | | Raiz | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------------------------|---|----------------------------|--------|----------------------------|------|----------------------------|---|----------------------------|--------|----------------------------|---|---------|---|-----|--------|---|---|
| | 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | 0,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | 0,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | 0,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | | | | | | |
| UFV 4066-5 | 267,41 | a | H | 183,88 | b | EF | 492,86 | a | DE | 85,32 | b | C | 934,81 | a | F | 118,62 | b | A |
| IAC 4376-1 (Tupi) | 345,48 | a | BCD | 195,79 | b | DE | 701,70 | a | A | 105,81 | b | C | 1067,46 | a | F | 123,12 | b | A |
| Caturra Amarelo 4 | 290,36 | a | GH | 208,63 | b | BCDE | 356,70 | a | H | 106,64 | b | C | 1906,44 | a | B | 129,91 | b | A |
| Caturra Amarelo 1 | 328,67 | a | CDE | 195,81 | b | DE | 479,96 | a | DEF | 83,50 | b | C | 2246,61 | a | A | 142,63 | b | A |
| Caturra Amarelo 3 | 343,44 | a | BCD | 200,04 | b | CDE | 557,89 | a | BC | 79,43 | b | C | 1593,49 | a | C | 128,51 | b | A |
| UFV 4066-3 | 388,11 | a | A | 190,74 | b | E | 508,94 | a | D | 122,45 | b | C | 2316,21 | a | A | 123,67 | b | A |
| UFV 4066-1 | 321,27 | a | DEF | 223,15 | b | BC | 739,25 | a | A | 182,93 | b | B | 1371,01 | a | DE | 141,75 | b | A |
| H-504-5-6-1 MS | 303,60 | a | FG | 226,27 | b | B | 519,56 | a | CD | 93,40 | b | C | 1399,94 | a | DE | 144,39 | b | A |
| Caturra Amarelo 2 | 363,37 | a | AB | 261,38 | b | A | 491,99 | a | DE | 229,09 | b | A | 1880,22 | a | B | 170,25 | b | A |
| Caturra Vermelho 1 | 316,23 | a | EF | 217,77 | b | BCD | 458,65 | a | EFG | 86,46 | b | C | 2291,04 | a | A | 134,37 | b | A |
| Caturra Vermelho 2 | 310,00 | a | EFG | 162,05 | b | F | 505,00 | a | D | 80,69 | b | C | 1508,12 | a | CD | 96,36 | b | A |
| Caturra Vermelho 4 | 310,63 | a | EFG | 184,83 | b | EF | 427,12 | a | G | 123,29 | b | C | 1330,85 | a | E | 126,13 | b | A |
| IAC 4376-5 (Tupi) | 318,44 | a | EF | 224,36 | b | BC | 584,35 | a | B | 81,84 | b | C | 719,79 | a | G | 110,63 | b | A |
| Caturra Vermelho 3 | 353,20 | a | BC | 187,05 | b | EF | 440,78 | a | FG | 81,21 | b | C | 1486,61 | a | CDE | 126,87 | b | A |
| Média | 325,73 | | 204,41 | | 518,91 | | 110,15 | | 1575,18 | | 129,80 | | | | | | | |
| CV (%) | 9,24 | | 14,18 | | 18,87 | | | | | | | | | | | | | |

Continua...

Quadro 6, Cont.

| Progênes | Parte Aérea | | | | | Total | | | | | Pa/R | | | | |
|--------------------|----------------------------|-------|----------------------------|------|---------|----------------------------|--------|----------------------------|------|-------|----------------------------|-------|----------------------------|--|--|
| | 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | 0,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | | 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | 0,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | | 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | 0,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ | | |
| UFV 4066-5 | 760,26 | a EF | 269,20 | b CD | 1695,08 | a I | 387,82 | b BC | 0,83 | b BC | 2,30 | a BCD | | | |
| IAC 4376-1 (Tupi) | 1047,18 | a A | 301,60 | b CD | 2114,64 | a GH | 424,71 | b BC | 1,01 | b B | 2,49 | a B | | | |
| Caturra Amarelo 4 | 647,06 | a G | 315,27 | b C | 2553,49 | a BC | 445,18 | b BC | 0,34 | b E | 2,44 | a BC | | | |
| Caturra Amarelo 1 | 808,63 | a CDE | 279,31 | b CD | 3055,23 | a A | 421,94 | b BC | 0,37 | b E | 1,97 | a E | | | |
| Caturra Amarelo 3 | 901,33 | a B | 279,47 | b CD | 2494,83 | a CD | 407,99 | b BC | 0,57 | b CDE | 2,23 | a CD | | | |
| UFV 4066-3 | 897,05 | a B | 313,19 | b C | 3213,26 | a A | 436,86 | b BC | 0,39 | b E | 2,54 | a B | | | |
| UFV 4066-1 | 1060,51 | a A | 406,08 | b B | 2431,52 | a CDE | 547,83 | b AB | 0,78 | b BCD | 2,89 | a A | | | |
| H-504-5-6-1 MS | 823,16 | a CD | 319,67 | b C | 2223,10 | a FGH | 464,07 | b BC | 0,59 | b CDE | 2,22 | a CDE | | | |
| Caturra Amarelo 2 | 855,36 | a BC | 490,47 | b A | 2735,57 | a B | 660,71 | b A | 0,47 | b E | 2,93 | a A | | | |
| Caturra Vermelho 1 | 774,88 | a DEF | 304,23 | b C | 3065,91 | a A | 438,60 | b BC | 0,34 | b E | 2,29 | a BCD | | | |
| Caturra Vermelho 2 | 815,00 | a CDE | 242,74 | b D | 2323,12 | a DEF | 339,09 | b C | 0,54 | b DE | 2,53 | a B | | | |
| Caturra Vermelho 4 | 737,75 | a F | 308,12 | b C | 2068,59 | a H | 434,24 | b BC | 0,56 | b DE | 2,46 | a BC | | | |
| IAC 4376-5 (Tupi) | 902,79 | a B | 306,20 | b C | 1622,58 | a I | 416,83 | b BC | 1,27 | b A | 2,89 | a A | | | |
| Caturra Vermelho 3 | 793,98 | a DEF | 268,25 | b CD | 2280,58 | a EFG | 395,12 | b BC | 0,54 | b DE | 2,16 | a DE | | | |
| Média | 844,64 | | 314,55 | | 2419,82 | | 444,35 | | 0,61 | | 2,45 | | | | |
| CV (%) | | 10,28 | | | | 13,04 | | | | 16,40 | | | | | |

* Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na horizontal ou maiúsculas na vertical não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

raízes foi 129,80 μg , ou seja, 91,76% menos zinco em relação à média de conteúdo de zinco total nas raízes, das progênies cultivadas na solução com 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco (Quadro 6). As progênies Caturra Amarelo 1, UFV 4066-3 e Caturra Vermelho 1 acumularam as maiores quantidades de zinco na raiz, não diferindo estatisticamente entre si. Entretanto, a progênie UFV 4066-3 apresentou elevada produção de matéria seca de raiz (Quadro 3), enquanto a progênie Caturra Amarelo 1 foi estatisticamente inferior à UFV 4066-3 na produção de matéria seca de raiz e superior a esta para a concentração de zinco total na raiz (Quadro 4). Estes resultados, provavelmente indicam que a cinética de absorção de zinco da progênie Caturra Amarelo 1 proporcionou efeito compensatório em relação ao maior volume de raízes da progênie UFV 4066-3. Possivelmente, a progênie Caturra Amarelo 1 apresente maiores valores de K_m e $V_{m\acute{a}x}$ para zinco em relação à progênie UFV 4066-3. Os cafeeiros não diferiram entre si para o conteúdo de zinco na raiz, na solução em que se omitiu zinco.

A quantidade de zinco acumulada na parte aérea dos cafeeiros reflete o acúmulo do elemento em folhas e caules. Assim, observa-se que o maior conteúdo de zinco total na parte aérea das progênies IAC 4376-1 (Tupi), UFV 4066-1 e Caturra Amarelo 2 é decorrente do elevado conteúdo do elemento no caule destas progênies (Quadro 6). A razão entre o conteúdo de zinco total na parte aérea e o conteúdo de zinco total na raiz, denominada razão Pa/R, permite avaliar a partição do elemento na planta. No Quadro 6, nota-se que as plantas crescidas na solução com 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco apresentaram menor razão Pa/R, em relação às plantas cultivadas na solução com restrição no fornecimento de zinco. Estes resultados pressupõem que o sistema radicular do cafeeiro é um local de compartimentalização de zinco quando não há restrição no fornecimento desse elemento, o que é devido ao grande acúmulo de zinco nas raízes das plantas em contato com a solução 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco. Souza et al. (2001) verificaram em mudas de cafeeiro que, sob baixa disponibilidade de zinco a translocação de zinco das raízes para a parte aérea é elevada, enquanto nas doses mais elevadas ocorreu decréscimo na translocação. Segundo os mesmos autores, devido ao pequeno requerimento de zinco pelo cafeeiro, possivelmente ocorre algum mecanismo de compartimentalização de zinco nas raízes, visando amenizar a toxidez deste elemento.

Entretanto, quando imposta a restrição no fornecimento de zinco, as plantas apresentaram comportamento diferenciado. Nesta situação, não houve diferença significativa para conteúdo de zinco total nas raízes dos cafeeiros e, portanto, as

progênes UFV 4066-1, Caturra Amarelo 2 e Caturra Vermelho 4 apresentaram efetivamente maior alocação de zinco na parte aérea.

Observando-se as médias de conteúdo total de zinco, resultante do somatório do conteúdo nas diferentes partes da planta, na solução com $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, nota-se o maior acúmulo de zinco para as progênes Caturra Amarelo 1, UFV 4066-3 e Caturra Vermelho 1, sem diferença estatística entre si, sugerindo elevada exigência nutricional em zinco para estas progênes. No entanto, quando observadas as características de crescimento e de concentração de zinco, estas progênes apresentam comportamento diferenciado. A progênie Caturra Amarelo 1 apresentou pequena produção de matéria seca (Quadro 3), porém, elevada concentração de zinco na raiz (Quadro 4), a progênie Caturra Vermelho 1 produziu pequena quantidade de matéria seca de folhas e de parte aérea, elevada matéria seca de raiz e elevada concentração de zinco total nas folhas apicais e nas folhas recém-maduras, enquanto apenas a progênie UFV 4066-3 apresentou elevada produção de matéria seca de folhas, de parte aérea e matéria seca total, e ainda elevada concentração de zinco total em raízes e folhas inferiores. Estes resultados indicam que as diferentes progênes de cafeeiros, embora acumulem quantidades semelhantes de zinco, apresentam capacidade diferenciada de utilização do elemento, refletindo-se em diferenças na produção de biomassa. Este mesmo comportamento pode ser verificado para as progênes Caturra Amarelo 2 e UFV 4066-1 cultivadas na solução em que se omitiu zinco.

O baixo conteúdo de zinco total acumulado nas progênes UFV 4066-5 e IAC 4376-5 (Tupi) (Quadro 6) pressupõe menor exigência em zinco, porém, estas progênes apresentaram pequena produção de biomassa (Quadro 3), demonstrando que a pequena exigência nutricional para zinco não implica, necessariamente, em maior eficiência nutricional da planta.

Pelos dados dos Quadros 2 a 6 nota-se a existência de grande variabilidade entre as progênes para as características avaliadas. Diante do número de progênes e das variáveis estudadas, a interpretação dos resultados com base na análise estatística univariada apresenta algumas restrições que dificultam uma definição mais precisa da importância das características em estudo e do comportamento de determinada progênie. Assim, com o objetivo de identificar as características que melhor expressem o comportamento das progênes de cafeeiros em relação ao zinco e promover o agrupamento de progênes semelhantes, os dados foram submetidos à análise estatística por técnicas multivariadas.

No Quadro 7 encontra-se o agrupamento das 14 progênies de cafeeiros obtido pelo método de Tocher, em função dos percentuais de redução das características de crescimento. A análise dos dados resultou na formação de quatro grupos, sendo que grupo I reuniu dez das 14 progênies estudadas, o grupo II as progênies UFV 4066-5 e Caturra Vermelho 1, o grupo III representado pela progênie IAC 4376-5 (Tupi) e o grupo IV pela progênie UFV 4066-3. Quando se omitiu zinco na solução nutritiva, o grupo III apresentou redução percentual apenas da MSR (19,12%), e incrementou todas as demais variáveis de crescimento analisadas, com destaque para o incremento de 26,10% no NFOL (Quadro 6). Na mesma condição, o grupo II reduziu apenas o NFOL (2,57% e a MSR (10,96%), incrementando as demais características de crescimento. Este comportamento indica uma baixa exigência de zinco pelos grupos II e III, ou mesmo efeito tóxico da dose $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco. O grupo IV, representado pela progênie UFV 4066-3, demonstrou ser o mais exigente em zinco, apresentando os maiores percentuais de redução nas características de crescimento sob restrição no fornecimento de zinco, com destaque para a MSPA exibindo 23,27% de redução (Quadro 6). O grupo I, o qual reuniu o maior número de progênies, demonstrou comportamento intermediário entre os grupos II e III (menos exigentes em zinco) e IV (mais exigente em zinco).

A Figura 1 exibe a dispersão gráfica dos genótipos no plano bidimensional, envolvendo a primeira e a segunda variáveis canônicas, as quais acumularam 64,32% da variação total disponível. Neste caso, é necessário proceder a análise entre a primeira e a terceira variáveis canônicas (Figura 2), as quais foram responsáveis por 13,41% da variação total e acumularam 77,73% da variação total disponível. Nota-se, claramente, o distanciamento entre os grupos de progênies e a proximidade entre as progênies do grupo I, confirmando a eficácia do método na discriminação destas progênies, conforme caracterizado na análise de agrupamento pelo método de Tocher (Quadro 7).

Neste trabalho, as reduções percentuais da AF e NFOL apresentaram a maior importância relativa para divergência entre as progênies, enquanto as reduções percentuais da MSPA, MST e MSR demonstraram a menor importância relativa. Os resultados indicam que as variáveis MSPA, MST e MSR são relativamente invariantes ou representadas por outros caracteres, ou combinação de caracteres, que apresentam correlação elevada, caracterizando redundância.

Quadro 7 – Agrupamento de 14 progênies de cafeeiros pelo método de Tocher, com base na Distância Generalizada de Mahalanobis, em função do percentual de redução (valores positivos) ou incremento (valores negativos) causado pelo zinco em oito variáveis de crescimento e respectivas médias por grupo formado

| Grupos | Progênies* | % de Redução ou Incremento | | | | | | | |
|--------|---------------------------------|----------------------------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|
| | | DCAU | ALT | NFOL | AF | MSF | MSPA | MSR | MST |
| I | 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 14 | 2,79 | 5,19 | -4,40 | 0,64 | 2,12 | 2,09 | -2,07 | 1,54 |
| II | 1,10 | -2,98 | -2,31 | 2,57 | -3,73 | -13,13 | -10,23 | 10,96 | -4,40 |
| III | 13 | -9,45 | -6,48 | -26,10 | -3,25 | -10,47 | -11,44 | 19,12 | -2,18 |
| IV | 6 | 12,63 | 6,32 | 15,76 | 10,20 | 22,35 | 23,27 | -7,11 | 17,55 |

* 1(UFV 4066-5), 2(IAC 4376-1 - Tupi), 3(Caturra Amarelo 4), 4(Caturra Amarelo 1), 5(Caturra Amarelo 3), 6(UFV 4066-3), 7(UFV 4066-1), 8(H-504-5-6-1 MS), 9(Caturra Amarelo 2), 10(Caturra Vermelho 1), 11(Caturra Vermelho 2), 12(Caturra Vermelho 4), 13(IAC 4376-5 - Tupi), 14(Caturra Vermelho 3)

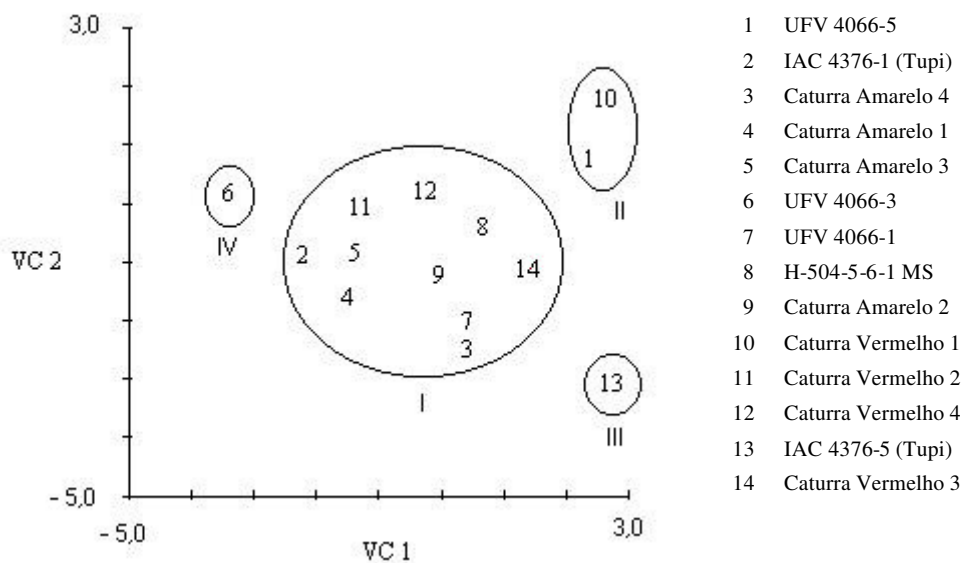


Figura 1 – Dispersão gráfica de 14 progênies de cafeeiros em relação a primeira (VC 1) e segunda (VC 2) variáveis canônicas, obtidas com base em oito caracteres de crescimento.

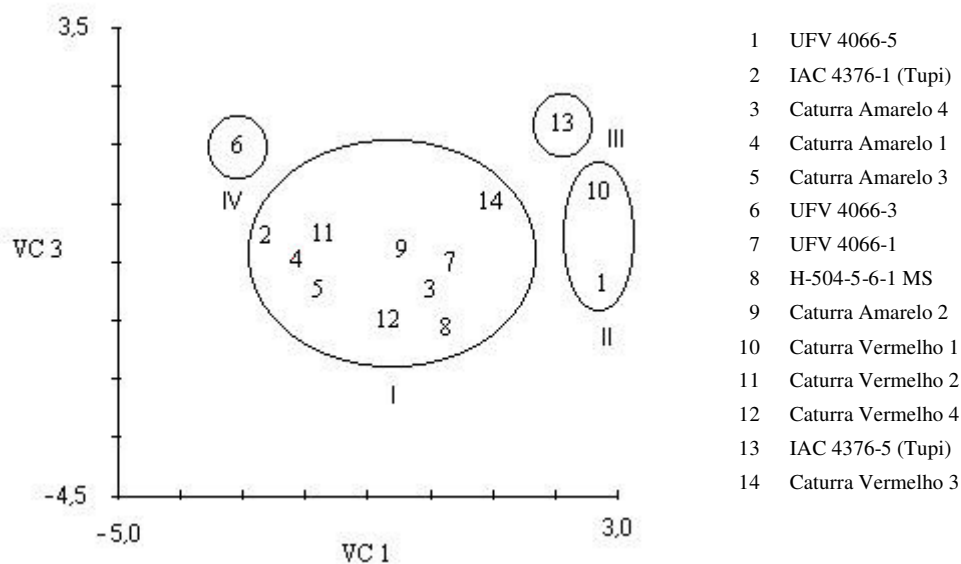


Figura 2 – Dispersão gráfica de 14 progênies de cafeeiros em relação a primeira (VC 1) e terceira (VC 3) variáveis canônicas, obtidas com base em oito caracteres de crescimento.

A análise de dissimilaridade para as variáveis de concentração de zinco demonstrou maior dissimilaridade entre as progênies UFV 4066-3 e IAC 4376-5 (Tupi) ($D^2 = 872,42$), e maior semelhança entre as progênies Caturra Vermelho 1 e Caturra Vermelho 2 ($D^2 = 12,55$). A redução percentual de ZAFR foi a variável com maior contribuição relativa para divergência entre as progênies (26,64%), enquanto a redução percentual de ZTFI apresentou a menor contribuição (0,89%). O Quadro 8 mostra o agrupamento das 14 progênies de cafeeiros pelo método de Tocher, em função dos percentuais de redução das concentrações de zinco total e ativo, onde nota-se a formação de cinco grupos. Todos os grupos apresentaram comportamento semelhante com relação aos percentuais de redução de ZTFI, ZTFR e ZTR, exibindo valores médios de 34,06, 37,04 e 89,32% de redução, respectivamente, sendo que as maiores diferenças foram observadas para as reduções percentuais das concentrações de zinco ativo. O grupo IV apresentou a menor redução percentual de ZTFA (1,06%), o maior incremento no teor de ZAFR (24,09%) e a maior redução de ZAC (82,25%) sob restrição no fornecimento de zinco, indicando elevada mobilização do elemento para a região de crescimento da parte aérea. Em contrapartida, o grupo III apresentou a maior redução percentual de ZAFR (23,01%) e a menor redução percentual de ZTC (51,51%) e ZAC (37,89%), o que implica em maior retenção de zinco no caule e menor translocação do elemento para a região meristemática da parte aérea em situações de restrição no fornecimento de zinco (Quadro 8).

Quando o fornecimento de zinco foi restringido, o grupo II incrementou a concentração de ZTFR em 44,80% e o grupo V reduziu esta variável em 77,06% (Quadro 8), o que pode ser comprovado pelo Quadro 5, na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, onde nota-se o elevado teor de ZAFR da progênie UFV 4066-3, representante do grupo II, e o baixo teor de ZAFR da progênie IAC 4376-5 (Tupi), a qual compõe o grupo V. Estes resultados pressupõem elevada exigência de zinco pela progênie UFV 4066-3 e baixa exigência pela progênie IAC 4376-5. O grupo I demonstrou comportamento intermediário aos demais, tornando-se difícil uma classificação mais precisa. As Figuras 3 e 4 mostram a dispersão gráfica dos genótipos no plano bidimensional, envolvendo a primeira e a segunda variáveis canônicas, as quais acumularam 52,23% da variação total disponível, e a primeira e a terceira variáveis canônicas, abrangendo 73,14% da variação total disponível. Através dos coeficientes de ponderação dos teores de zinco total e ativo nas variáveis padronizadas determinaram-se os caracteres com maior importância relativa na discriminação das progênies de cafeeiros, em ordem

Quadro 8 – Agrupamento de 14 progênies de cafeeiros pelo método de Tocher, com base na Distância Generalizada de Mahalanobis, em função do percentual de redução (valores positivos) ou incremento (valores negativos) causado pelo zinco em dez variáveis de concentração de zinco e respectivas médias por grupo formado

| Grupos | Progênies* | % de Redução ou Incremento | | | | | | | | | |
|--------|----------------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|-------|
| | | ZTFA | ZTFI | ZTFR | ZTC | ZTR | ZAFA | ZAFI | ZAFR | ZAC | ZAR |
| I | 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 11, 12, 14 | 30,11 | 33,22 | 41,44 | 79,82 | 91,29 | 15,51 | 28,92 | 34,09 | 65,46 | 90,74 |
| II | 6 | 25,64 | 36,44 | 39,20 | 67,60 | 94,82 | 7,89 | 52,21 | -44,80 | 42,62 | 94,06 |
| III | 9 | 27,31 | 28,40 | 33,02 | 51,51 | 90,18 | 23,01 | 29,63 | 52,69 | 37,89 | 88,87 |
| IV | 8 | 1,06 | 35,15 | 37,01 | 82,05 | 89,69 | -24,09 | 33,77 | 17,73 | 82,25 | 90,84 |
| V | 13 | 33,07 | 37,08 | 36,69 | 87,67 | 80,65 | -3,29 | 47,79 | 77,06 | 74,44 | 79,02 |

* 1(UFV 4066-5), 2(IAC 4376-1 - Tupi), 3(Caturra Amarelo 4), 4(Caturra Amarelo 1), 5(Caturra Amarelo 3), 6(UFV 4066-3), 7(UFV 4066-1), 8(H-504-5-6-1 MS), 9(Caturra Amarelo 2), 10(Caturra Vermelho 1), 11(Caturra Vermelho 2), 12(Caturra Vermelho 4), 13(IAC 4376-5 - Tupi), 14(Caturra Vermelho 3).

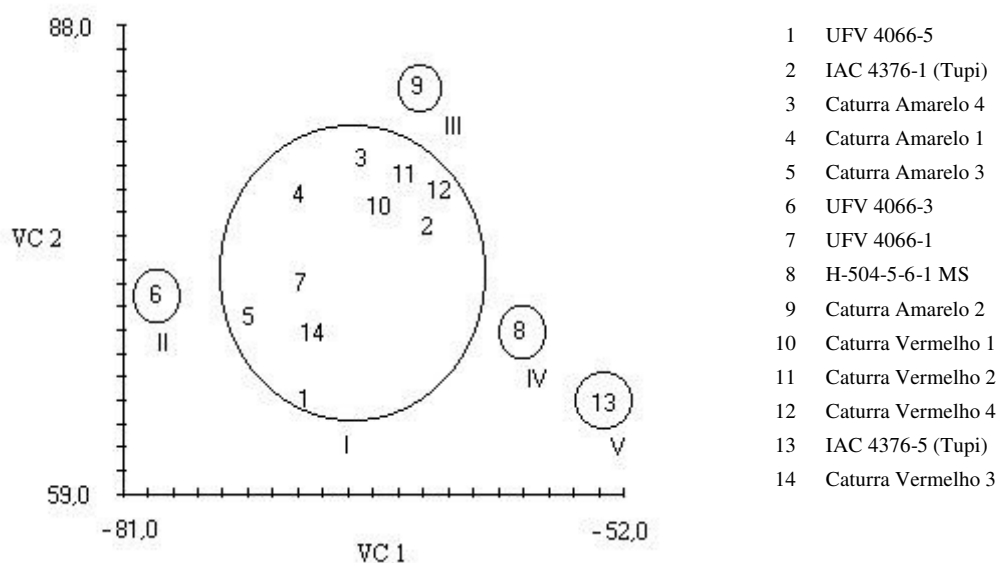


Figura 3 – Dispersão gráfica de 14 progênes de cafeeiros em relação à primeira (VC 1) e segunda (VC 2) variáveis canônicas, obtidas com base em dez caracteres de concentração de zinco.

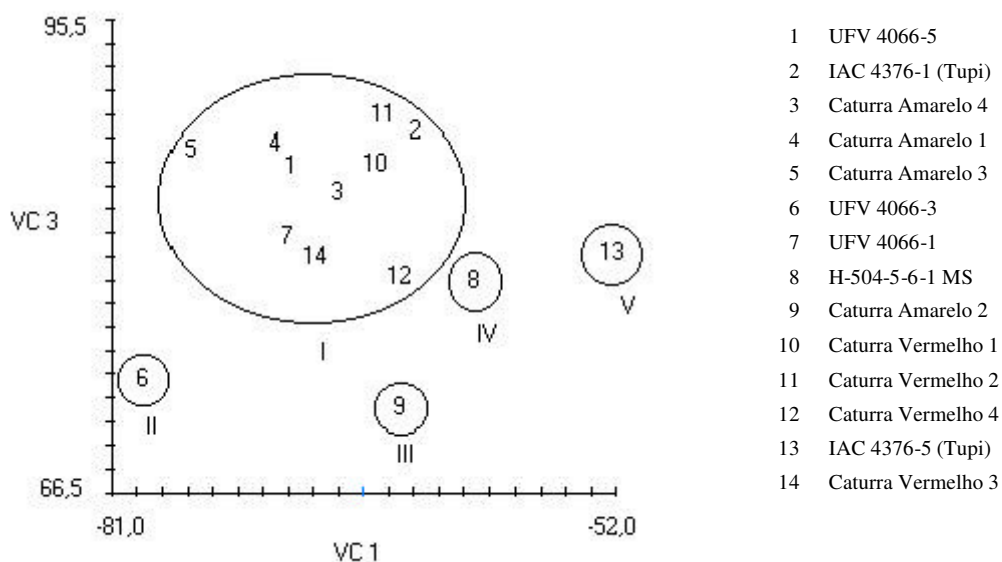


Figura 4 – Dispersão gráfica de 14 progênes de cafeeiros em relação à primeira (VC 1) e terceira (VC 3) variáveis canônicas, obtidas com base em dez caracteres de concentração de zinco.

decrecente de importância ZAFR, ZTR, ZTC, ZAFa e ZAFI, sugerindo a realização de estudos mais aprofundados destes na caracterização de progênies de cafeeiros em relação ao zinco.

Para as variáveis de conteúdo de zinco, a análise de dissimilaridade apresentou a maior divergência entre as progênies Caturra Amarelo 2 e IAC 4376-5 (Tupi), com D^2 igual a 170,28, e a maior similaridade entre as progênies Caturra Amarelo 1 e Caturra Vermelho 1, com D^2 de 3,18. Entre as variáveis estudadas, o conteúdo de zinco total no caule apresentou a maior contribuição relativa (52,39%) para divergência entre as progênies de cafeeiros. No Quadro 9 tem-se o agrupamento das 14 progênies de cafeeiros pelo método de Tocher, em função dos percentuais de redução do conteúdo de zinco total em diferentes partes da planta, notando-se a formação de quatro grupos. O grupo I é formado por dez progênies, sendo caracterizado pelas maiores reduções percentuais no conteúdo de zinco nas folhas, raízes e conteúdo total. O grupo IV, representado pela progênie Caturra Amarelo 2, apresentou a menor redução percentual do conteúdo de zinco total nas folhas, caule e parte aérea. Estes resultados, juntamente com os dados do Quadro 6, demonstram elevado acúmulo de zinco pela progênie Caturra Amarelo 2, quando submetida à restrição no fornecimento de zinco em solução nutritiva. As progênies UFV 4066-1 (grupo II) e IAC 4376-5 (Tupi) (grupo III) apresentaram comportamento intermediário entre os grupos I e IV.

A Figura 5 mostra a dispersão gráfica dos genótipos no plano bidimensional, envolvendo a primeira e a segunda variáveis canônicas, as quais acumularam 86,27% da variação total disponível, e o padrão de dispersão apresentado confirma os resultados obtidos no agrupamento pelo método de Tocher. Na Figura 5 é interessante observar que as progênies IAC 4376-5 (Tupi) e UFV 4066-5 são posicionadas em grupos distintos, porém, no plano de dispersão gráfica elas encontram-se relativamente próximas. Este resultado é condizente com o pequeno acúmulo de zinco nas folhas, raízes, parte aérea e na planta toda para estas duas progênies e, indicando baixa exigência em zinco por estas duas progênies.

Quadro 9 – Agrupamento de 14 progênies de cafeeiros pelo método de Tocher, com base na Distância Generalizada de Mahalanobis, em função do percentual de redução (valores positivos) ou incremento (valores negativos) causado pelo zinco em cinco variáveis de conteúdo de zinco e respectivas médias por grupo formado

| Grupos | Progênies* | % de Redução ou Incremento | | | | |
|--------|-------------------------------------|----------------------------|-------|-------|-------------|-------|
| | | Folhas | Caule | Raiz | Parte Aérea | Total |
| I | 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 11, 12, 14 | 38,39 | 79,94 | 91,60 | 63,63 | 82,37 |
| II | 7 | 30,46 | 75,01 | 89,56 | 61,67 | 77,44 |
| III | 13 | 29,58 | 86,01 | 84,34 | 66,04 | 74,16 |
| IV | 9 | 28,10 | 53,30 | 90,69 | 42,61 | 75,55 |

* 1(UFV 4066-5), 2(IAC 4376-1 - Tupi), 3(Caturra Amarelo 4), 4(Caturra Amarelo 1), 5(Caturra Amarelo 3), 6(UFV 4066-3), 7(UFV 4066-1), 8(H-504-5-6-1 MS), 9(Caturra Amarelo 2), 10(Caturra Vermelho 1), 11(Caturra Vermelho 2), 12(Caturra Vermelho 4), 13(IAC 4376-5 - Tupi), 14(Caturra Vermelho 3)

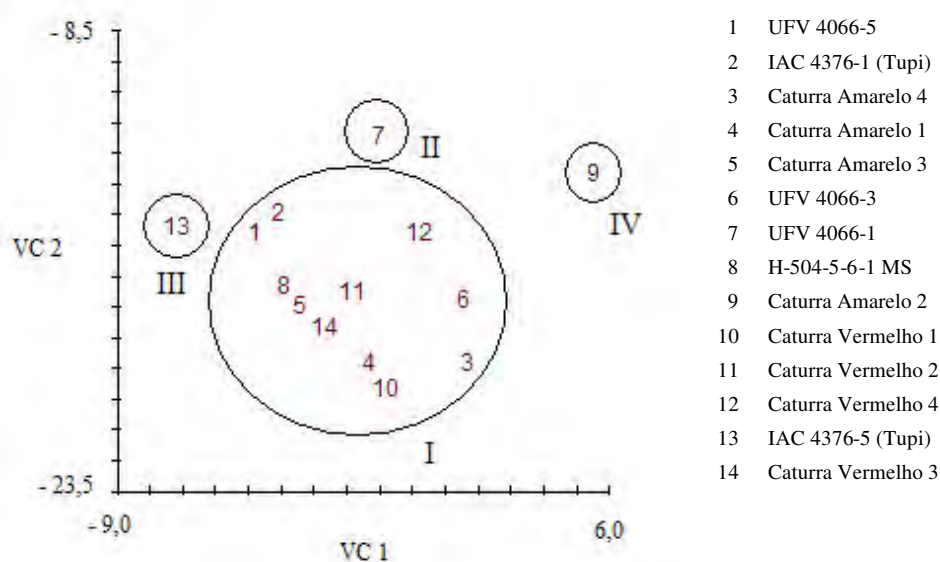


Figura 5 – Dispersão gráfica de 14 progênies de cafeeiros em relação à primeira (VC 1) e segunda (VC 2) variáveis canônicas, obtidas com base em cinco caracteres de conteúdo de zinco.

4. CONCLUSÕES

1) O estado nutricional afetou a habilidade do cafeeiro em produzir matéria seca na parte aérea e raízes, e de absorver zinco, evidenciando grande variabilidade entre as progênies avaliadas.

2) A progênie IAC 4376-5 (Tupi) mostrou-se menos exigente em zinco, enquanto a progênie UFV 4066-3 foi a mais sensível à restrição no fornecimento de zinco, em relação às variáveis de crescimento.

3) As progênies IAC 4376-5 (Tupi) e UFV 4066-5 apresentaram baixa exigência em zinco, e as progênies Caturra Amarelo 1, UFV 4066-3, Caturra Amarelo 2 e Caturra Vermelho 2 apresentaram alta exigência em zinco, em função conteúdo de zinco total.

4) As reduções percentuais de área foliar, número de folhas, zinco ativo na folha completamente expandida e zinco total na raiz foram as características que apresentaram maior importância relativa na discriminação das progênies avaliadas.

LITERATURA CITADA

AMARAL, J.F.T. **Eficiência de produção de raízes, absorção, translocação e utilização de nutrientes em cultivares de café arábica**. 2002. 97 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CAKMAK, I.; MARSCHNER, H. Mechanism of phosphorus-induced zinc deficiency in cotton. III. Changes in physiological availability of zinc in plants. **Physiol. Plantarum**, v. 70, p. 13-20, 1987.

CLARK, R. B. Characterization of phosphatase of intact morize roots. **J. Agric. Food Chem.**, v. 23, p. 458-460, 1975.

CORREA, J. B.; GARCIA, A. W. R. Extração de nutrientes pelos cafeeiros mundo novo e catuaí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 8., Campos do Jordão, 1980. **Anais...** Rio de Janeiro, IBC/GERCA, 1980. p.339-344.

CRUZ, C. D. **Programa Genes**: aplicativo computacional em genética e estatística. Viçosa: Editora UFV, 1997. 442 p.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: Editora UFV, 1994. 390 p.

DIAS, L. A. S.; KAGEYAMA, P. Y.; CASTRO, G. C. T. Divergência genética multivariada na preservação de germoplasma de cacau (*Theobroma cacao* L.). **Agrotropica**, v. 9, n. 1, p. :29-40, 1997.

FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **J. Plant Nutr.**, v. 24, n. 8, p. 1269-1290, 2001.

FONSECA, A. F. A. **Análises biométricas em café conillon (*Coffea canephora* Pierre)**. 1999. 121 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

FONTES, R. L. F. **Purificação de soluções nutritivas para indução de deficiência de zinco e cobre em plantas**. 1986. 55 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

FOY, C. D.; CHANEY, R. L.; WHITE, M. C. The physiology of metal toxicity in plants. **Ann. Rev. Plant Physiol.**, v. 29, p. 511-566, 1978.

GENC, Y.; McDONALD, G. K.; GRAHAM, R. D. Critical deficiency concentration of zinc in barley genotypes differing in zinc efficiency and its relation to growth responses. **J. Plant Nutr.**, v. 25, n. 3, p. 545-560, 2002.

GRUSAK, M. A.; PEARSON, J. N.; MERENTES, E. The physiology of micronutrient homeostasis in field crops. **Field Crops Research**, v. 60, p. 41-56, 1999.

KAYA, C.; HIGGS, D. Inter-relationships between zinc nutrition, growth parameters and nutrient physiology in a hydroponically grown tomato cultivar. **J. Plant Nutr.**, v. 24, n. 10, p. 1491-1503, 2001.

KIM, T.; MILLS, H. A.; WETZSTEIN, H. Y. Studies on the effect of zinc supply on growth and nutrient uptake in pekan. **J. Plant Nutr.**, v. 25, n. 9, p. 1987-2000, 2002.

LIMA FILHO, O. F.; MALAVOLTA, E. Evaluation of extraction procedures on determination of critical soil and foliar levels of boron and zinc in coffee plants. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, v. 29, n. 7-8, p. 825-833, 1998.

KOZLOWSKI, T. T.; PALLARDY, S. G. *Physiology of woody plants*. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1997. 411 p.

LONERAGAN, J. F.; KIRK, G. J.; WEBB, M. J. Translocation and function of zinc in roots. **J. Plant Nutr.**, v. 10, n. 9-16, p. 1247-1254, 1987.

LONGNECKER, N. E.; ROBSON, A. D. Distribution and transport of zinc in plants. In: ROBSON, A. D. (Ed.) **Zinc in soils and plants**. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic, 1993. p. 79-91.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**, 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação do cafeeiro: colheitas econômicas máximas**. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, 1993. 210 p.

MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A. B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.; YAMADA, T. (Ed.) **Cultura do cafeeiro – fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: Potafos, 1986. p. 165-274.

MALAVOLTA, E.; KLIEMANN, H. J. **Desordens nutricionais no cerrado**. Piracicaba: Potafos, 1985. 136 p.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 1980. 251 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. New York: Academic Press, 1995. 889 p.

MARTINEZ, H. E. P.; NEVES, Y. P.; ZABINI, A. V. Diagnóstico do estado nutricional do cafeeiro. In: ZAMBOLIN, L. (Ed.) **Produção integrada de café**. Viçosa: Suprema, 2003a. p. 397-441.

MARTINEZ, H. E. P.; MENEZES, J. F. S.; SOUZA, R. B.; ALVAREZ VENEGAS, V. H.; GUIMARÃES, P. T. G. Faixas críticas de concentrações de nutrientes e avaliação do estado nutricional de cafeeiro em quatro regiões de Minas Gerais. **Pesq. Agrop. Bras.**, v. 38, n. 6, p. 703-713, 2003b.

MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F.; SACRAMENTO, L. V. S.; RODRIGUES, L. A. Comportamento de variedades de soja cultivadas sob diferentes níveis de fósforo: II. Translocação do fósforo absorvido e eficiência nutricional. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 17, p. 239-244, 1993.

MILLS, H. A.; JONES JR., J. B. **Plant analysis handbook II**. 2. ed. Athens: Micro-Macro-Publishing, 1996. 422 p.

PAIVA, H. N.; CARVALHO, J. G.; SIQUIERA, J. O.; CORREA, J. B. D. Teor, conteúdo e índice de translocação de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* VELL.) submetidas a doses crescentes de zinco. **Ciência Agroflorestral**, v. 13, n. 1, p. 1-10, 2003.

PEARSON, J. N.; RENGEL, Z. Uptake and distribution of ^{65}Zn and ^{54}Mn in wheat grown at sufficient and deficient levels of Zn and Mn. II. During grain development. **J. Exp. Bot.**, v. 46, n. 288, p. 841-845, 1995.

REIS JR., R. A.; MARTINEZ, H. E. P. Adição de Zn e absorção, translocação e utilização de Zn e P por cultivares de cafeeiro. **Scientia Agrícola**, v. 59, n. 3, p. 537-542, 2002.

REUTER, D. J.; ROBSON, J. B. **Plant analysis: interpretation manual**. Inkata Press, 1988. 218 p.

SOARES, C. R. F. S.; GRAZZIOTTI, P. H.; SIQUEIRA, J. O.; CARVALHO, J. G.; MOREIRA, F. M. S. Toxidez de zinco no crescimento e nutrição de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva. **Pesq. Agrop. Bras.**, v. 36, n. 2, p. 339-348, 2001.

SOUZA, C. A. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; NETO, A. E. F.; NOGUEIRA, F. D. Efeito de doses de zinco via solo em três cultivares de cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Ciênc. Agrotec.**, v. 25, n. 4, p. 890-899, 2001.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 2. ed. Sunderland: Sinauer Associates, Inc., Publishers, 1998. 792 p.

WILLSON, K. C. Mineral nutrition and fertilizers needs. In: CLIFORD, N. N.; WILLSON, K. C. (Ed.) **Coffee botany, biochemistry and production of beans and beverage**. Croom Helm, 1986. part 6, p.135-156.

YU, Q.; RENGEL, Z. Micronutrient deficiency influences plant growth and activities of superoxide dismutases in narrow-leaved lupins. **Annals of Botany**, v. 83, p. 175-182, 1999.

CAPÍTULO 2

SELEÇÃO DE PROGÊNIES DE CAFEEIROS (*Coffea arabica* L.) EFICIENTES NO USO DE ZINCO

1. INTRODUÇÃO

O requerimento interno de zinco difere amplamente entre espécies vegetais e genótipos da mesma espécie, refletindo as variações nas concentrações críticas de zinco (Genc et al., 2002). Determinadas variedades de uma cultura, sob as mesmas condições de crescimento, apresentam comportamento distinto em relação às características nutricionais, conduzindo a respostas diferenciais de crescimento e produtividade. Este comportamento pode ser resultante das diferenças varietais em relação ao aproveitamento de nutrientes. Segundo Ahmad et al. (2001), a base genética da nutrição mineral de plantas tem recebido maior atenção nos últimos anos, com o desenvolvimento de pesquisas em relação às variações no requerimento nutricional e na tolerância de plantas a condições de deficiência nutricional, e os resultados destes estudos sugerem o desenvolvimento de cultivares capazes de se adaptarem a diferentes condições de solo, incluindo estresses nutricionais.

A deficiência de zinco ocorre amplamente em solos brasileiros, especialmente em regiões de cerrado devido à pobreza do material de origem do solo, afetando o crescimento e a produtividade das culturas. Na região Sul do Estado de Minas Gerais, Corrêa et al. (2000) relataram que 54,7% das lavouras cafeeiras apresentavam teores foliares de zinco abaixo da faixa crítica definida por Malavolta et al. (1997). Andrade et

al. (2000) constataram elevada amplitude de variação nos teores foliares de micronutrientes em lavouras de café da região Noroeste Fluminense, com valores oscilando entre 4,7 a 51,4 mg kg⁻¹ para zinco e 55,7 a 225,9 mg kg⁻¹ para ferro. Segundo Baligar & Fageria (1997), as estratégias para melhorar a produção agrícola em solos tropicais ácidos incluem práticas de manejo e o uso eficiente dos nutrientes disponíveis, onde a seleção e o desenvolvimento de cultivares capazes de crescer e produzir bem é o principal componente destas estratégias.

Embora a caracterização do material genético seja de grande interesse prático, é necessário o conhecimento dos mecanismos que governam as diferenças varietais, para que maiores progressos sejam alcançados, pois a eficiência de aproveitamento de determinado nutriente pela planta é amplamente afetada por várias outras características. Segundo Gerloff & Gabelman (1983), os mecanismos genéticos controlam as variações nas necessidades nutricionais ao nível de aquisição dos nutrientes do ambiente, movimento dos nutrientes nas raízes e carregamento do xilema, alocação interna dos nutrientes e utilização no metabolismo e crescimento, ou seja, a resposta de determinado genótipo sob condição de estresse nutricional envolve a eficiência em adquirir o nutriente do meio externo, a eficiência em translocá-lo para a parte aérea e produzir eficientemente biomassa de acordo com a quantidade de nutriente adquirida.

Neste sentido, foram definidos vários conceitos de eficiência nutricional, que variam principalmente em função do tipo de estudo e do objetivo do pesquisador. De acordo com Fageria (1998), do ponto de vista agrônomo, a eficiência nutricional pode ser expressa e calculada de três maneiras diferentes: eficiência agrônoma (produção econômica por unidade de nutriente aplicado), eficiência na produção de grãos (produção de grãos por unidade de nutriente acumulado) e eficiência de recuperação (quantidade de nutriente acumulado por unidade de nutriente aplicado). Bailian et al. (1991) abordaram os aspectos nutricionais mais especificamente e definiram a eficiência de uso ou nutricional como resultante do produto entre as eficiências de aquisição e utilização. A eficiência de aquisição, por sua vez, é composta pela eficiência de absorção e eficiência de enraizamento, enquanto a eficiência de utilização contempla a eficiência de transporte e a eficiência de produção de biomassa.

Existem várias definições de eficiência nutricional, porém, a mais comum diz respeito à capacidade da planta em manifestar altas produções em um solo pobre em determinado nutriente. No entanto, geralmente ocorrem variedades eficientes ou

ineficientes em determinadas condições de níveis nutricionais externos. Blair (1993) agrupou as plantas em quatro classes de resposta a um determinado nível de nutrientes, onde se incluem: a) eficiente responsiva – plantas que apresentam alta produtividade em baixos níveis de nutrientes e respondem à adição de fertilizantes; b) ineficiente responsiva – plantas com baixa produtividade em baixos níveis de nutrientes, mas com elevada resposta a adição de nutrientes; c) eficiente não-responsiva – plantas com boa produtividade em baixos níveis de nutrientes, porém que não respondem a adição de fertilizantes; e d) ineficiente não-responsiva – plantas com baixa produtividade em baixos níveis de nutrientes e que não respondem a adição de nutrientes.

A despeito da importância do zinco na nutrição mineral e fisiologia vegetal, as quantidades requeridas para adequado desenvolvimento da planta são pequenas, sendo difícil prevenir contaminações por fontes naturais (propriedades do solo, chuva e vento) ou químicas (herbicidas, inseticidas, fungicidas e fertilizantes), dificultando o controle experimental em nível de campo (Kim et al., 2002). Assim, trabalhos desta natureza são realizados em condições controladas, em casa de vegetação, em cultivo hidropônico, proporcionando alto controle do substrato e maior uniformidade do ambiente radicular, permitindo avaliação mais precisa das variáveis de crescimento e nutrição das plantas (Martinez, 1999). Segundo Genc et al. (2002), o uso desta técnica permitiu a seleção rápida e eficaz de plântulas de cevada (*Hordeum vulgare* L.) eficientes no uso de zinco, apresentando elevada correlação com os resultados de experimentos de campo. Embora a produção de grãos ou a produção econômica sejam as características mais adequadas para avaliação da eficiência nutricional em nível de campo, em condições controladas a produção de matéria seca pode ser utilizada adequadamente com esta finalidade de avaliação (Fageria, 1998).

Este trabalho foi realizado com os objetivos de caracterizar 14 progênies de cafeeiros (*Coffea arabica* L.), na fase de muda, quanto à eficiência nutricional em relação ao zinco, em solução nutritiva; identificar as características mais expressivas na discriminação precoce; e selecionar progênies eficientes nutricionalmente.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente experimento foi conduzido em casa de vegetação, em solução nutritiva estática, no período de novembro de 2002 a novembro de 2003. Utilizou-se a solução de Clark modificada (Martinez, 2002) contendo a seguinte composição: N-NO₃⁻ 7,26 mmol L⁻¹; N-NH₄⁺ 0,90 mmol L⁻¹; P-H₂PO₄⁻ 0,069 mmol L⁻¹; K⁺ 1,80 mmol L⁻¹; Ca⁺⁺ 2,56 mmol L⁻¹; Mg⁺⁺ 0,60 mmol L⁻¹; S-SO₄⁻ 0,60 mmol L⁻¹; B 19,0 μmol L⁻¹; Cu 0,50 μmol L⁻¹; Fe 40,0 μmol L⁻¹; Mn 7,0 μmol L⁻¹; e Mo 0,086 μmol L⁻¹. As soluções-estoque de macronutrientes foram submetidas à técnica de purificação para remoção de zinco, com o reagente pirrolidina ditiocarbamato de amônio (APDC), e entre os micronutrientes apenas o cloreto férrico foi purificado, utilizando-se resina de troca catiônica Dowex 1 X-8 (Fontes, 1986).

As progênies avaliadas neste trabalho fazem parte do programa de melhoramento do cafeeiro da UFV-EPAMIG. As sementes de 14 progênies de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) (Quadro 1) foram germinadas em areia lavada, irrigadas com solução nutritiva de Clark modificada a ¼ de força sem zinco e as mudas transplantadas no estádio de folhas cotiledonares para bandejas contendo a mesma solução, sem zinco, onde permaneceram durante 15 dias para adaptação. Após este período, as mudas foram transferidas para as bandejas definitivas, as quais receberam solução modificada para obtenção das concentrações de 0,0 e 3,0 μmol L⁻¹ de zinco. O experimento constituiu-se de um fatorial 14 x 2 (14 progênies e duas concentrações de zinco) no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições, sendo cada parcela composta de uma planta por progênie.

Quadro 1 – Relação das progênes dos cafeeiros (*Coffea arabica* L.) avaliadas no experimento

| Número | Progênie | Número | Progênie |
|--------|-------------------------------|--------|--|
| 1 | UFV 4066-5 (Tupi IAC 1669-33) | 8 | H-504-5-6-1 MS (Catuaí Vermelho IAC 81 X HT 438-1) |
| 2 | IAC 4376-1 (Tupi) | 9 | Caturra Amarelo 2 |
| 3 | Caturra Amarelo 4 | 10 | Caturra Vermelho 1 |
| 4 | Caturra Amarelo 1 | 11 | Caturra Vermelho 2 |
| 5 | Caturra Amarelo 3 | 12 | Caturra Vermelho 4 |
| 6 | UFV 4066-3 (Tupi IAC 1669-33) | 13 | IAC 4376-5 (Tupi) |
| 7 | UFV 4066-1 (Tupi IAC 1669-33) | 14 | Caturra Vermelho 3 |

A solução foi mantida sob aeração constante com borbulhamento de ar comprimido, o pH ajustado semanalmente a $5,0 \pm 0,5$, com HCl a $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ou NaOH a $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e a troca ou reposição da solução nutritiva realizada mediante a medição da condutividade elétrica (CE), adotando-se como critério de troca ou reposição 30% de depleção do valor inicial da CE. Foram necessárias quatro trocas e quatro reposições de solução durante o experimento, sendo que na quarta troca, a concentração de zinco nos tratamentos que receberam o elemento foi aumentada para $6,0 \text{ } \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, devido à constatação de engrossamento de raízes e necrose de meristemas apicais radiculares em algumas progênes, pressupondo a ocorrência de deficiência de zinco. Ao final do ensaio as plantas foram coletadas, lavadas em água deionizada e separadas em raízes e parte aérea, secas em estufa com circulação forçada de ar a 70° C , por 72 horas, obtendo-se a matéria seca de raízes (MSR), matéria seca da parte aérea (MSPA) e matéria seca total (somatório da MSR e MSPA). Depois de seco, o material foi moído em moinho tipo Wiley com peneira de 20 mesh, tomando-se 500 mg para mineralização nítrico-perclórica.

A concentração de zinco total, em todas as partes da planta (raízes e parte aérea), foi determinada por espectrofotometria de absorção atômica no extrato da digestão nítrico-perclórica, e o conteúdo de zinco nas referidas partes foi calculado a partir da concentração do elemento e a matéria seca de cada parte. Os índices de eficiência nutricional foram obtidos conforme as relações apresentadas a seguir, de acordo com Siddiqi & Glass (1981) e Bailian et al. (1991):

a) Eficiência nutricional (EFN = matéria seca total²/conteúdo de zinco na planta), em dag² mg⁻¹;

a.1) Eficiência de absorção (EAB = conteúdo de zinco na planta/ matéria seca de raiz), em mg dag⁻¹;

a.2) Eficiência de transporte (ET = conteúdo de zinco na parte aérea / conteúdo de zinco na planta), em mg mg⁻¹; e

a.3) Eficiência de produção de biomassa (EPB = matéria seca da parte aérea²/conteúdo de zinco na parte aérea), em dag² mg⁻¹.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e ao teste F, a 1% de probabilidade, fazendo-se o desdobramento das interações, independentemente de sua significância, e as respectivas médias foram comparadas pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade. Todas as análises estatísticas foram realizadas com auxílio do programa GENES (Cruz, 1997).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As progênies dos cafeeiros apresentaram comportamento bastante diferenciado para as variáveis de eficiência nutricional estudadas e em relação ao suprimento de zinco. A variável eficiência de absorção (EAB = mg de zinco absorvido por dag de matéria seca de raiz) foi superior em todos os tratamentos que receberam zinco, em comparação com os tratamentos sem adição de zinco na solução nutritiva (Quadro 2). Este resultado era esperado, pois as plantas foram capazes de absorver mais zinco por unidade de matéria seca de raiz quando o elemento foi disponibilizado via solução (Quadro 2).

Diferenças na absorção de nutrientes têm sido documentadas por vários autores em resposta ao estado nutricional da planta. Martinez et al. (1993a) verificaram que o nível nutricional interno de fósforo afetou a habilidade de plantas de soja (*Glycine max* L. Merrill) em absorver fósforo, conduzindo a alterações na velocidade máxima de absorção ($V_{máx}$), no tamanho e na proporção do sistema radicular. Na ausência de zinco em solução nutritiva, notou-se a proximidade entre os valores de EAB para as progênies estudadas, destacando-se a progênie Caturra Amarelo 2, com a maior EAB, e a progênie Caturra Vermelho 4, com a menor EAB (Quadro 2). Este resultado reflete o maior acúmulo de zinco na progênie Caturra Amarelo 2, ou seja, maior absorção de zinco por unidade de matéria seca de raiz, pois a matéria seca de raiz não diferiu entre as progênies Caturra Amarelo 2 e Caturra Vermelho 4 (Capítulo 1). Com o fornecimento de zinco em solução, a progênie IAC 4376-5 (Tupi) apresentou a menor EAB ($1,036 \text{ mg dag}^{-1}$) e a Caturra Amarelo 1 destacou-se com superioridade a todas as demais,

Quadro 2 – Médias da eficiência de absorção (EAB), da eficiência de transporte (ET), da eficiência de produção de biomassa (EPB) e da eficiência nutricional (EFN) de 14 progênies de cafeeiros em resposta a duas concentrações de zinco em solução nutritiva

| Progênies | EAB ⁽¹⁾ | | | ET ⁽²⁾ | | | EPB ⁽³⁾ | | | EFN ⁽⁴⁾ | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|--------------------------|-------------------------|----|--------------------------|-------------------------|-----|-----------------------------------|-------------------------|---|-----------------------------------|-------------------------|-----|-------|---|----|-------|---|----|-------|---|------|--------|---|----|
| | mg dag ⁻¹ | | | mg mg ⁻¹ | | | dag ² mg ⁻¹ | | | dag ² mg ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | |
| | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmo L ⁻¹ | | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmo L ⁻¹ | | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmo L ⁻¹ | | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmo L ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | |
| UFV 4066-5 | 1,261 | a | H | 0,311 | b | BC | 0,450 | b | C | 0,695 | a | CD | 24,84 | b | BC | 94,18 | a | A | 19,13 | b | A | 102,48 | a | A |
| IAC 4376-1 (Tupi) | 1,998 | a | C | 0,334 | b | ABC | 0,497 | b | B | 0,710 | a | BCD | 17,45 | b | D | 50,98 | a | H | 13,51 | b | BCD | 63,90 | a | IJ |
| Caturra Amarelo 4 | 1,852 | a | D | 0,337 | b | ABC | 0,254 | b | F | 0,709 | a | BCD | 29,00 | b | B | 70,70 | a | D | 12,79 | b | CD | 82,24 | a | D |
| Caturra Amarelo 1 | 2,567 | a | A | 0,323 | b | BC | 0,267 | b | F | 0,662 | a | E | 28,24 | b | B | 66,91 | a | DE | 11,71 | b | D | 75,35 | a | F |
| Caturra Amarelo 3 | 1,881 | a | D | 0,305 | b | BC | 0,362 | b | D | 0,686 | a | CDE | 28,95 | b | B | 76,91 | a | B | 16,62 | b | ABCD | 87,84 | a | C |
| UFV 4066-3 | 2,247 | a | B | 0,295 | b | C | 0,281 | b | F | 0,717 | a | ABC | 34,98 | b | A | 57,27 | a | FG | 15,46 | b | ABCD | 74,94 | a | FG |
| UFV 4066-1 | 1,651 | a | E | 0,385 | b | AB | 0,436 | b | C | 0,742 | a | A | 25,35 | b | BC | 70,06 | a | D | 18,26 | b | AB | 83,65 | a | CD |
| H-504-5-6-1 MS | 1,325 | a | GH | 0,276 | b | C | 0,371 | b | D | 0,689 | a | CDE | 28,17 | b | B | 75,38 | a | BC | 19,04 | b | A | 93,75 | a | B |
| Caturra Amarelo 2 | 1,564 | a | EF | 0,413 | b | A | 0,315 | b | E | 0,744 | a | A | 25,49 | b | BC | 43,63 | a | I | 15,11 | b | ABCD | 59,00 | a | J |
| Caturra Vermelho 1 | 1,608 | a | E | 0,275 | b | C | 0,254 | b | F | 0,695 | a | CD | 23,38 | b | C | 64,23 | a | E | 12,41 | b | CD | 82,50 | a | D |
| Caturra Vermelho 2 | 2,053 | a | C | 0,329 | b | ABC | 0,352 | b | D | 0,715 | a | ABC | 22,80 | b | C | 59,52 | a | F | 12,77 | b | CD | 69,01 | a | HI |
| Caturra Vermelho 4 | 1,408 | a | G | 0,257 | b | C | 0,358 | b | D | 0,711 | a | BC | 22,38 | b | C | 53,43 | a | GH | 14,84 | b | ABCD | 76,24 | a | EF |
| IAC 4376-5 (Tupi) | 1,036 | a | I | 0,341 | b | ABC | 0,559 | b | A | 0,737 | a | AB | 15,39 | b | D | 56,21 | a | FG | 17,34 | b | ABC | 69,80 | a | GH |
| Caturra Vermelho 3 | 1,502 | a | F | 0,312 | b | BC | 0,348 | b | D | 0,680 | a | DE | 23,01 | b | C | 71,40 | a | CD | 14,71 | b | ABCD | 80,93 | a | DE |
| Média | 1,711 | | | 0,321 | | | 0,365 | | | 0,706 | | | 24,96 | | | 65,06 | | | 15,26 | | | 78,69 | | |
| CV (%) | 8,39 | | | 5,58 | | | 10,19 | | | 10,75 | | | | | | | | | | | | | | |

* Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na horizontal ou maiúsculas na vertical não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

¹ Eficiência de absorção de zinco.

² Eficiência de transporte de zinco.

³ Eficiência de produção de biomassa.

⁴ Eficiência nutricional.

absorvendo em média no período considerado 2,567 mg de zinco por decagrama de matéria seca de raiz. Segundo os dados do Capítulo 1, a progênie Caturra Amarelo 1 apresentou pequena produção de matéria seca de raiz, o que pode indicar sua maior eficiência nos mecanismos de absorção de zinco.

Reis Jr. & Martinez (2002) constataram maior eficiência de absorção para a cultivar Catuaí em relação à Conilon, a qual apresentou maior sistema radicular, o que poderia atuar como fator de compensação devido sua menor eficiência de absorção. Segundo Ahmad et al. (2001), a aquisição de nutrientes é um fenômeno complexo que envolve fatores morfológicos (raio radicular, comprimento, massa e superfície de raiz) e fisiológicos ($V_{máx}$, K_m e $C_{mín}$). Assim, as diferenças de EAB observadas entre as progênies podem ser resultantes da maior ou menor capacidade de produção de raízes, das diferenças morfológicas das raízes, ou ainda de diferenças fisiológicas nos mecanismos de absorção de zinco.

A deficiência de zinco pode afetar a síntese e o descarregamento de fitosideróforos e, desta forma, alterar a EAB. Vários autores demonstraram que os fitosideróforos mobilizam não somente ferro, mas também zinco e, possivelmente, outros micronutrientes catiônicos (Welch, 1995). Embora em alguns trabalhos a deficiência de zinco tenha estimulado o descarregamento de fitosideróforos, os resultados são pouco expressivos, pressupondo que a deficiência de zinco conduz à redução da síntese de proteínas, com acúmulo de aminoácidos que podem ser usados no metabolismo de fitosideróforos, incrementando sua síntese (Grusak et al., 1999). A hipótese levantada por Cakmak et al. (1994) é que a deficiência zinco causa uma deficiência funcional de ferro, o qual estaria numa forma fisiologicamente indisponível, conduzindo a uma resposta no descarregamento de fitosideróforos semelhante àquela observada sob deficiência de ferro. A deficiência de zinco pode ainda afetar a integridade de membranas e facilitar a perda de solutos das raízes, inclusive fitosideróforos (Loneragan et al., 1987; Cakmak & Marschner, 1988; Zhang et al., 1991).

A razão entre o conteúdo de zinco na parte aérea e o conteúdo total de zinco na planta indica a eficiência de transporte de zinco (ET). Nesta característica, a progênie IAC 4376-5 (Tupi) destacou-se, independentemente do suprimento de zinco, exibindo valores de 0,559 e 0,737 mg mg⁻¹. Na dose 0,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, não houve diferença significativa para ET entre as progênies IAC 4376-5 (Tupi), UFV 4066-3, UFV 4066-1, Caturra Amarelo 2 e Caturra Vermelho 2 (Quadro 2). A progênie Caturra Amarelo 1

destacou-se pelos baixos valores de ET, tanto em presença quanto ausência de zinco na solução nutritiva (0,267 e 0,662 mg mg⁻¹, respectivamente) (Quadro 2). O fornecimento de zinco reduziu a ET em todas as progênes, as quais não foram capazes de incrementar o transporte de zinco para a parte aérea na mesma proporção com que o nutriente foi fornecido via solução. Por outro lado, com o fornecimento de zinco, ocorreu maior acúmulo desse micronutriente nas raízes, incrementando o acúmulo de zinco total em detrimento do acúmulo na parte aérea das plantas, contribuindo para a baixa ET observada para as progênes Caturra Amarelo 4, Caturra Amarelo 1, UFV 4066-3 e Caturra Vermelho 1.

Diferenças varietais na ET de zinco foram constatadas por Reis Jr. & Martinez (2002), sendo que a cultivar Catuaí apresentou maior eficiência que a Conilon (0,765 e 0,704 mg mg⁻¹, respectivamente). De acordo com Souza et al. (2001), sob baixa disponibilidade de zinco, o maior transporte do elemento para a parte aérea ocorre devido a exigência nutricional para manutenção do metabolismo de divisão celular, o qual é intenso na fase de muda do cafeeiro. Com o fornecimento de zinco, a ET é reduzida, provavelmente devido a algum mecanismo de compartimentalização do elemento na raiz, evitando possíveis efeitos fitotóxicos decorrentes do acúmulo do micronutriente na parte aérea. No entanto, Paiva et al. (2003) verificaram em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* VELL.) que o transporte de zinco para a parte aérea foi incrementado com o aumento da concentração do elemento em solução nutritiva, levando ao surgimento de sintomas de toxidez nas folhas.

No Quadro 2 observa-se que as progênes IAC 4376-1 (Tupi) e IAC 4376-5 (Tupi) apresentaram as menores médias de eficiência de produção de biomassa (EPB = dag² de matéria seca da parte aérea por mg de zinco na parte aérea) na solução com 6,0 μmol L⁻¹ de zinco, demonstrando baixa produção de matéria seca de parte aérea (folhas e ramos) por unidade de zinco contido na parte aérea. No Capítulo 1, verificou-se que estas progênes apresentaram os menores valores de altura de planta, além de baixos valores de matéria seca da parte aérea e área foliar, o que pode estar relacionado à menor EPB por estas progênes (Quadro 3). Neste sentido, Bailian et al. (1991) encontraram correlação positiva entre EPB e altura de planta e EPB e diâmetro do coleto de mudas de Pinus (*Pinus taeda* L.). Nota-se, ainda, que as progênes IAC 4376-1 (Tupi) e IAC 4376-5 (Tupi) apresentaram elevada ET, decorrente do grande acúmulo de zinco na parte aérea, o qual foi verificado para estas plantas no Capítulo 1, porém, estas progênes não foram eficientes no aproveitamento do zinco para produção de biomassa

da parte aérea. A maior EPB na concentração $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco foi constatada para a progênie UFV 4066-3 ($34,98 \text{ dag}^2 \text{ mg}^{-1}$), a qual apresentou elevada produção de matéria seca de parte aérea (Capítulo 1); entretanto, quando submetida à restrição no fornecimento de zinco, a EPB para esta progênie foi baixa, confirmando sua elevada exigência nutricional em zinco, como constatado no Capítulo 1.

Na solução em que se omitiu zinco, a progênie UFV 4066-5 exibiu a maior média para EPB ($94,18 \text{ dag}^2 \text{ mg}^{-1}$), enquanto a progênie Caturra Amarelo 2 apresentou a menor média de EPB ($43,63 \text{ dag}^2 \text{ mg}^{-1}$) (Quadro 2). Observa-se que a progênie Caturra Amarelo 2 tem elevada EAB e ET, sendo capaz de alocar grande parte do zinco absorvido na parte aérea. Entretanto, esta progênie apresenta baixa concentração de zinco ativo na folha apical e elevada concentração de zinco total nestas folhas (Quadros 4 e 5, do Capítulo 1), demonstrando que apenas uma pequena proporção do zinco absorvido é realmente ativa fisiologicamente nos meristemas foliares. Sabendo-se que o crescimento da parte aérea deve-se, em grande parte, ao crescimento e desenvolvimento dos meristemas foliares, os quais são responsáveis pela síntese de ácido indol acético (AIA) (Marshner, 1995), provavelmente a menor EPB da progênie Caturra Amarelo 2 esteja relacionada à menor atividade fisiológica do zinco acumulado em seus tecidos. Pelos resultados da concentração de zinco total e ativo, apresentados nos Quadros 4 e 5, do Capítulo 1, nota-se que para a progênie UFV 4066-5, a fração zinco ativo representa cerca de 20% do zinco total nas folhas apicais, enquanto para a progênie Caturra Amarelo 2 este valor é de apenas 10%.

As progênies estudadas apresentam comportamento diferenciado em relação às variáveis de eficiência nutricional discutidas anteriormente (Quadro 2). Apesar da importância que representam no metabolismo e na produção vegetal, estas variáveis se complementam na composição da eficiência nutricional (EFN) propriamente dita, e, desta forma, a EFN merece especial atenção. EFN (dag de matéria seca produzida por mg de zinco absorvido) apresentou pequena diferença entre progênies na concentração de $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, o que pode ser observado pelo comportamento similar na maior parte das progênies (Quadro 2). Embora a matéria seca total tenha diferido entre as progênies na concentração de $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco (Quadro 3, Capítulo 1), é possível que ocorram variações na velocidade de crescimento das progênies, independentemente do suprimento de zinco, ou ainda a quantidade disponibilizada do micronutriente em solução tenha contribuído para igualar os valores de EFN.

As progênies UFV 4066-5 e Caturra Amarelo 2 exibiram a maior e a menor média de EFN, respectivamente 102,48 e 59,00 $\text{dag}^2 \text{mg}^{-1}$, na solução onde se omitiu zinco (Quadro 2). Nota-se que a progênie UFV 4066-5 destacou-se também na concentração 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco. Pelos resultados do Quadro 2, visualiza-se que a elevada EFN para a progênie UFV 4066-5 resulta de sua elevada EPB, ou seja, a grande capacidade de produção de biomassa da parte aérea por unidade de zinco alocado na parte aérea, uma vez que suas EAB e ET não se destacaram. Para a progênie Caturra Amarelo 2 verificou-se comportamento contrário a este, onde a elevada EAB e ET não compensaram sua baixa EPB, conduzindo à baixa EFN. A eficiência de utilização de zinco (matéria seca produzida por unidade de zinco absorvido) em mudas de cafeeiros foi estudada por Souza et al. (2001), em vasos com solo, constatando que a cultivar Catuaí foi superior à cultivar Icatu e este superior ao Mundo Novo. Diante destes resultados, as progênies UFV 4066-5 e Caturra Amarelo 2 podem ser classificadas com eficiente e ineficiente nutricionalmente para zinco, respectivamente.

Deve-se considerar, porém, que os cálculos para obtenção de eficiência nutricional fornecem valores relativos, onde uma planta considerada eficiente nutricionalmente não apresenta, necessariamente, elevada produção de biomassa. Neste contexto, verifica-se no Quadro 3, do Capítulo 1, que a progênie UFV 4066-5, classificada como eficiente para zinco, apresentou produção de matéria seca de folhas e raízes inferior à progênie UFV 4066-1; entretanto, o elevado conteúdo de zinco requerido por esta última progênie (Quadro 6, Capítulo 1) a coloca em posição inferior para as variáveis de eficiência de produção de biomassa e eficiência nutricional (Quadro 2).

Comparando-se os resultados discutidos acima com o agrupamento realizado no Capítulo 1 com base nas características de crescimento, observou-se que a progênie IAC 4376-5 (grupo III) embora apresente baixa exigência em Zn, e sofra restrição no crescimento com concentrações elevadas do elemento no meio externo, não apresentou alta eficiência nutricional com baixa ou alta disponibilidade do elemento, indicando que tolerância ao baixo suprimento pode não estar relacionada à alta eficiência de uso. Neste caso, a baixa exigência se deu à custa da baixa eficiência de produção de biomassa, que pode determinar um crescimento mais lento, muito embora a progênie tenha alta eficiência para absorver e transportar Zn quando a disponibilidade do elemento é limitada.

A progênie UFV 4066-5 (grupo II), que também se mostrou pouco exigente em Zn, apresenta alta eficiência nutricional quanto a esse elemento, ou seja, usa-o

eficientemente em ambas as condições com alto e baixo suprimento externo, sendo que essa eficiência se deve à alta eficiência em produzir biomassa por unidade de nutriente presente na parte aérea, especialmente sob baixo suprimento do nutriente.

A progênie UFV 4066-3 (grupo IV), exigente em Zn, respondeu à sua adição e teve alta eficiência nutricional quando o suprimento foi alto. Sua alta eficiência foi devida também à alta eficiência de produção de biomassa por unidade de nutriente alocado na parte aérea.

Os resultados obtidos demonstraram a variabilidade existente entre progênies e mesmo entre plantas da mesma progênie. Estes resultados apontam para a necessidade de estudos complementares, integrando a nutrição mineral de plantas e o melhoramento genético vegetal, uma vez que, de modo geral, novas cultivares de cafeeiros são selecionadas e recomendadas para plantio em escala comercial com base nas características de crescimento, resistência ou tolerância a doenças e produtividade comercial média. Neste sentido, avaliações mais precisas sobre o comportamento das cultivares em relação à eficiência nutricional deverão proporcionar incrementos de produtividade, favorecendo a competitividade requerida pela cafeicultura moderna.

4. CONCLUSÕES

1) O estado nutricional de zinco alterou a habilidade dos cafeeiros em absorver, transportar e utilizar o micronutriente, evidenciando a existência de variabilidade nas características de eficiência nutricional entre progênies e entre plantas da mesma progênie.

2) A progênie UFV 4066-5 (Tupi IAC 1669-33) foi classificada como pouco exigente e eficiente em baixo suprimento de zinco, a progênie UFV 4066-3 (Tupi IAC 1669-33) como exigente e eficiente em alto suprimento, a progênie IAC 4376-5 como pouco exigente e pouco eficiente e a Caturra Amarelo 2 como ineficiente nutricionalmente para zinco.

3) Para a progênie UFV 4066-5 (Tupi IAC 1669-33), a fração zinco ativo representa cerca de 20% do zinco total nas folhas apicais, enquanto para a progênie Caturra Amarelo 2, ineficiente nutricionalmente para zinco, este valor é de apenas 10%.

LITERATURA CITADA

AMARAL, J.F.T. **Eficiência de produção de raízes, absorção, translocação e utilização de nutrientes em cultivares de café arábica**. 2002. 97 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

AHMAD, Z., GILL, M. A.; QURESHI, R. H. Genotypic variations of phosphorus efficiency of crops. **J. Plant Nutr.**, v. 24, n. 8, p. 1149-1171, 2001.

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

BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K. Nutrient use efficiency in acid soils: nutrient management and plant use efficiency. In: MONIZ, A. C. et al. (Ed.) **Plant soil interactions at low pH**. Brazilian Soil Science Society, 1997. p.75-95.

BLAIR, G. Nutrient efficiency – what do really mean. In: RANDALL, P. J.; DELHAIZE, E.; RICHARDS, R. A.; MUNNS, R. (Ed.) **Genetic aspects of plant mineral nutrition**. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 205-213.

CAKMAK, I.; MARSCHNER, H. Mechanisms of phosphorus-induced zinc deficiency in cotton. III. Changes in physiological availability of zinc in plants. **Physiol. Plant**, v. 70, p. 13-20, 1987.

CAKMAK, I.; MARSCHNER, H. Increase in membrane permeability and exudation in roots of Zn deficient plants. **J. Plant Physiol.**, v. 132, p. 356-361, 1988.

CAKMAK, I.; GÜLÜT, K. Y.; MARSCHNER, H.; GRAHAM, R. D. Effect of zinc and iron deficiency on phytosiderophore release in wheat genotypes differing in zinc efficiency. **J. Plant Nutr.**, v. 17, p. 1-17, 1994.

CLARK, R. B. Characterization of phosphatase of intact morize roots. **J. Agric. Food Chem.**, v. 23, p. 458-460, 1975.

CRUZ, C. D. **Programa Genes**: aplicativo computacional em genética e estatística. Viçosa: Editora UFV, 1997. 442 p.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: Editora UFV, 1994. 390 p.

FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **J. Plant Nutr.**, v. 24, n. 8, p. 1269-1290, 2001.

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional da produção das culturas. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 6-16, 1998.

FONTES, R. L. F. **Purificação de soluções nutritivas para indução de deficiência de zinco e cobre em plantas**. 1986. 55 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

FOY, C. D.; CHANEY, R. L.; WHITE, M. C. The physiology of metal toxicity in plants. **Ann. Rev. Plant Physiol.**, v. 29, p. 511-566, 1978.

GENC, Y., McDONALD, G. K.; GRAHAM, R. D. Critical deficiency concentration of zinc in barley genotypes differing in zinc efficiency and its relation to growth responses. **J. Plant Nutr.**, v. 25, n. 3, p. 545-560, 2002.

GERLOFF, G. C.; GABELMAN, W. H. Genetic basis of inorganic plant nutrition. In: LAUCHLI, A.; BIELESKI, R. L. (Ed.) **Inorganic plant nutrition**. New York: Springer-Verlag, 1983. p. 453-480.

GRUSAK, M. A.; PEARSON, J. N.; MARENTES, E. The physiology of micronutrient homeostasis in field crops. **Field Crops Research**, v. 60, p. 41-56, 1999.

KAYA, C., BURTON, M. A. S.; HIGGS, D. Responses of tomato cvs grown to fruit-harvest stage under zinc stress in glasshouse conditions. **J. Plant Nutr.**, v. 24, n. 2, p. 369-382, 2001

KAYA, C.; HIGGS, D. Inter-relationships between zinc nutrition, growth parameters and nutrient physiology in a hydroponically grown tomato cultivar. **J. Plant Nutr.**, v. 24, n. 10, p. 1491-1503, 2001.

KIM, T.; MILLS, H.A.; WETZSTEIN, H. Y. Studies on the effect of zinc supply on growth and nutrient uptake in pekan. **J. Plant Nutr.**, v. 25, n. 9, p. 1987-2000, 2002.

KOZLOWSKI, T. T.; PALLARDY, S. G. **Physiology of woody plants**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1997. 411 p.

LONERAGAN, J. F.; KIRK, G. J.; WEBB, M. J. Translocation and function of zinc in roots. **J. Plant Nutr.**, v. 10, n. 9-16, p. 1247-1254, 1987.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. New York: Academic Press, 1995. 889 p.

MARTINEZ, H. E. P. **O uso do cultivo hidropônico de plantas em pesquisa**. Viçosa: Editora UFV, 2002. 61 p. (Cadernos Didáticos, 1).

MARTINEZ, H. E. P.; NOVAIS, R. F.; SACRAMENTO, L. V. S.; RODRIGUES, L. A. Comportamento de variedades de soja cultivadas em diferentes níveis de fósforo: I. Cinética da absorção de fósforo e ajustes morfológicos da planta. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 17, p. 231-238, 1993a.

MISRA, A.; RAMANI, S. Inhibition of iron absorption by zinc induced Fe-deficiency in Japanese mint. **Physiol. Plant.**, v. 13, n. 1, p. 37-42, 1991.

PAIVA, H. N.; CARVALHO, J. G.; SIQUEIRA, J. O.; CORREA, J. B. D. Teor, conteúdo e índice de translocação de nutrientes em mudas de cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) submetidas a doses crescentes de zinco. **Ciência Florestal**, v. 13, n. 1, p. 1-10, 2003.

REIS JR., R. A.; MARTINEZ, H. E. P. Adição de Zn e absorção, translocação e utilização de Zn e P por cultivares de cafeeiro. **Scientia Agrícola**, v. 59, n. 3, p. 537-542, 2002.

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.**, v. 4, n. 3, p. 289-302, 1981.

SOUZA, C. A. S.; GUIMARAES, P. T. G.; FURTINI NETO, A. E.; NOGUEIRA, F. D. Efeitos de doses de zinco via solo em três cultivares de cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Ciênc. Agrotec.**, v. 25, n. 4, p. 890-899, 2001.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 2. ed. Sunderland: Sinauer Associates, Inc., Publishers, 1998. 792 p.

WELCH, M. R. Micronutrient nutrition of plants. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 14, n. 1, p. 49-82, 1995.

ZHANG, F.; ROMHELD, V.; MARSCHNER, H. Release of zinc mobilizing roots exudates in different plant species as affected by zinc nutritional status. **J. Plant Nutr.**, v. 14, n. 7, p. 675-686, 1991.

CAPÍTULO 3

CONCENTRAÇÃO DE MICRONUTRIENTES E CARACTERÍSTICAS BIOQUÍMICAS DE PROGÊNIES DE CAFEEIROS (*Coffea arabica* L.) EFICIENTES NO USO DE ZINCO

1. INTRODUÇÃO

Solos com baixa disponibilidade de zinco para o ótimo desenvolvimento das culturas ocorrem em diversas regiões agrícolas; entretanto, diferentes espécies e variedades da mesma espécie diferem quanto à tolerância a solos com restrição no fornecimento de zinco. Genótipos tolerantes à deficiência de zinco desenvolvem-se melhor que os genótipos sensíveis, mas os mecanismos fisiológicos responsáveis pela tolerância diferencial não são completamente entendidos até o presente (Rengel et al., 1998). Estes mecanismos podem envolver a maior capacidade de absorção, translocação ou utilização de zinco a nível celular, bem como estarem relacionados às características bioquímicas e fisiológicas dependentes de zinco. Deve-se considerar, no entanto, não apenas o efeito do zinco, mas as possíveis interações entre zinco e outros micronutrientes catiônicos capazes de afetarem o metabolismo vegetal.

A absorção de micronutrientes catiônicos em dicotiledôneas pode ser incrementada pelo descarregamento de fitosideróforos (aminoácidos não-protéicos análogos ao ácido mugínico), ou seja, compostos orgânicos capazes de quelatizar os micronutrientes e favorecer a absorção. Este processo ocorre em resposta ao estado nutricional, e aparentemente é regulado por um mecanismo hormonal via floema

(Grusak et al., 1999). Segundo Cakmak et al. (1994), o genótipo de trigo tolerante à deficiência de zinco (*Triticum aestivum* cv. Aroona) apresentou maior descarregamento de fitosideróforos que o genótipo sensível (*T. durum* cv. Durati), o qual evidenciou sintomas severos de deficiência de zinco, embora a concentração de zinco em ambos os genótipos não tenha diferido estatisticamente. Entretanto, Erenoglu et al. (1996) não encontraram correlação entre as taxas de descarregamento de fitosideróforos e a tolerância à deficiência de zinco por genótipos de trigo em solução nutritiva, sugerindo que a absorção, o transporte e a utilização interna de zinco são mecanismos mais importantes na expressão da tolerância à deficiência que o descarregamento de fitosideróforos.

A interação de zinco com outros nutrientes foi relatada por diversos autores (Foy et al., 1978; Misra & Ramani, 1991; Marschner, 1995; Fageria, 2001; Kaya & Higgs, 2001; Kaya et al., 2001), sendo que o excesso de zinco provoca inibição da fotossíntese pela diminuição da atividade da RuBP carboxilase/oxigenase (Rubsico), causada, provavelmente, pela competição de zinco com magnésio no sítio de ativação da Rubisco. A redução da atividade do fotossistema II (PS II) pode ser devida ao deslocamento de manganês pelo excesso de zinco, na membrana do tilacóide. Segundo estes mesmos autores, o excesso de zinco afeta a absorção e a translocação de ferro pela inibição competitiva entre os cátions, possivelmente pela semelhança de raio iônico entre eles.

Qadar (2002) agrupou genótipos de arroz (*Oryza sativa*) de acordo com a tolerância a deficiência de zinco e a porcentagem de sobrevivência das plântulas em solos sódicos pobres em zinco, verificando que a concentração foliar de zinco total não apresentou boa relação com o agrupamento dos genótipos. Segundo este mesmo autor, nas plantas que exibiram sintomas de deficiência de zinco, a concentração foliar de manganês foi maior que a de ferro, ocorrendo comportamento inverso na plantas que não apresentaram sintomas de deficiência. Resultado semelhante foi observado por Kaya & Higgs (2001), os quais constataram que a ausência de zinco em solução nutritiva foi responsável pelo incremento nos teores foliares de ferro em plantas de tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Plântulas de noqueira (*Carya illinoensis*) da variedade Stuart incrementaram os teores foliares de ferro, enquanto na variedade Curtis houve incremento no teor de manganês, em resposta à restrição no fornecimento de zinco em solução nutritiva (Kim et al., 2002).

A deficiência de zinco pode comprometer importantes eventos fisiológicos vegetais e, conseqüentemente o crescimento e o desenvolvimento da planta. Kaya & Higgs (2001) verificaram que plantas de tomateiro (*Lycopersicon esculentum* Mill.) deficientes em zinco apresentaram redução nos teores de clorofila, incremento na permeabilidade de membrana e redução na produção de matéria seca em relação às plantas-controle. Segundo Marschner (1995), sob deficiência de zinco a redução na atividade da enzima Cu/Zn superóxido dismutase (Cu/ZnSOD) favorece o incremento dos danos oxidativos, ocasionando a diminuição no teor de clorofila e na atividade fotossintética, sendo a intensidade dos danos proporcional a intensidade luminosa. De modo geral, os teores foliares de clorofila no cafeeiro podem variar de acordo com a cultivar, idade da folha amostrada e condições ambientais, especialmente luminosidade e umidade. Paiva & Guimarães (2001) observaram que a razão clorofila *b/a* foi 0,49 e 0,95 em mudas de cafeeiros cultivadas a pleno sol e 50% de sombreamento, respectivamente, concluindo que as mudas incrementaram os teores de clorofila *b* como forma de adaptação ao sombreamento. Mudas de cafeeiro cultivar Mundo Novo exibiram, em média, teores foliares de clorofila total de 0,55 g m⁻² (Pereira et al., 2001).

Alternativamente aos métodos tradicionais, uma medida indireta, rápida e precisa dos teores foliares de clorofila pode ser obtida com o emprego de aparelhos portáteis disponíveis atualmente, a exemplo do SPAD 502 Minolta Corp. Yamamoto et al. (2002) verificaram elevada correlação entre o índice SPAD e os teores foliares de clorofila em sorgo (*Sorghum bicolor* L.) e feijão-guandu (*Cajanus cajan* L.). No cafeeiro, alguns trabalhos foram realizados com o objetivo de verificar a relação entre os teores de clorofila, medidos indiretamente pelo índice SPAD, e o estado nutricional de nitrogênio. Furlani et al. (2000a,b) constataram variações entre 0,25 e 0,60 g m⁻² na concentração de clorofila em mudas dos cafeeiros das cultivares Mundo Novo e Catuaí submetidas a diferentes doses de nitrogênio. Deve-se destacar que os sintomas de deficiência de zinco são precedidos pela alteração das funções fisiológicas, como observado por Yu & Rengel (1999) em tremoço (*Lupinus angustifolius* L.), onde a carência de zinco reduziu drasticamente a atividade da Cu/ZnSOD e a concentração de proteínas solúveis, resultando em diminuição na matéria seca da parte aérea independentemente da manifestação de sintomas visuais de deficiência do micronutriente em questão.

O zinco é constituinte de diversas enzimas, entre elas a sintase do triptofano (Trp-sintase), a qual é responsável pela produção de triptofano a partir de compostos

indólicos e serina. O triptofano, por sua vez, é precursor do ácido indol acético (IAA), principal hormônio de crescimento vegetal (Malavolta, 1980). Segundo Marschner (1995), os baixos níveis de ácido indol acético (IAA) observados em plantas deficientes em zinco resultam da inibição da síntese ou aumento da degradação do IAA, porém, pode ocorrer incremento no teor de IAA sob deficiência de zinco devido a inibição da síntese de proteínas e, conseqüentemente, acúmulo de triptofano e outros aminoácidos.

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo caracterizar quatro progênies de cafeeiros divergentes na eficiência nutricional para zinco, na fase de muda, avaliando o efeito do suprimento de zinco nas concentrações dos micronutrientes zinco, ferro, cobre e manganês e nos teores de pigmentos e compostos indólicos nas folhas dos cafeeiros.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente experimento foi conduzido em casa de vegetação, em solução nutritiva estática, no período de novembro de 2002 a novembro de 2003. Utilizou-se a solução de Clark (1975) modificada, contendo a seguinte composição: N-NO_3^- 7,26 mmol L⁻¹; N-NH_4^+ 0,90 mmol L⁻¹; $\text{P-H}_2\text{PO}_4^-$ 0,069 mmol L⁻¹; K^+ 1,80 mmol L⁻¹; Ca^{++} 2,56 mmol L⁻¹; Mg^{++} 0,60 mmol L⁻¹; S-SO_4^- 0,60 mmol L⁻¹; B 19,0 μmol L⁻¹; Cu 0,50 μmol L⁻¹; Fe 40,0 μmol L⁻¹; Mn 7,0 μmol L⁻¹; e Mo 0,086 μmol L⁻¹. As soluções-estoque de macronutrientes foram submetidas à técnica de purificação para remoção de zinco, com o reagente pirrolidina ditiocarbamato de amônio (APDC), e entre os micronutrientes apenas o cloreto férrico foi purificado, utilizando-se resina de troca catiônica Dowex 1 X-8 (Fontes, 1986).

As progênies de *Coffea arabica* L. avaliadas neste trabalho são identificadas como UFV 4066-5 (pouco exigente e eficiente em baixo suprimento de zinco), UFV 4066-3 (exigente e eficiente em alto suprimento de zinco), Caturra Vermelho 4 (intermediária quanto à exigência e eficiência nutricional para zinco) e IAC 4376-5 (Tupi) (pouco exigente e pouco eficiente nutricionalmente para zinco), e fazem parte do programa de melhoramento do cafeeiro da UFV-EPAMIG, tendo sido escolhidas para serem comparadas quanto às concentrações de Fe, Cu, Zn, Mn, teores de pigmentos e compostos indólicos. As sementes dessas quatro progênies foram germinadas em areia lavada, irrigadas com solução nutritiva de Clark (1975) modificada a ¼ de força sem zinco e transplantadas no estádio de folhas cotiledonares para bandejas contendo a

mesma solução, sem zinco, onde permaneceram durante 15 dias para adaptação. Após este período, as mudas foram transferidas para as bandejas definitivas, as quais receberam solução modificada para obtenção das concentrações de 0,0 e 3,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco. O experimento constituiu-se de um fatorial 4 x 2 (quatro progênies e duas concentrações de zinco), no delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições e parcelas constituídas de uma planta por progênie.

A solução foi mantida sob aeração constante com borbulhamento de ar comprimido, o pH ajustado semanalmente a $5,0 \pm 0,5$ com HCl a 0,1 mol L^{-1} ou NaOH a 0,1 mol L^{-1} e a troca ou reposição da solução nutritiva realizada mediante a medição da condutividade elétrica (CE), adotando-se como critério de troca ou reposição 30% de depleção do valor inicial da CE. Foram necessárias quatro trocas e quatro reposições de solução durante o experimento, sendo que na quarta troca, a concentração de zinco nos tratamentos que receberam o elemento foi aumentada para 6,0 $\mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, devido à constatação de engrossamento de raízes e necrose de meristemas apicais radiculares em algumas progênies, pressupondo a ocorrência de deficiência de zinco. Aos dez meses do transplântio, foram coletados quatro discos da região central do limbo foliar com 15 mm de diâmetro cada (aproximadamente 0,0755 g de matéria fresca cada), do segundo par de folhas em ramos plagiotrópicos das mudas dos cafeeiros, para as análises de teores de pigmentos e compostos indólicos. Os discos foliares foram acondicionados em papel alumínio, devidamente identificados, congelados em nitrogênio líquido imediatamente após a coleta, e armazenados em freezer a -80°C até o momento da análise. A medida indireta do teor de clorofila (índice SPAD) no segundo par de folhas foi determinada com o clorofilômetro portátil SPAD-502 {*Soil-Plant Analysis Development (SPAD) Section Minolta Camera CO. ETD, Japan*}.

O teor de compostos indólicos foi determinado pela reação com ninidrina, segundo Sacramento (1998). Inicialmente, foi preparado o extrato alcoólico, onde cada amostra, composta por um disco foliar, foi colocada em tubos de centrífuga e adicionados 9 ml de etanol a 80%. Os tubos foram fechados com papel alumínio e levados ao aquecimento em banho a 85°C , por 15 minutos; em seguida, submetidos à centrifugação a 3.250 g, durante 5 minutos, recolhendo-se o sobrenadante em balão volumétrico e completando-se o volume para 10 ml. A solução reagente foi preparada a partir de 200 mg de ninidrina + 15 ml de etilenoglicol monoetil éter, adicionou-se 5 ml de solução-tampão de acetato de sódio pH 4,5 (Morita e Assumpção, 1988) e 0,5 ml de KCN a 0,01M. Esta solução deve ser preparada 5 minutos antes da reação com o extrato

alcoólico. Em seguida, tomou-se uma alíquota de 0,5 ml do extrato alcoólico em tubos de ensaio e 0,5 ml de solução reagente e, com os tubos cobertos por papel alumínio, levou-se ao aquecimento em banho a 85° C, durante 5 minutos. Em seguida, os tubos foram submetidos a banho frio e adicionou-se 6 ml de etanol 95%. Utilizaram-se as seguintes concentrações para a curva-padrão, preparada a partir do padrão de triptofano: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 e 80 mg L⁻¹, realizando-se as leituras em espectrofotômetro UV-VIS a 390 nm.

Para a determinação dos teores de pigmentos, dois discos foliares foram macerados em almofariz com adição de 0,200 g de CaCO₃, uma pitada de areia e 5 ml de acetona a 80%. O macerado foi filtrado em papel de filtragem rápida e recolhido em tubos de ensaio graduados, envolvidos externamente com papel alumínio, completando-se o volume para 25 ml. Retirou-se uma alíquota em cubetas de quartzo para leitura em espectrofotômetro UV-VIS nos comprimentos de onda de 470, 446,8 e 663,2 nm. O extrato não deve ser exposto à luz durante as leituras, pois a clorofila pode ser degradada sob luz branca. As concentrações de clorofilas e de carotenóides (em mg L⁻¹) foram calculadas por meio das seguintes fórmulas (Lichthenthaler, 1987):

$$\text{Clorofila } a = C_a = 12,25 A_{663,2} - 2,79 A_{646,8}$$

$$\text{Clorofila } b = C_b = 21,50 A_{646,8} - 5,10 A_{663,2}$$

$$\text{Clorofilas totais} = C_{(a+b)} = 7,15 A_{663,2} + 18,71 A_{646,8}$$

$$\text{Carotenóides}_{(\text{xantofilas} + \text{carotenos})} = X + C = (1000 A_{470} - 1,82 C_a - 85,02 C_b)/198$$

Ao final do período experimental, as plantas foram coletadas, lavadas em água desionizada e separadas em raízes, caule (ramo ortotrópico e ramos plagiotrópicos), folhas apicais (brotações, primeiro e segundo pares de folhas), folhas inferiores (seis pares de folhas inferiores, exceto as cotiledonares) e folhas recém-maduras (folhas completamente expandidas). As partes foram submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar a 70° C, por 72 horas, obtendo-se a matéria seca de folhas – MSF (somatório da matéria seca de folhas apicais, inferiores e remanescentes), matéria seca da parte aérea – MSPA (somatório da matéria seca de folhas e ramos), matéria seca de raízes – MSR, e matéria seca total – MST (somatório da MSPA e MSR). Depois de seco, o material foi moído em moinho tipo Wiley com peneira de 20 mesh, tomando-se 500 mg para mineralização nítrico-perclórica. A concentração total de zinco, ferro, cobre e manganês em todas as partes das plantas (raízes, ramos, folhas apicais, folhas

inferiores e folhas recém-maduras), foi determinada por espectrofotometria de absorção atômica no extrato da digestão nítrico-perclórica.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste F, a 5% de probabilidade, fazendo-se o desdobramento das interações, independentemente da significância, e as respectivas médias comparadas pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As progênies dos cafeeiros não diferiram entre si para a concentração de zinco na folha recém-madura e na raiz quando foi omitido zinco na solução nutritiva. Nesta mesma condição, não foi constatado efeito significativo entre progênies para a concentração de ferro na folha inferior, de cobre na folha apical e de manganês no caule (Quadro 1). Na dose $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, as progênies dos cafeeiros diferiram quanto à concentração de zinco em todas as partes analisadas; entretanto, para os demais micronutrientes diferiram apenas quanto ao teor de ferro na raiz, de cobre na folha inferior, no caule e na raiz e de manganês na folha inferior e na raiz (Quadro 1). Entre os micronutrientes, o ferro apresentou a maior concentração, com média de $309,00 \text{ mg kg}^{-1}$ na folha inferior das plantas que não receberam zinco em solução, enquanto o menor teor foi verificado para o cobre, com média de $1,57 \text{ mg kg}^{-1}$ na folha recém-madura, na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco.

Considerando-se os valores de faixas críticas estabelecidos por Martinez et al. (2003) e Malavolta et al. (1997) para os teores dos micronutrientes nas folhas maduras do cafeeiro, observa-se que na folha recém-madura ou completamente expandida, as progênies apresentaram teores médios abaixo dos níveis críticos para zinco de $6,85 \text{ mg kg}^{-1}$ na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ e cobre de $1,65$ e $1,57 \text{ mg kg}^{-1}$ nas doses $0,0$ e $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$, respectivamente, o que não foi observado para os micronutrientes ferro e manganês. No caso do zinco, apesar de todos os cuidados necessários objetivando assegurar a omissão desse elemento em solução, a ocorrência de contaminação externa possivelmente foi responsável pela concentração foliar determinada neste experimento.

Quadro 1 – Médias da concentração de zinco, ferro, cobre e manganês em diferentes partes da planta de quatro progênes de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco em solução nutritiva

| Progênes | Zinco (mg kg ⁻¹)* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------|------|-------|-----|-------|------|--------|-----|--------|------|
| | Folha apical | | Folha inferior | | Folha completa/expandida | | Caulo | | Raiz | | | | | | | | | | | |
| | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | | | | | | | | | | |
| UFV 4066-5 | 10,30 | a B | 5,86 | b B | 12,36 | a B | 8,43 | b B | 10,51 | a B | 6,58 | b A | 26,78 | a B | 3,76 | b B | 69,15 | a C | 9,40 | b A |
| UFV 4066-3 | 9,38 | a B | 6,94 | b B | 17,88 | a A | 11,31 | b A | 11,43 | a A | 6,95 | b A | 22,46 | a C | 7,28 | b A | 161,18 | a A | 8,35 | b A |
| Caturra Ver.4 | 14,26 | a A | 9,34 | b A | 9,86 | a C | 6,89 | b C | 11,50 | a A | 7,15 | b A | 25,49 | a B | 7,30 | b A | 90,39 | a B | 7,44 | b A |
| IAC 4376-5 | 13,75 | a A | 9,15 | b A | 12,78 | a B | 8,04 | b BC | 10,60 | a B | 6,71 | b A | 56,54 | a A | 6,98 | b A | 45,63 | a D | 8,84 | b A |
| CV (%) | 7,37 | | 8,15 | | 5,85 | | 6,86 | | 4,56 | | | | | | | | | | | |
| Progênes | Ferro (mg kg ⁻¹)* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Folha apical | | Folha inferior | | Folha completa/expandida | | Caulo | | Raiz | | | | | | | | | | | |
| | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | | | | | | | | | | |
| UFV 4066-5 | 111,58 | a A | 73,39 | a B | 241,66 | a A | 259,61 | a A | 106,79 | a A | 111,36 | a C | 55,36 | a A | 47,04 | a B | 202,94 | a B | 217,29 | a AB |
| UFV 4066-3 | 80,13 | a A | 97,95 | a AB | 307,90 | a A | 344,00 | a A | 115,94 | a A | 128,89 | a BC | 44,85 | a A | 47,98 | a B | 307,24 | a A | 261,80 | a A |
| Caturra Ver. 4 | 75,46 | b A | 129,15 | a A | 236,14 | b A | 340,24 | a A | 103,83 | b A | 168,95 | a A | 42,39 | a A | 59,51 | a AB | 204,61 | a B | 123,74 | b C |
| IAC 4376-5 | 79,48 | b A | 119,93 | a A | 300,43 | a A | 292,15 | a A | 94,95 | b A | 143,41 | a AB | 47,20 | b A | 75,73 | a A | 247,59 | a B | 161,80 | b BC |
| CV (%) | 28,58 | | 19,00 | | 15,23 | | 30,34 | | 17,45 | | | | | | | | | | | |
| Progênes | Cobre (mg kg ⁻¹)* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Folha apical | | Folha inferior | | Folha completa/expandida | | Caulo | | Raiz | | | | | | | | | | | |
| | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | | | | | | | | | | |
| UFV 4066-5 | 4,39 | a A | 2,76 | b A | 3,93 | a A | 2,45 | b AB | 1,38 | a A | 0,75 | a C | 5,08 | a A | 3,30 | b C | 17,55 | a B | 21,23 | a AB |
| UFV 4066-3 | 4,59 | a A | 3,70 | a A | 3,61 | a A | 3,26 | a A | 1,49 | a A | 1,31 | a BC | 4,64 | a A | 4,51 | a B | 32,70 | a A | 23,38 | b A |
| Caturra Ver. 4 | 3,44 | a A | 3,53 | a A | 1,48 | a B | 1,69 | a B | 1,56 | b A | 2,45 | a A | 3,66 | a B | 3,79 | a BC | 19,16 | a B | 16,63 | a B |
| IAC 4376-5 | 3,35 | a A | 3,78 | a A | 1,86 | a B | 1,81 | a B | 2,19 | a A | 1,78 | a AB | 5,05 | b A | 6,05 | a A | 20,24 | a B | 19,75 | a AB |
| CV (%) | 23,85 | | 23,02 | | 34,31 | | 12,37 | | 14,40 | | | | | | | | | | | |
| Progênes | Manganês (mg kg ⁻¹)* | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Folha apical | | Folha inferior | | Folha completa/expandida | | Caulo | | Raiz | | | | | | | | | | | |
| | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | 6,0 µmol L ⁻¹ | 0,0 µmol L ⁻¹ | | | | | | | | | | |
| UFV 4066-5 | 96,25 | a A | 86,78 | a AB | 276,26 | a A | 257,31 | a A | 132,63 | a A | 88,54 | b B | 34,24 | a A | 30,99 | a A | 77,54 | a B | 106,95 | a A |
| UFV 4066-3 | 62,91 | a A | 70,05 | a B | 273,71 | a A | 290,80 | a A | 114,45 | a A | 98,94 | a B | 42,98 | a A | 39,38 | a A | 60,49 | a B | 58,48 | a AB |
| Caturra Ver. 4 | 86,96 | b A | 120,81 | a A | 247,61 | a AB | 272,74 | a A | 130,23 | a A | 145,60 | a A | 31,53 | a A | 39,63 | a A | 68,64 | a B | 44,43 | a B |
| IAC 4376-5 | 62,63 | a A | 89,93 | a AB | 211,39 | a B | 187,43 | a B | 114,00 | a A | 101,36 | a AB | 35,45 | a A | 45,30 | a A | 193,60 | a A | 85,96 | b AB |
| CV (%) | 26,13 | | 12,72 | | 24,62 | | 26,92 | | 36,77 | | | | | | | | | | | |

* Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na horizontal ou maiúsculas na vertical não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

O teor de zinco foi reduzido em todas as partes da planta sob restrição no fornecimento do nutriente, constatando-se as maiores médias de concentração de zinco na raiz na dose $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ e as menores médias para o teor de zinco na folha inferior, na solução sem zinco. Na concentração $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco em solução, houve redução no teor de ferro na folha apical e na folha recém-madura das progênies Caturra Vermelho 4 e IAC 4376-5 (Tupi), de cobre na folha recém-madura da progênie Caturra Vermelho 4 e no caule da progênie IAC 4376-5 (Tupi), e de manganês na folha apical da progênie Caturra Vermelho 4, não sendo verificadas reduções nos teores destes micronutrientes nas progênies UFV 4066-5 e UFV 4066-3 (Quadro 1). Estes resultados se devem às interações que ocorrem entre os micronutrientes catiônicos, sendo que a redução nos teores de um ou mais micronutrientes em detrimento da absorção em excesso de outro foi constatada em diversas culturas (Marschner, 1995; Yu & Rengel, 1999; Fageria, 2001; Kim et al., 2002; Qadar, 2002).

A absorção de micronutrientes catiônicos por dicotiledôneas e monocotiledôneas, exceto as gramíneas (estratégia I), envolve a atuação de redutases responsáveis pela redução de Fe (III) a Fe (II), H^+ -ATPases que atuam na acidificação da rizosfera e, complementando o processo, canais protéicos específicos no transporte dos íons através da membrana plasmática. Estes canais, embora apresentem certa especificidade, parecem atuar na absorção de micronutrientes catiônicos em geral e, deste modo, o desbalanço no fornecimento de micronutrientes pode acarretar a absorção em excesso do elemento presente em maior quantidade em detrimento da absorção dos demais (Welch, 1995; Grusak et al., 1999). Segundo Marschner (1995), este fato é ainda mais evidente no caso de zinco e ferro, que apresentam raio iônico semelhante. Misra & Ramani (1991) verificaram redução crescente na absorção e no transporte de ferro em plantas de *Mentha arvensis* L., cultivadas em concentrações variando de 0,0 a 0,80 mM de ZnCl_2 em solução nutritiva, sugerindo que este comportamento se deve à semelhança entre os raios iônicos de zinco e ferro e ao possível efeito regulatório do zinco sobre a absorção de ferro. Embora neste experimento as mudas dos cafeeiros não tenham evidenciado sintomas visuais de toxidez de zinco, é provável que a dose $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco tenha contribuído para a redução no teor foliar de ferro na folha apical e na folha recém-madura das progênies Caturra Vermelho 4 e IAC 4376-5 (Tupi).

Na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco em solução, a progênie UFV 4066-5 apresentou baixa concentração de zinco na folha apical, na folha recém-madura e no caule, a menor concentração de ferro na folha apical ($73,39 \text{ mg kg}^{-1}$) e na folha recém-madura

(111,36 mg kg⁻¹) e também o menor teor de cobre e de manganês na folha recém-madura (0,75 e 88,74 mg kg⁻¹, respectivamente). Entretanto, a UFV 4066-5 apresentou altos teores de zinco, ferro, cobre e manganês na raiz. Por sua vez, a progênie Caturra Vermelho 4 apresentou os maiores teores de zinco, ferro e manganês na folha apical (9,34, 129,15 e 120,81 mg kg⁻¹, respectivamente) e na folha recém-madura (7,15, 168,95 e 145,60 mg kg⁻¹, respectivamente), e cobre na folha recém-madura (2,45 mg kg⁻¹), e baixos teores de zinco, ferro, cobre e manganês na raiz (Quadro 1).

A progênie Caturra Vermelho 4 manteve a concentração de zinco em patamares mais elevados na folha apical e recém-madura quando se omitiu o elemento na solução nutritiva. Percebe-se ainda que a progênie Caturra Vermelho 4 apresentou aumento na concentração de ferro, principalmente nas folhas apicais e recém-maduras, acompanhadas por reduções nos teores de ferro na raiz, enquanto a UFV 4066-5, pouco exigente e eficiente em baixo suprimento de zinco, não alterou a concentração de ferro sob omissão de zinco. A concentração de cobre foi incrementada em folhas recém-maduras na progênie Caturra Vermelho 4, e reduzida em folhas apicais e inferiores na progênie UFV 4066-5 na dose 0,0 µmol L⁻¹. Percebe-se que a omissão de zinco resultou em concentrações limitantes de cobre, sendo essa limitação menos evidente na progênie Caturra Vermelho 4. A concentração de manganês foi incrementada nas folhas apicais da progênie Caturra Vermelho 4 e reduzida nas folhas recém-maduras da progênie UFV 4066-5 sob omissão de zinco, destacando-se que apenas a progênie Caturra Vermelho 4 apresentou teores de manganês na folha recém-madura dentro da faixa crítica estabelecida por Martinez et al. (2003) para o cafeeiro na região de Viçosa, MG. Quando o zinco foi fornecido em solução na concentração 6,0 µmol L⁻¹ não foram constatadas diferenças tão expressivas entre as progênies.

Neste sentido, pressupõe-se que a eficiência nutricional para zinco não esteja relacionada, necessariamente, à manutenção de zinco, ferro, cobre e manganês em concentrações mais elevadas nas folhas dos cafeeiros, mas a diversos fatores fisiológicos responsáveis pela melhor utilização de zinco e dos outros micronutrientes catiônicos. Nos Capítulos 1 e 2, a progênie UFV 4066-5 demonstrou baixa produção de matéria seca de raízes, resultando em baixa eficiência de absorção, porém, baixo conteúdo de zinco total, aliado à elevada produção de biomassa da parte aérea e alta eficiência de produção de biomassa (dag² de matéria seca da parte aérea produzida por mg de zinco contido na parte aérea) e, conseqüentemente, elevada eficiência nutricional. Estes resultados podem indicar que a elevada eficiência nutricional para zinco

observada para a progênie UFV 4066-5 se estenda aos demais micronutrientes catiônicos.

O fornecimento de zinco na dose $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ não reduziu o teor radicular de ferro, de cobre e de manganês em nenhuma das progênies avaliadas, indicando que a redução no teor foliar destes micronutrientes pode ser resultante da complexação na raiz ou, mais provavelmente, da inibição no transporte para a parte aérea. Observa-se que na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco houve redução no teor radicular de ferro nas progênies Caturra Vermelho 4 e IAC 4376-5 (Tupi), de cobre na progênie UFV 4066-5 e de manganês na progênie IAC 4376-5 (Tupi), sugerindo que o zinco desempenha alguma função regulatória na absorção radicular de ferro, cobre e manganês.

Nos Quadros 2 a 4 encontram-se os resultados das análises foliares de pigmentos, índice SPAD e compostos indólicos. A progênie UFV 4066-5 (pouco exigente e eficiente em baixo suprimento de zinco) apresentou as menores médias para os teores de clorofila *a* (*Ca*), clorofila *b* (*Cb*), clorofila total (*Ca+b*) e xantofilas + carotenos (*X+C*), apesar de diferir da progênie IAC 4376-5 (Tupi) apenas na variável *Ca*. Nota-se para a progênie Caturra Vermelho 4 os maiores teores médios de *Ca*, *Cb*, *Ca+b* e *X+C* na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco. Os teores de pigmentos (*Ca*, *Cb*, *Ca+b* e *X+C*) foram reduzidos percentualmente sob restrição no fornecimento de zinco nas progênies UFV 4066-5 (pouco exigente e eficiente em baixo suprimento de zinco), UFV 4066-3 e IAC 4376-5 (Tupi), sem diferença estatística entre elas, e incrementados significativamente na Caturra Vermelho 4.

Pestana et al. (2001) verificaram que mudas de laranjeira (*Citrus sinensis* L. cv. Newhall) cultivadas em solução nutritiva apresentaram redução nos teores de clorofila e na atividade fotossintética nas doses $0,0$ e $5,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de ferro, porém, os teores foliares de ferro, em média $177,00 \text{ mg kg}^{-1}$, não diferiram significativamente entre os tratamentos $0,0$ a $20,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de ferro, sugerindo a ocorrência de inativação fisiológica do elemento. Segundo Fageria (2001) e Foy et al. (1978), zinco e manganês interferem na utilização de ferro para a síntese de clorofila. Marschner (1995) afirma que a redução no teor de clorofila pode ocorrer pelo incremento nos danos oxidativos, os quais se devem à redução na atividade da Cu/ZnSOD sob deficiência de zinco. A redução da fotossíntese pode também ser devida ao excesso de zinco, levando à diminuição da atividade da RuBP carboxilase/oxigenase (Rubisco) pela competição entre zinco e magnésio no sítio ativo da Rubisco, onde o magnésio é essencial como

Quadro 2 – Médias das concentrações (mg L^{-1}) de clorofila a (*Ca*), de clorofila b (*Cb*) e clorofila total (*Ca+b*) de quatro progênes de cafeeiro em resposta a duas concentrações de zinco em solução nutritiva

| Progênes | <i>Ca</i> | | | <i>Cb</i> | | | <i>C(a+b)</i> | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------------------------|---|----|----------------------------|---|---|----------------------------|---|----|----------------------------|---|---|-------|---|----|--------|---|---|
| | $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ | | | $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ | | | $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ | | | $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ | | | | | | | | |
| UFV 4066-5 | 4,831 | a | C | 3,942 | b | D | 2,490 | a | C | 2,219 | a | C | 7,321 | a | C | 6,161 | b | C |
| UFV 4066-3 | 6,108 | a | A | 5,307 | b | B | 3,017 | a | A | 2,732 | b | B | 9,124 | a | A | 8,039 | b | B |
| Caturra Vermelho 4 | 5,477 | b | B | 7,259 | a | A | 2,855 | b | AB | 3,664 | a | A | 8,332 | b | AB | 10,923 | a | A |
| IAC 4376-5 | 5,572 | a | AB | 4,676 | b | C | 2,568 | a | BC | 2,262 | b | C | 8,140 | a | BC | 6,938 | b | C |
| Média | 5,497 | | | 5,296 | | | 2,733 | | | 2,719 | | | 8,230 | | | 8,015 | | |
| CV (%) | 5,66 | | | 5,81 | | | 5,81 | | | 5,45 | | | | | | | | |

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na horizontal ou maiúsculas na vertical não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

Quadro 3 – Médias da concentração (mg L^{-1}) de xantofilas+carotenóides (*X+C*), índice SPAD e concentração (g kg^{-1} de matéria fresca) de compostos indólicos (*INDOL*) de quatro progênes de cafeeiro em resposta a duas concentrações de Zinco em solução nutritiva

| Progênes | <i>X+C</i> | | | SPAD | | | INDOL | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------------------------|---|---|----------------------------|---|---|----------------------------|---|---|----------------------------|---|---|--------|---|---|--------|---|---|
| | $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ | | | $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ | | | $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ | | | $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ | | | | | | | | |
| UFV 4066-5 | 0,807 | a | C | 0,611 | b | C | 58,63 | a | A | 61,00 | a | A | 169,00 | a | A | 113,22 | b | B |
| UFV 4066-3 | 1,280 | a | A | 0,906 | b | B | 60,63 | a | A | 62,43 | a | A | 74,41 | b | C | 99,66 | a | B |
| Caturra Vermelho 4 | 1,066 | b | B | 1,396 | a | A | 57,60 | b | A | 63,57 | a | A | 111,38 | b | B | 156,68 | a | A |
| IAC 4376-5 | 0,828 | a | C | 0,663 | b | C | 50,43 | a | B | 49,83 | a | B | 57,96 | a | C | 66,75 | a | C |
| Média | 0,995 | | | 0,894 | | | 56,82 | | | 59,21 | | | 103,19 | | | 109,08 | | |
| CV (%) | 8,76 | | | 8,76 | | | 2,87 | | | 12,97 | | | | | | | | |

Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas na horizontal ou maiúsculas na vertical não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

Quadro 4 – Médias dos percentuais de redução (valores positivos) ou incremento (valores negativos) das características bioquímicas de quatro progênes de cafeeiro em resposta à restrição no fornecimento de zinco em solução nutritiva

| Progênes | % de redução ou incremento | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------------------------|---|--------|---|--------|---|--------|---|--------|---|-------|--------|-----|
| | Ca | | Cb | | C(a+b) | | X+C | | SPAD | | INDOL | | |
| UFV 4066-5 | 18,47 | a | 10,96 | a | 15,92 | a | 23,82 | a | -4,03 | a | b | 31,95 | a |
| UFV 4066-3 | 12,86 | a | 9,30 | a | 11,69 | a | 29,33 | a | -3,02 | a | b | -33,99 | b c |
| Caturra Vermelho 4 | -32,62 | b | -28,56 | b | -31,24 | b | -32,18 | b | -10,47 | b | b | -41,00 | c |
| IAC 4376-5 | 16,00 | a | 11,83 | a | 14,68 | a | 19,61 | a | 1,21 | a | a | -15,12 | b |
| CV (%) | | | | | | | | | | | | | |

Médias seguidas pela mesma letra na vertical não diferem entre si pelo teste de Duncan, a 5% de probabilidade.

ativador enzimático. O excesso de zinco pode ainda deslocar manganês na membrana do tilacóide e afetar a atividade do fotossistema II (PS II) (Marschner, 1995).

Para a progênie Caturra Vermelho 4, provavelmente os incrementos percentuais nos teores de clorofilas e xantofilas + carotenos estão associados aos maiores teores de zinco, ferro, cobre e manganês determinados nas folhas apicais e recém-maduras dessa progênie na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco. Nesta mesma condição, embora a progênie Caturra Vermelho 4 apresente teores dos micronutrientes cobre, ferro e manganês, e teores de pigmentos superiores aos teores observados para a progênie UFV 4066-5 (Quadros 1 e 2), ainda assim a última progênie destacou-se com maior eficiência de produção de produção de biomassa e eficiência nutricional (Capítulo 1).

O índice SPAD não diferiu entre as progênes UFV 4066-5, UFV 4066-3 e Caturra Vermelho 4, apresentando diferença estatística apenas entre estas progênes e a progênie IAC 4376-5 (Tupi), sugerindo baixa sensibilidade às diferenças nos teores de clorofila, determinados analiticamente nessas progênes dos cafeeiros. Este resultado não era esperado, uma vez que vários trabalhos de pesquisa encontraram elevada correlação entre os teores de clorofila e as leituras indiretas de clorofila realizadas com o medidor portátil SPAD em diversas culturas, como sorgo (*Sorghum bicolor* L.) e feijão-guandu (*Cajanus cajan* L.) (Yamamoto et al., 2002). No cafeeiro (Furlani et al., 2000a,b) e no tomateiro (Sandoval-Villa et al., 2002) o índice SPAD apresentou correlação positiva com doses de nitrogênio.

Deve-se considerar, entretanto, que o medidor portátil SPAD foi desenvolvido com o objetivo de determinar indiretamente o teor de clorofila, o qual apresenta elevada correlação com a atividade fotossintética e o estado nutricional de nitrogênio em diversas culturas avaliadas (Fontes, 2001). A deficiência de nitrogênio nas plantas é amplamente reconhecida pela clorose uniforme de folhas maduras, uma vez que o nitrogênio participa diretamente na constituição das moléculas de clorofila (Marschner, 1995; Kozłowski & Pallardy, 1997; Taiz & Zeiger, 1998). A deficiência de zinco pode causar clorose em folhas de cafeeiro; no entanto, este sintoma ocorre preferencialmente em folhas jovens e de maneira desuniforme (clorose entre as nervuras) (Malavolta et al., 1997), o que explica, em parte, o comportamento diferenciado nas leituras SPAD e nos teores de clorofila para as progênies estudadas.

Na solução em que se omitiu zinco, a progênie Caturra Vermelho 4 apresentou a maior média para concentração de compostos indólicos (INDOL) e, na dose $6,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco, a maior média de INDOL foi verificada para a progênie UFV 4066-5 (Quadro 3). No Quadro 4 observa-se que, em resposta à restrição no fornecimento de zinco, apenas a progênie UFV 4066-5 apresentou redução percentual no teor de INDOL, enquanto as demais progênies incrementaram esta característica, com destaque para a Caturra Vermelho 4, exibindo o maior incremento percentual.

Segundo Bartel et al. (2001), as plantas sintetizam ácido indol-3-acético (IAA), conhecido como hormônio do crescimento, a partir de compostos indólicos e triptofano (Trp). Os compostos indólicos são precursores do Trp, que é um dos principais responsáveis pela síntese de IAA nas plantas, embora existam rotas alternativas independentes de Trp para síntese do IAA. De acordo com Malavolta (1980), na rota biossintética dependente de Trp encontra-se uma enzima de importância crucial, a Trp-sintase, que possui zinco em sua constituição e catalisa a síntese de Trp utilizando como precursores compostos indólicos e serina.

Marschner (1995) afirma que tanto a deficiência quanto o excesso de zinco podem resultar em redução nos teores de IAA na planta, porém, atualmente este processo ainda não está totalmente esclarecido. Pressupõe-se que na progênie Caturra Vermelho 4, sob restrição no fornecimento de zinco, os maiores teores de zinco, ferro, cobre e manganês na folha apical e recém-madura, e a maior concentração de clorofila, estejam relacionados ao metabolismo mais intenso, conduzindo a elevada síntese de compostos indólicos oriundos de esqueletos carbônicos gerados pela maior atividade fotossintética. Na progênie UFV 4066-5, é possível que na dose $0,0 \mu\text{mol L}^{-1}$ de zinco,

os baixos teores de zinco, ferro, cobre e manganês observados nas folhas apical e recém-madura, sob restrição no fornecimento de zinco em solução, associados às menores concentrações de clorofila, sejam responsáveis pela redução na síntese de proteínas e, conseqüentemente, pelo acúmulo de Trp que seria empregado na síntese de IAA, conduzindo ao consumo de compostos indólicos, o que foi constatado pela maior redução percentual de INDOL por esta progênie.

4. CONCLUSÕES

1. O fornecimento de zinco incrementou as concentrações deste elemento em todas as partes analisadas das mudas dos cafeeiros e afetou a absorção ferro, cobre e manganês, evidenciando a existência de variabilidade na absorção destes micronutrientes entre progênies dos cafeeiros.

2. A progênie Caturra Vermelho 4 (intermediária quanto à exigência e eficiência nutricional para zinco) apresentou elevados teores de micronutrientes, pigmentos e compostos indólicos nas folhas, sob restrição no fornecimento de zinco.

3. A progênie UFV 4066-5 (pouco exigente e eficiente em baixo suprimento) apresentou baixos valores de pigmentos e o maior percentual de redução de compostos indólicos sob restrição no fornecimento de zinco.

4. A eficiência nutricional para zinco não está relacionada à manutenção de concentrações elevadas de micronutrientes, pigmentos e compostos indólicos nas folhas de mudas de cafeeiros.

LITERATURA CITADA

BARTEL, B.; LeCLERE, S.; MAGIDIN, M.; ZOLMAN, B. Inputs to the active indole-3-acetic acid pool: de novo synthesis, conjugate hydrolysis, and indole-3-butyric acid β -oxidation. **J. Plant Growth Regulation**, v. 20, p. 198-216, 2001.

CAKMAK, I.; GÜLÜT, K. Y.; MARSCHNER, H.; GRAHAM, R. D. Effect of zinc and iron deficiency on phytosiderophore release in wheat genotypes differing in zinc efficiency. **J. Plant Nutr.**, v. 17, n. 1, p. 1-17, 1994.

CLARK, R. B. Characterization of phosphatase of intact morize roots. **J. Agric. Food Chem.**, v. 23, p. 458-460, 1975.

CRUZ, C. D. **Programa Genes**: aplicativo computacional em genética e estatística. Viçosa: Editora UFV, 1997. 442 p.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa: Editora UFV, 1994. 390 p.

ERENOGLU, B.; CAKMAK, I.; MARSCHNER, H.; ROMHELD, V.; EKER, S.; DAGHAN, H.; KALAYCI, M.; EKIZ, H. Phytosiderophore release does not relate well with zinc efficiency in different bread wheat genotypes. **J. Plant Nutr.**, v. 19, n. 12, p. 1569-1580, 1996.

FAGERIA, V. D. Nutrient interactions in crop plants. **J. Plant Nutr.**, v. 24, n. 8, p. 1269-1290, 2001.

FONTES, P. C. R. **Diagnóstico do estado nutricional das plantas**. Viçosa: UFV, 2001. 122 p.

FONTES, R. L. F. **Purificação de soluções nutritivas para indução de deficiência de zinco e cobre em plantas**. 1986. 55 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

FOY, C. D. CHANEY, R. L.; WHITE, M. C. The physiology of metal toxicity in plants. **Ann. Rev. Plant Physiol.**, v. 29, p. 511-566, 1978.

FURLANI, R. C. M.; PAULO, E. M.; FURLANI JUNIOR, E.; LAZARINI, E.; BARBOSA, M. R.; PEREIRA, G. A.; BUZETTI, S. Estudo da correlação entre leitura de clorofila e níveis de nitrogênio aplicados em cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cv. Mundo Novo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 26., Marília, 2000. **Resumos...** Rio de Janeiro, MA/PROCAFÉ, 2000a. p. 209-210.

FURLANI, R. C.M.; PAULO, E. M.; FURLANI JUNIOR, E.; LAZARINI, E.; BARBOSA, M. R.; PEREIRA, G. A.; BUZETTI, S. Aplicação de níveis de nitrogênio em cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cv. Catuaí e sua correlação com teores foliares de clorofila. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 26., Marília, 2000. **Resumos...** Rio de Janeiro, MA/PROCAFÉ, 2000b. p. 210-211.

GRUSAK, M. A.; PEARSON, J. N.; MARENTES, E. The physiology of micronutrient homeostasis in field crops. **Field Crops Research**, v. 60, p. 41-56, 1999.

KAYA, C.; BURTON, M. A. S.; HIGGS, D. Responses of tomato cvs grown to fruit-harvest stage under zinc stress in glasshouse conditions. **J. Plant Nutr.**, v. 24, n. 2, p. 369-382, 2001

KAYA, C.; HIGGS, D. Inter-relationships between zinc nutrition, growth parameters and nutrient physiology in a hydroponically grown tomato cultivar. **J. Plant Nutr.**, v. 24, n. 10, p. 1491-1503, 2001.

KIM, T.; MILLS, H. A.; WETZSTEIN, H. Y. Studies on the effect of zinc supply on growth and nutrient uptake in pekan. **J. Plant Nutr.**, v. 25, n. 9, p. 1987-2000, 2002.

KOZLOWSKI, T. T.; PALLARDY, S. G. **Physiology of woody plants**. 2. ed. San Diego, Academic Press, 1997. 411p.

LICHTENTHALER, H. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. **Methodos in enzymology**, v. 148, p. 350-382, 1987.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 1980. 251 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2.ed. New York: Academic Press, 1995. 889 p.

MARTINEZ, H. E. P.; MENEZES, J. F. S.; SOUZA, R. B.; ALVAREZ VENEGAS, V. H.; GUIMARAES, P. T. G. Faixas críticas de concentrações de nutrientes e avaliação do estado nutricional do cafeeiro em quatro regiões de Minas Gerais. **Pesq. Agrop. Bras.**, v. 38, n. 6, p. 703-713, 2003.

MISRA, A.; RAMANI, S. Inhibition of iron absorption by zinc induced Fe-deficiency in Japanese mint. 1991. **Physiol. Plant.**, v. 13, n. 1, p. 37-42, 1991.

PEREIRA, G. A.; FURLANI JUNIOR, E.; NAKAYAMA, F. T.; GUILLAUMON, G. J. Correlação entre leitura de clorofila e níveis de nitrogênio aplicados no cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cultivar Mundo Novo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIRAS, 27., Uberaba, 2001. **Resumos...** Rio de Janeiro, MA/PROCAFÉ, 2001. p. 249-250.

PESTANA, M.; DAVID, M.; VERENNES, A.; ABADÍA, J.; FARIA, E. A. Responses of “newhall” orange trees to iron deficiency in hydroponics: effects on leaf chlorophyll, photosynthetic efficiency, and root ferric chelate reductase activity. **J. Plant Nutr.**, v. 24, n. 10, p. 1610-1620, 2001.

QADAR, A. Selecting rice genotypes tolerant to zinc deficiency and sodicity stresses. I. Differences in zinc, iron, manganese, copper, phosphorus concentrations, and phosphorus/zinc ratio in their leaves. **J. Plant Nutr.**, v. 25, n. 3, p. 457-473, 2002.

RENGEL, Z.; RÖMHELD, V.; MARSCHNER, H. Uptake of zinc and iron by wheat genotypes differing in tolerance to zinc deficiency. **J. Plant Physiol.**, v. 152, p. 433-438, 1998.

SANDOVAL-VILLA, M.; WOOD, C. W.; GUERTAL, E. A. Tomato leaf chlorophyll meter readings as affected by variety, nitrogen form, and nighttime nutrient solution strength. **J. Plant Nutr.**, v. 25, n. 10, p. 2129-2142, 2002.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. 2. ed. Sunderland: Sinauer Associates, Inc., Publishers, 1998. 792 p.

WELCH, M. R. Micronutrient nutrition of plants. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 14, n. 1, p. 49-82, 1995.

YAMAMOTO, A.; NAKAMURA, T.; ADU-GYAMFI, J. J.; SAIGUSA, M. Relationship between chlorophyll content in leaves of sorghum and pigeonpea determined by extraction method and by chlorophyll meter (SPAD-502). **J. Plant Nutr.**, v. 25, n. 10, p. 2295-2301, 2002.

YU, Q.; RENGEL, Z. Micronutrient deficiency influences plant growth and activities of superoxide dismutases in narrow-leaved lupins. **Annals of Botany**, v. 83, p. 175-182, 1999.

ZABINI, A. V.; MARTINEZ, H. E. P.; PEREIRA, A. A.; FINGER, F. L.; CRUZ, C. D. Tolerância diferencial à deficiência de zinco por progênies de cafeeiros (*Coffea arabica* L.). **R. bras. Ci. Solo**, Viçosa (enviado para publicação em 20/08/2004), 2004a.

ZABINI, A. V.; MARTINEZ, H. E. P.; CRUZ, C. D.; PEREIRA, A. A.; FINGER, F. L. Seleção de progênies de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) eficientes no uso de zinco. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa (enviado para publicação em 20/08/2004), 2004b.

2. CONCLUSÕES GERAIS

As avaliações das características de crescimento, concentração de nutrientes, eficiência nutricional e características bioquímicas das 14 progênes dos cafeeiros estudadas permitiram concluir que:

- O estado nutricional de zinco alterou a produção de matéria seca, a absorção de zinco, ferro, cobre e manganês, a eficiência nutricional para zinco e as características bioquímicas das progênes dos cafeeiros estudados.

- Os cafeeiros apresentaram comportamento diferenciado à restrição no fornecimento de zinco em solução nutritiva, evidenciando a existência de variabilidade entre progênes e entre plantas da mesma progênie.

- Com base nas características de crescimento, na solução em que se omitiu zinco, a progênie IAC 4376-5 (Tupi) demonstrou ser pouco exigente em zinco, enquanto a UFV 4066-3 (Tupi IAC 1669-33) foi altamente exigente nesse micronutriente.

- As progênes IAC 4376-5 (Tupi) e UFV 4066-5 (Tupi IAC 1669-33) apresentaram baixa exigência em zinco, e as progênes Caturra Amarelo 1, UFV 4066-3 (Tupi IAC 1669-33), Caturra Amarelo 2 e Caturra Vermelho 2 apresentaram alta exigência em zinco, em função conteúdo de zinco total.

- As reduções percentuais de área foliar, número de folhas, zinco ativo na folha completamente expandida e zinco total na raiz foram as variáveis que apresentaram a maior importância relativa na discriminação das progênes, sugerindo que os estudos de seleção de progênes dos cafeeiros dediquem atenção especial para estas características.

- A elevada EFN para a progênie UFV 4066-5 (Tupi IAC 1669-33) resulta de sua elevada EPB, ou seja, a grande capacidade de produção de biomassa da parte aérea por unidade de zinco alocado na parte aérea, uma vez que suas EAB e ET não se destacaram. Para a progênie Caturra Amarelo 2 verificou-se comportamento contrário a este, onde a elevada EAB e ET não compensaram sua baixa EPB, conduzindo à baixa EFN.

- A eficiência nutricional para zinco não está relacionada à manutenção de concentrações elevadas de micronutrientes, pigmentos e compostos indólicos nas folhas das mudas dos cafeeiros.

- Os resultados obtidos indicam a necessidade de estudos complementares integrando a nutrição mineral e o melhoramento genético vegetal, com avaliações do comportamento nutricional de novas cultivares de cafeeiros, visando selecionar plantas eficientes nutricionalmente.

APÊNDICES

APÊNDICE A

CAPÍTULO 1

Quadro 1A – Resumo da análise de variância das características de crescimento de 14 progênies de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Fonte de Variação | G.L. | Quadrados Médios | | | | | | | | | |
|-------------------|------|------------------|-------------|-------------|-----------|------------|-------------|------------|-------------|--|--|
| | | DCAU | ALT | NFOL | AF | MSF | MSPA | MSR | MST | | |
| Progênies | 13 | 2,7325 ** | 563,6627 ** | 774,0034 ** | 0,0077 ** | 39,2735 ** | 123,0583 ** | 30,9728 ** | 185,0036 ** | | |
| Zinco | 1 | 2,3432 ns | 106,0804 ** | 177,5089 ns | 0,0010 ns | 4,0790 ns | 19,5549 ns | 6,5926 ns | 48,8559 ns | | |
| Progênies x zinco | 13 | 1,4507 ns | 21,1188 ** | 250,7400 ** | 0,0015 ns | 18,4608 ** | 52,7036 ** | 5,9034 ns | 43,4168 * | | |
| Progênies/zinco | 26 | 2,0916 ** | 292,3908 ** | 512,3716 ** | 0,0046 ** | 28,8672 ** | 87,8809 ** | 18,4381 ** | 114,2104 ** | | |
| Progênies/zinco + | 13 | 2,5222 ** | 336,6045 ** | 394,6346 ** | 0,0059 ** | 31,9926 ** | 99,1186 ** | 22,0727 ** | 117,1882 ** | | |
| Progênies/zinco - | 13 | 1,6609 * | 248,1773 ** | 630,1106 ** | 0,0033 ns | 25,7418 ** | 76,6433 ** | 14,8035 ** | 111,2325 ** | | |
| Resíduo | 84 | 0,8026 | 7,4970 | 86,4851 | 0,0019 | 3,4238 | 11,1216 | 3,5856 | 19,7883 | | |
| Total | 111 | | | | | | | | | | |
| Média | | 11,33 | 44,63 | 95,53 | 0,37 | 27,29 | 45,06 | 14,26 | 59,32 | | |
| CV (%) | | 7,91 | 6,13 | 9,74 | 11,71 | 6,78 | 7,40 | 13,28 | 7,50 | | |

* significativo, pelo teste, F a 5%; ** significativo, a 1%; ns não-significativo.

Quadro 2A – Resumo da análise de variância dos teores de zinco total de 14 progênies de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Fonte de Variação | G.L. | Quadrados Médios | | | | |
|-------------------|------|------------------|------------|------------|--------------|----------------------|
| | | ZTFA | ZTFI | ZTFR | ZTC | ZTR |
| Progênies | 13 | 17,1351 * | 32,3846 * | 8,0380 * | 291,6713 * | 2760,8380 * |
| Zinco | 1 | 333,9949 * | 543,1806 * | 640,3289 * | 16059,1935 * | 285943,2069 * |
| Progênies x zinco | 13 | 6,0350 * | 9,5841 * | 2,0964 * | 229,3240 * | 2672,8714 * |
| Progênies/zinco | 26 | 11,5850 * | 20,9843 * | 5,0672 * | 260,4977 * | 2716,8547 * |
| Progênies/zinco + | 13 | 17,8930 * | 36,0836 * | 7,7858 * | 497,9799 * | 5430,2803 * |
| Progênies/zinco - | 13 | 5,2771 * | 5,8851 * | 2,3486 * | 23,0154 * | 3,4291 ^{ns} |
| Resíduo | 84 | 0,5598 | 0,6056 | 0,3378 | 2,7271 | 6,8080 |
| Total | 111 | | | | | |
| Média | | 10,14 | 10,23 | 9,44 | 18,35 | 59,84 |
| CV (%) | | 7,38 | 7,61 | 6,16 | 9,00 | 4,36 |

* significativo, pelo teste, F a 1%; ^{ns} não-significativo.

Quadro 3A – Resumo da análise de variância dos teores de zinco ativo de 14 progênies de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Fonte de Variação | G.L. | Quadrados Médios | | | | |
|-------------------|------|------------------|------------|----------|-------------|----------------------|
| | | ZAFA | ZAFI | ZAFR | ZAC | ZAR |
| Progênies | 13 | 4,0874 * | 15,1344 * | 3,5767 * | 139,3345 * | 1191,1542 * |
| Zinco | 1 | 1,2623 * | 105,4584 * | 8,7640 * | 6201,5378 * | 181105,8405 * |
| Progênies x zinco | 13 | 0,1938 * | 4,2723 * | 1,1136 * | 96,2752 * | 1172,6035 * |
| Progênies/zinco | 26 | 2,1406 * | 9,7033 * | 2,3452 * | 117,8048 * | 1181,8788 * |
| Progênies/zinco + | 13 | 2,2123 * | 14,7458 * | 2,5737 * | 205,1615 * | 2359,3437 * |
| Progênies/zinco - | 13 | 2,0690 * | 4,6609 * | 2,1167 * | 30,4482 * | 4,4139 ^{ns} |
| Resíduo | 84 | 0,0382 | 0,0554 | 0,0088 | 1,4774 | 42,9700 |
| Total | 111 | | | | | |
| Média | | 1,85 | 4,51 | 1,40 | 15,21 | 48,24 |
| CV (%) | | 10,54 | 5,22 | 6,70 | 7,99 | 13,59 |

* significativo, pelo teste F, a 1%; ^{ns} não-significativo.

Quadro 4A – Resumo da análise de variância dos teores de zinco ativo de 14 progênies de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Fonte de Variação | G.L. | Quadrados Médios | | | | | | |
|-------------------|------|------------------|----------------|-------------------------|----------------|--------------------------|-----------|--|
| | | Folhas | Caule | Raíz | Parte aérea | Total | Pa/R | |
| Progênies | 13 | 3677,5404 * | 29058,1503 * | 515917,1854 * | 41647,1828 * | 515977,2778 * | 0,4534 * | |
| Zinco | 1 | 412113,1212 * | 4678450,3175 * | 58495945,0734 * | 7867648,7906 * | 109269211,6196 * | 94,6497 * | |
| Progênies x zinco | 13 | 2623,9049 * | 20440,2871 * | 488195,9212 * | 24907,6920 * | 436824,2682 * | 0,1770 * | |
| Progênies/zinco | 26 | 3150,7227 * | 24749,2187 * | 502056,5533 * | 33277,4374 * | 476400,7730 * | 0,3152 * | |
| Progênies/zinco + | 13 | 3863,4769 * | 41677,5470 * | 1002914,8791 * | 50687,9255 * | 928872,9657 * | 0,2932 * | |
| Progênies/zinco - | 13 | 2437,9684 * | 7820,8905 * | 1198,2275 ^{ns} | 15866,9493 * | 23928,5803 ^{ns} | 0,3372 * | |
| Resíduo | 84 | 600,4889 | 1990,6250 | 25888,3886 | 3551,5312 | 34872,9426 | 0,0631 | |
| Total | 111 | | | | | | | |
| Média | | 265,07 | 314,53 | 852,49 | 579,60 | 1432,09 | 1,53 | |
| CV (%) | | 9,24 | 14,18 | 18,87 | 10,28 | 13,04 | 16,40 | |

*significativo, pelo teste F, a 1%; ^{ns} não-significativo.

Quadro 5A – Resumo da análise de variância das reduções percentuais nos teores de zinco total de 14 progênies de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Fonte de Variação | G.L. | Quadrados Médios | | | | |
|-------------------|------|------------------|------------|------------|------------|-----------|
| | | ZTFA | ZTFI | ZTFR | ZTC | ZTR |
| Progênies | 13 | 525,6826 * | 354,6560 * | 100,5192 * | 358,6980 * | 52,5794 * |
| Resíduo | 42 | 42,6874 * | 45,4253 * | 23,7263 * | 4,2439 * | 0,5109 * |
| Total | 55 | | | | | |
| Média | | 27,73 | 33,52 | 40,02 | 77,65 | 90,59 |
| CV (%) | | 23,56 | 20,11 | 12,17 | 2,65 | 0,79 |

* significativo, pelo teste F a 1%.

Quadro 6A – Resumo da análise de variância das reduções percentuais nos teores de zinco ativo de 14 progênies de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Fonte de Variação | G.L. | Quadrados Médios | | | | | |
|-------------------|------|------------------|-------------|-------------|------------|-----------|--|
| | | ZAFA | ZAFI | ZAFR | ZAC | ZAR | |
| Progênies | 13 | 725,5273 * | 1352,2546 * | 5890,5859 * | 786,9570 * | 61,8476 * | |
| Resíduo | 42 | 8,9288 * | 37,6915 * | 40,9316 * | 13,3426 * | 1,8903 * | |
| Total | 55 | | | | | | |
| Média | | 11,33 | 32,33 | 31,68 | 63,70 | 90,01 | |
| CV (%) | | 26,37 | 18,99 | 20,19 | 5,73 | 1,53 | |

* significativo, pelo teste F, a 1%.

Quadro 7A – Matriz da Distância Generalizada de Mahalanobis entre 14 progênes de cafeeiros, em função do percentual de redução ou incremento causado pelo zinco em oito características de crescimento avaliadas

| Progênes* | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 2 | 28,39 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 14,42 | 12,22 | | | | | | | | | | | |
| 4 | 29,17 | 4,66 | 10,57 | | | | | | | | | | |
| 5 | 22,10 | 4,00 | 8,18 | 3,46 | | | | | | | | | |
| 6 | 40,32 | 3,97 | 24,28 | 10,66 | 9,87 | | | | | | | | |
| 7 | 16,83 | 12,93 | 6,41 | 11,05 | 7,99 | 24,36 | | | | | | | |
| 8 | 11,30 | 14,74 | 9,14 | 8,78 | 6,10 | 25,31 | 10,64 | | | | | | |
| 9 | 14,27 | 7,45 | 3,15 | 6,02 | 3,04 | 14,58 | 5,13 | 5,33 | | | | | |
| 10 | 14,35 | 33,74 | 28,06 | 30,67 | 26,67 | 38,92 | 22,98 | 16,05 | 17,55 | | | | |
| 11 | 19,87 | 5,63 | 11,50 | 12,09 | 5,51 | 6,42 | 12,88 | 15,17 | 5,85 | 27,15 | | | |
| 12 | 10,88 | 17,82 | 11,01 | 9,47 | 5,31 | 15,41 | 8,88 | 6,08 | 6,32 | 20,85 | 7,10 | | |
| 13 | 17,54 | 27,04 | 10,90 | 21,66 | 24,45 | 38,62 | 12,04 | 19,01 | 12,68 | 18,73 | 26,75 | 24,53 | |
| 14 | 9,68 | 16,48 | 6,45 | 13,80 | 13,41 | 22,61 | 11,26 | 10,54 | 4,89 | 14,54 | 11,22 | 11,06 | 7,47 |

* 1(UFV 4066-5), 2(IAC 4376-1), 3(Caturra Amarelo 4), 4(Caturra Amarelo 1), 5(Caturra Amarelo 3), 6(UFV 4066-3), 7(UFV 4066-1), 8(H-504-5-6-1 MS), 9(Caturra Amarelo 2), 10(Caturra Vermelho 1), 11(Caturra Vermelho 2), 12(Caturra Vermelho 4), 13(IAC 4376-5), 14(Caturra Vermelho 3).

Quadro 8A – Estimativa dos autovalores e variação acumulada associada as variáveis canônicas, obtidas a partir dos percentuais de redução ou incremento das características de crescimento, avaliadas em 14 progênies de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Variáveis Canônicas | Raiz | Raiz (%) | % Acumulada |
|----------------------------|-------------|-----------------|--------------------|
| VC1 | 33,5621 | 46,3318 | 46,3318 |
| VC2 | 13,0355 | 17,9952 | 64,3270 |
| VC3 | 0,9712 | 13,4067 | 77,7338 |
| VC4 | 0,7529 | 10,3933 | 88,1271 |
| VC5 | 0,3987 | 5,5040 | 93,6311 |
| VC6 | 0,2775 | 3,8303 | 97,4614 |
| VC7 | 0,1263 | 1,7430 | 99,2044 |
| VC8 | 0,0576 | 0,7956 | 100,0000 |

Quadro 9A – Importância relativa dos percentuais de redução ou incremento das características de crescimento nas variáveis canônicas, avaliadas em 14 progênies de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Variáveis Canônicas | Características de Crescimento | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | DCAU | ALT | NFOL | AF | MSF | MSPA | MSR | MST |
| VC1 | -0,183 | -0,052 | 0,402 | 0,363 | -0,608 | -1,856 | 0,291 | 1,434 |
| VC2 | 0,436 | -0,331 | 1,373 | -0,662 | -0,499 | 0,981 | 0,728 | -1,302 |
| VC3 | -0,722 | -0,367 | 0,064 | -0,091 | -0,271 | -4,155 | -2,900 | 7,433 |
| VC4 | 0,049 | -0,805 | 0,196 | -0,458 | 1,081 | 2,312 | 2,108 | -4,197 |
| VC5 | -0,706 | 0,743 | 0,418 | -0,325 | 1,195 | -3,343 | -1,117 | 3,123 |
| VC6 | -0,017 | 0,244 | -0,125 | -0,825 | -0,584 | 3,962 | 2,452 | -4,289 |
| VC7 | -0,711 | -0,024 | -0,074 | 0,788 | -0,298 | 3,894 | 2,178 | -4,748 |
| VC8 | 0,546 | 0,066 | -0,011 | 0,362 | 0,521 | -1,795 | -0,234 | 1,523 |

Quadro 10A – Matriz da Distância Generalizada de Mahalanobis entre 14 progênies de cafeeiros, em função do percentual de redução ou incremento causado pelo zinco, em dez variáveis de concentração de zinco avaliadas

| Progênies* | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2 | 265,92 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 286,31 | 58,13 | | | | | | | | | | | |
| 4 | 252,24 | 108,76 | 58,14 | | | | | | | | | | |
| 5 | 158,72 | 344,37 | 311,14 | 321,66 | | | | | | | | | |
| 6 | 406,07 | 542,89 | 374,81 | 364,64 | 313,91 | | | | | | | | |
| 7 | 126,42 | 159,10 | 117,83 | 143,77 | 212,67 | 239,06 | | | | | | | |
| 8 | 468,21 | 319,30 | 396,18 | 502,05 | 462,79 | 514,73 | 430,06 | | | | | | |
| 9 | 547,66 | 407,92 | 246,68 | 454,56 | 631,27 | 429,82 | 280,03 | 579,66 | | | | | |
| 10 | 296,87 | 86,95 | 53,39 | 139,48 | 262,50 | 435,82 | 213,91 | 366,32 | 305,68 | | | | |
| 11 | 330,55 | 83,91 | 77,11 | 173,05 | 264,02 | 546,37 | 256,53 | 402,55 | 391,87 | 12,55 | | | |
| 12 | 386,99 | 159,56 | 88,43 | 219,80 | 410,66 | 311,44 | 191,87 | 310,21 | 131,39 | 84,48 | 144,21 | | |
| 13 | 369,63 | 335,39 | 482,79 | 615,90 | 719,09 | 872,42 | 418,44 | 351,55 | 525,62 | 456,85 | 499,86 | 378,02 | |
| 14 | 125,43 | 190,26 | 178,99 | 169,03 | 195,91 | 167,14 | 89,56 | 314,38 | 381,60 | 185,50 | 249,46 | 162,26 | 380,58 |

* 1(UFV 4066-5), 2(IAC 4376-1 - Tupi), 3(Caturra Amarelo 4), 4(Caturra Amarelo 1), 5(Caturra Amarelo 3), 6(UFV 4066-3), 7(UFV 4066-1), 8(H-504-5-6-1 MS), 9(Caturra Amarelo 2), 10(Caturra Vermelho 1), 11(Caturra Vermelho 2), 12(Caturra Vermelho 4), 13(IAC 4376-5 - Tupi), 14(Caturra Vermelho 3)

Quadro 11A – Contribuição relativa dos percentuais de redução ou incremento das concentrações de zinco total e ativo, para divergência entre 14 progênies de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva (Singh, 1981)

| Variável | S.j | Valor (%) |
|----------|------------|-----------|
| RZTFA | 937,5802 | 3,3737 |
| RZTFI | 247,8873 | 0,8920 |
| RZTFR | 459,7630 | 1,6544 |
| RZTC | 3594,1778 | 12,9331 |
| RZTR | 4539,4465 | 16,3345 |
| RZAFA | 4476,0213 | 16,1062 |
| RZAFI | 25011,6007 | 9,0000 |
| RZAFR | 7402,7852 | 26,6377 |
| RZAC | 2587,5648 | 9,3109 |
| RZAR | 1044,2423 | 3,7575 |

Quadro 12A – Estimativa dos autovalores e variação acumulada associada as variáveis canônicas, obtidas a partir dos percentuais de redução ou incremento das concentrações de zinco total e ativo, avaliadas em 14 progênies de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Variáveis Canônicas | Raiz | Raiz (%) | % Acumulada |
|---------------------|---------|----------|-------------|
| VC1 | 44,2336 | 28,9815 | 28,9815 |
| VC2 | 35,4918 | 23,2434 | 52,2250 |
| VC3 | 31,9386 | 20,9165 | 73,1414 |
| VC4 | 20,2442 | 13,2579 | 86,3993 |
| VC5 | 12,0012 | 7,8596 | 94,2589 |
| VC6 | 5,5515 | 3,6356 | 97,8945 |
| VC7 | 2,5099 | 1,6437 | 99,5383 |
| VC8 | 0,5069 | 0,3320 | 99,8703 |
| VC9 | 0,1534 | 0,1005 | 99,9708 |
| VC10 | 0,0447 | 0,0292 | 100,0000 |

Quadro 13A – Importância relativa dos percentuais de redução ou incremento das concentrações de zinco total e ativo nas variáveis canônicas, avaliadas em 14 progênies de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Variáveis Canônicas | Concentrações de Zinco Total e Ativo | | | | | | | | | |
|---------------------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | ZTFA | ZTFI | ZTFR | ZTC | ZTR | ZAFA | ZAFI | ZAFR | ZAC | ZAR |
| VC1 | -0,325 | 0,126 | -0,385 | -0,270 | -0,430 | -0,474 | 0,126 | 0,828 | 0,269 | -0,099 |
| VC2 | 0,028 | -0,122 | -0,076 | -0,288 | 0,592 | 0,314 | 0,008 | 0,658 | -0,165 | 0,144 |
| VC3 | -0,164 | 0,018 | 0,432 | 0,750 | 0,271 | 0,568 | -0,353 | 0,244 | 0,554 | 0,104 |
| VC4 | 0,358 | -0,310 | -0,013 | 0,074 | -0,362 | 0,781 | 0,294 | -0,002 | -0,171 | -0,353 |
| VC5 | -0,402 | -0,530 | -0,479 | 0,406 | 0,278 | 0,055 | 1,288 | 0,198 | 0,002 | 0,286 |
| VC6 | -0,790 | 0,364 | -0,376 | -0,429 | 0,049 | 0,209 | -0,107 | 0,022 | 0,593 | -0,072 |
| VC7 | -0,412 | 0,840 | 0,155 | 0,350 | -0,018 | 0,071 | -0,164 | 0,066 | -0,501 | -0,009 |
| VC8 | 0,284 | 0,311 | 0,690 | -0,422 | -0,251 | -0,002 | 0,016 | 0,016 | 0,426 | 0,472 |
| VC9 | 0,253 | 0,157 | -0,425 | 0,016 | -0,344 | 0,011 | -0,105 | -0,004 | 0,033 | 0,699 |
| VC10 | 0,278 | 0,511 | -0,430 | -0,082 | 0,390 | -0,087 | 0,054 | 0,097 | 0,181 | -0,405 |

Quadro 14A – Matriz da Distância Generalizada de Mahalanobis entre 14 progênes de cafeeiros, em função do percentual de redução ou incremento causado pelo zinco, em cinco variáveis de conteúdo de zinco avaliadas

| Progênes* | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
|-----------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 2 | 5,50 | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 61,05 | 66,45 | | | | | | | | | | | |
| 4 | 31,91 | 32,53 | 14,31 | | | | | | | | | | |
| 5 | 9,66 | 11,44 | 35,58 | 8,85 | | | | | | | | | |
| 6 | 52,55 | 40,80 | 17,08 | 15,29 | 27,51 | | | | | | | | |
| 7 | 29,28 | 20,56 | 70,47 | 57,30 | 39,92 | 42,34 | | | | | | | |
| 8 | 5,34 | 15,50 | 39,16 | 17,93 | 5,78 | 43,81 | 37,12 | | | | | | |
| 9 | 111,38 | 101,30 | 53,59 | 89,92 | 103,29 | 42,40 | 53,76 | 105,63 | | | | | |
| 10 | 41,90 | 48,61 | 10,94 | 3,18 | 17,05 | 24,92 | 70,00 | 20,84 | 96,91 | | | | |
| 11 | 18,02 | 12,90 | 31,66 | 8,42 | 3,41 | 14,27 | 31,75 | 14,44 | 82,35 | 18,98 | | | |
| 12 | 25,10 | 21,76 | 25,04 | 23,58 | 19,42 | 12,60 | 21,30 | 24,52 | 36,54 | 34,13 | 13,27 | | |
| 13 | 8,02 | 19,46 | 103,47 | 62,37 | 27,87 | 97,60 | 60,34 | 19,43 | 170,28 | 74,30 | 44,98 | 56,58 | |
| 14 | 18,51 | 21,90 | 30,90 | 10,81 | 4,79 | 26,82 | 56,89 | 14,02 | 100,60 | 20,07 | 8,39 | 18,18 | 35,99 |

* 1(UFV 4066-5), 2(IAC 4376-1 - Tupi), 3(Caturra Amarelo 4), 4(Caturra Amarelo 1), 5(Caturra Amarelo 3), 6(UFV 4066-3), 7(UFV 4066-1), 8(H-504-5-6-1 MS), 9(Caturra Amarelo 2), 10(Caturra Vermelho 1), 11(Caturra Vermelho 2), 12(Caturra Vermelho 4), 13(IAC 4376-5 - Tupi), 14(Caturra Vermelho 3)

Quadro 15A – Contribuição relativa dos percentuais de redução ou incremento do conteúdo de zinco total em diferentes partes da planta, para divergência entre 14 progênies de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva (Singh, 1981)

| Variável | S.j | Valor (%) |
|-------------|-----------|-----------|
| Folhas | 309,8628 | 4,8244 |
| Caule | 3365,2562 | 52,3948 |
| Raiz | 484,2606 | 7,5396 |
| Parte Aérea | 998,8301 | 15,5511 |
| Total | 1264,6729 | 19,6901 |

Quadro 16A – Estimativa dos autovalores e variação acumulada associada as variáveis canônicas, obtidas a partir dos percentuais de redução ou incremento do conteúdo de zinco total, avaliado em 14 progênies de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco em solução nutritiva

| Variáveis Canônicas | Raiz | Raiz (%) | % Acumulada |
|---------------------|---------|----------|-------------|
| VC1 | 10,4433 | 54,9853 | 54,9853 |
| VC2 | 5,9413 | 31,2816 | 86,2669 |
| VC3 | 1,4416 | 7,5900 | 93,8570 |
| VC4 | 0,9995 | 5,2623 | 99,1193 |
| VC5 | 0,1673 | 0,8809 | 100,0000 |

Quadro 17A – Importância relativa dos percentuais de redução ou incremento do conteúdo de zinco total nas variáveis canônicas, avaliado em 14 progênies de cafeeiros, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Variáveis Canônicas | Conteúdo de Zinco Total | | | | |
|---------------------|-------------------------|--------|--------|-------------|--------|
| | Folhas | Caule | Raiz | Parte Aérea | Total |
| VC1 | -0,834 | -2,330 | -0,359 | 1,340 | 1,487 |
| VC2 | -1,491 | -2,428 | 0,786 | 4,044 | -1,574 |
| VC3 | -0,308 | -1,138 | 0,052 | 1,910 | 0,294 |
| VC4 | -2,429 | -1,614 | -0,088 | 2,747 | 0,918 |
| VC5 | 0,589 | 0,970 | 2,097 | -0,591 | -2,110 |

APÊNDICE B

CAPÍTULO 2

Quadro 1B – Resumo da análise de variância das variáveis de eficiência nutricional de 14 progênies de cafeeiro, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Fonte de Variação | G.L. | Quadrados Médios | | | |
|-------------------|------|----------------------|----------|--------------|-----------------------|
| | | EAB | ET | EPB | EFN |
| Progênies | 13 | 0,3524 * | 0,2168 * | 455,0011 * | 342,8696 * |
| Zinco | 1 | 54,0960 * | 3,2729 * | 45020,2701 * | 112625,6755 * |
| Progênies x zinco | 13 | 0,3457 * | 0,0150 * | 307,5122 * | 218,4759 * |
| Progênies/zinco | 26 | 0,3490 * | 0,0183 * | 381,2566 * | 280,6727 * |
| Progênies/zinco + | 13 | 0,6912 * | 0,0343 * | 98,3822 * | 24,9352 ^{ns} |
| Progênies/zinco - | 13 | 0,0070 ^{ns} | 0,0023 * | 664,1312 * | 536,4103 * |
| Resíduo | 84 | 0,0073 | 0,0009 | 21,0174 | 25,5081 |
| Total | 111 | | | | |
| Média | | 1,02 | 0,54 | 45,01 | 46,98 |
| CV (%) | | 8,39 | 5,58 | 10,19 | 10,75 |

* significativo, pelo teste F, a 1%; ^{ns} não-significativo.

APÊNDICE C

CAPÍTULO 3

Quadro 1C – Resumo da análise de variância dos teores de zinco, em diferentes partes do cafeeiro, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Fonte de Variação | G.L. | Quadrados Médios | | | | | | | | | |
|-------------------|------|------------------|----|----------|----|----------|---------------|-----------|----|------------|---------------|
| | | ZNFA | | ZNFI | | ZNFR | | ZNCAU | | ZNRAIZ | |
| Progênes | 3 | 32,9543 | ** | 54,6997 | ** | 1,1905 | * | 531,3511 | ** | 4914,4739 | ** |
| Zinco | 1 | 134,4800 | ** | 165,8476 | ** | 138,6113 | ** | 5613,2310 | ** | 55219,1220 | ** |
| Progênes x zinco | 3 | 2,5390 | ** | 4,6274 | ** | 0,1727 | ^{ns} | 494,2280 | ** | 5034,1348 | ** |
| Progênes/zinco | 6 | 17,7466 | ** | 29,6635 | ** | 0,6816 | * | 512,7896 | ** | 4974,3044 | ** |
| Progênes/zinco + | 3 | 23,9168 | ** | 45,1669 | ** | 1,1039 | * | 1013,7898 | ** | 9945,8419 | ** |
| Progênes/zinco - | 3 | 11,5764 | ** | 14,1602 | ** | 0,2593 | ^{ns} | 11,7893 | ** | 2,7669 | ^{ns} |
| Resíduo | 24 | 0,5292 | | 0,7951 | | 0,2731 | | 1,8030 | | 5,2154 | |
| Total | 31 | | | | | | | | | | |
| Média | | 9,87 | | 10,94 | | 8,93 | | 19,57 | | 50,05 | |
| CV (%) | | 7,37 | | 8,15 | | 5,85 | | 6,86 | | 4,56 | |

* significativo, pelo teste F, a 5%; **significativo, a 1%; ^{ns} não-significativo.

Quadro 2C – Resumo da análise de variância dos teores de ferro, em diferentes partes do cafeeiro, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Fonte de Variação | G.L. | Quadrados Médios | | | | |
|-------------------|------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------------|
| | | FEFA | FEFI | FEFR | FECAU | FERAIZ |
| Progênes | 3 | 304,6944 ^{ns} | 7691,5853 ^{ns} | 1018,5297 ^{ns} | 323,9371 ^{ns} | 20114,8831 ^{**} |
| Zinco | 1 | 2721,3753 ^{ns} | 11231,2578 ^{ns} | 8595,2438 ^{**} | 818,1013 ^{ns} | 19552,5313 ^{**} |
| Progênes x zinco | 3 | 3289,2522 [*] | 4610,0462 ^{ns} | 1653,9272 ^{**} | 517,9746 ^{ns} | 4262,9894 [*] |
| Progênes/zinco | 6 | 1796,9733 ^{ns} | 6150,8157 ^{ns} | 1336,2284 ^{**} | 420,9558 ^{ns} | 12188,9363 ^{**} |
| Progênes/zinco + | 3 | 1120,6289 ^{ns} | 5736,5260 ^{ns} | 299,5263 ^{ns} | 126,7454 ^{ns} | 9603,9273 ^{**} |
| Progênes/zinco - | 3 | 2473,3177 [*] | 6565,1054 ^{ns} | 2372,9306 ^{**} | 715,1663 ^{ns} | 14773,9452 ^{**} |
| Resíduo | 24 | 751,0220 | 3041,8165 | 343,8930 | 253,7393 | 1419,2751 |
| Total | 31 | | | | | |
| Média | | 95,88 | 290,27 | 121,76 | 52,51 | 215,88 |
| CV (%) | | 28,58 | 19,00 | 15,23 | 30,34 | 17,45 |

* significativo, pelo teste F, a 5%; **significativo, a 1%;^{ns} não-significativo.

Quadro 3C – Resumo da análise de variância dos teores de cobre, em diferentes partes do cafeeiro, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Fonte de Variação | G.L. | Quadrados Médios | | | | |
|-------------------|------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------|
| | | CUFA | CUFI | CUFR | CUCAU | CURAIZ |
| Progênes | 3 | 0,7439 ^{ns} | 7,0242 ^{**} | 1,70313 ^{**} | 4,81615 ^{**} | 166,28594 ^{**} |
| Zinco | 1 | 2,0000 ^{ns} | 1,3820 ^{ns} | 0,05281 ^{ns} | 0,30031 ^{ns} | 37,62781 ^{ns} |
| Progênes x zinco | 3 | 1,7444 ^{ns} | 1,1032 [*] | 0,90177 ^{ns} | 2,68781 ^{**} | 58,8826 ^{**} |
| Progênes/zinco | 6 | 1,2441 ^{ns} | 4,0637 ^{**} | 1,30245 ^{**} | 3,75198 ^{**} | 112,58427 ^{**} |
| Progênes/zinco + | 3 | 1,6268 ^{ns} | 6,0452 ^{**} | 0,53141 ^{ns} | 1,74437 ^{**} | 193,02625 ^{**} |
| Progênes/zinco - | 3 | 0,8614 ^{ns} | 2,0822 ^{**} | 2,07349 ^{**} | 5,75958 ^{**} | 32,14229 [*] |
| Resíduo | 24 | 0,7749 | 0,3341 | 0,30615 | 0,31125 | 9,43297 |
| Total | 31 | | | | | |
| Média | | 3,69 | 2,51 | 1,61 | 4,51 | 21,33 |
| CV (%) | | 23,85 | 23,02 | 34,31 | 12,37 | 14,40 |

* significativo, pelo teste F, a 5%; **significativo, a 1%;^{ns} não-significativo.

Quadro 4C – Resumo da análise de variância dos teores de manganês, em diferentes partes do cafeeiro, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Fonte de Variação | G.L. | Quadrados Médios | | | | |
|-------------------|------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|---------------|
| | | MNFA | MNFI | MNFR | MNCAU | MNRAIZ |
| Progênes | 3 | 2179,6538 * | 10578,5235 ** | 1773,3559 ^{ns} | 131,5928 ^{ns} | 11997,2887 ** |
| Zinco | 1 | 1729,4551 ^{ns} | 0,2450 ^{ns} | 1616,6720 ^{ns} | 61,6050 ^{ns} | 5454,9013 * |
| Progênes x zinco | 3 | 778,0697 ^{ns} | 1237,6198 ^{ns} | 1181,4042 ^{ns} | 103,5683 ^{ns} | 6875,8475 ** |
| Progênes/zinco | 6 | 1478,8617 * | 5908,0717 ** | 1477,3801 ^{ns} | 117,5806 ^{ns} | 9436,5681 ** |
| Progênes/zinco + | 3 | 1166,3621 ^{ns} | 3637,9856 * | 398,4283 ^{ns} | 96,1018 ^{ns} | 15747,1343 ** |
| Progênes/zinco - | 3 | 1791,3614 * | 8178,1577 ** | 2556,3318 * | 139,0593 ^{ns} | 3126,0018 * |
| Resíduo | 24 | 488,0910 | 1029,4870 | 811,4134 | 101,5447 | 1023,7322 |
| Total | 31 | | | | | |
| Média | | 84,54 | 252,16 | 115,72 | 37,43 | 87,01 |
| CV (%) | | 26,13 | 12,72 | 24,62 | 26,92 | 36,77 |

* significativo, pelo teste F, a 5%; **significativo, a 1%; ^{ns} não-significativo.

Quadro 5C – Resumo da análise de variância das variáveis bioquímicas de 14 progênes de cafeeiro, em resposta a duas concentrações de zinco, em solução nutritiva

| Fonte de Variação | G.L. | Quadrados Médios | | | | | | | | | | | |
|-------------------|------|------------------|----|--------|----|---------|----|--------|----|----------|----|-----------|----|
| | | Ca | | Cb | | C(a+b) | | X+C | | SPAD | | INDOL | |
| Progênes | 3 | 4,2694 | ** | 1,0823 | ** | 9,4472 | ** | 0,3986 | ** | 168,6833 | ** | 8566,4925 | ** |
| Zinco | 1 | 0,2432 | ns | 0,0011 | ns | 0,2758 | ns | 0,0616 | ** | 34,0817 | ** | 208,1526 | ns |
| Progênes x zinco | 3 | 2,6235 | ** | 0,4510 | ** | 5,2479 | ** | 0,1368 | ** | 11,0406 | * | 2869,9000 | ** |
| Progênes/zinco | 6 | 3,4464 | ** | 0,7667 | ** | 7,3476 | ** | 0,2677 | ** | 89,8619 | ** | 5718,1963 | ** |
| Progênes/zinco + | 3 | 0,8225 | ** | 0,1817 | ** | 1,6440 | ** | 0,1496 | ** | 59,2275 | ** | 7272,2653 | ** |
| Progênes/zinco - | 3 | 6,0703 | ** | 1,3517 | ** | 13,0511 | ** | 0,3858 | ** | 120,4964 | ** | 4164,1272 | ** |
| Resíduo | 16 | 0,0932 | | 0,0251 | | 0,1962 | | 0,0069 | | 2,7738 | | 189,5099 | |
| Total | 23 | | | | | | | | | | | | |
| Média | | 5,40 | | 2,73 | | 8,12 | | 0,94 | | 58,02 | | 106,13 | |
| CV (%) | | 5,66 | | 5,81 | | 5,45 | | 8,76 | | 2,87 | | 12,97 | |