

ÁCIDO CÍTRICO E FÓSFORO NO DESENVOLVIMENTO E ESTADO NUTRICIONAL DE MUDAS DE CAFÉ

Vinícius Teixeira Lemos¹, André Cabral França², Enílson de Barros Silva³,
Renan Luís da Silva Marinho⁴, Miguel Henrique Rosa Franco⁵, Moisés de Avellar⁶,
Ana Flávia de Freitas⁷, Lílian Alves de Carvalho Reis⁸, Juliano Miari Corrêa⁹,
Gladyston Rodrigues Carvalho¹⁰

(Recebido: 02 de agosto de 2014; aceito: 03 de dezembro de 2014)

RESUMO: Em solos intemperizados existe um aumento da retenção de ânions como o fosfato. Ácidos orgânicos de baixa massa molecular têm sido eficazes para disponibilizar nutrientes considerados “indisponíveis no solo”, como o fósforo. Objetivou-se avaliar o desenvolvimento, a qualidade e o estado nutricional de mudas de café cultivar Catuaí Vermelho (IAC 99), submetidas à aplicação de diferentes concentrações de ácido cítrico e fósforo no substrato. Utilizou-se esquema fatorial (4x4), sendo o primeiro fator referente à aplicação de ácido cítrico anidro (0,0; 0,5; 1,0 e 2,0 mg dm⁻³) e, o segundo referente às doses de fósforo (0, 450, 900 e 1800 mg P₂O₅ dm⁻³), aplicadas no substrato. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, com cinco repetições. As sementes foram germinadas em saquinhos com substrato padrão para mudas de café, ajustado conforme os tratamentos. O ácido cítrico foi aplicado quando as mudas apresentavam as folhas cotiledonares. As avaliações foram realizadas aos 180 dias após a sementeira, quando as mudas apresentavam-se com quatro a cinco pares de folhas expandidas, sendo avaliados os teores foliares e atributos fitotécnicos e, a partir destes, determinado o índice de qualidade de Dickson. As doses de 1.404,0 mg P₂O₅ dm⁻³ e 1,0 mg dm⁻³ de ácido cítrico no substrato influenciam, positivamente, na qualidade máxima das mudas. Não foi efetiva a dose de 2,0 mg dm⁻³ de ácido cítrico para o desenvolvimento com qualidade das mesmas até o ponto de plantio, embora tenham aumentado os teores de Ca, N, P, S, Cu, Fe e Zn, nas folhas.

Termos para indexação: *Coffea arabica*, ácidos orgânicos, índice Dickson, liberação de fósforo.

CITRIC ACID AND PHOSPHORUS ON DEVELOPMENT AND NUTRITIONAL STATUS OF COFFEE SEEDLING

ABSTRACT: In weathered soils, there is an increased retention of anions such as phosphate. Organic acids of low molecular mass have been shown an effective way to provide nutrients before it showed unavailable in the soil, such as phosphorus. The objective was to evaluate the quality and growth content of seedlings of ‘Catuaí Vermelho’ coffee (IAC-99), submitted the application of citric acid and phosphorus concentrations in the substrate. Was used the factorial scheme (4x4), being the first factor concerning the application of citric acid anidre to the substrate (0,0; 0,5; 1,0 e 2,0 mg dm⁻³), and the second concerning the doses of phosphorus (0, 450, 900 e 1800 mg P₂O₅ dm⁻³), in substrate. The experimental design was a randomized complete block with five replicates. The seeds were germinated in bags with standard substrate for coffee seedlings, adjusted according to the treatment with applications of phosphorus. Citric acid was applied when the seedlings had the cotyledons. The evaluation has been held at 180 days after sowing when the seedlings had four to five leaf pairs expands. Were measured the foliar levels, and fhytotechnical attributes and from these determined Dickson quality index. Doses of 1404.0 mg P₂O₅ dm⁻³ and 1.0 mg dm⁻³ of citric acid in the substrate positively influenced the maximum quality of the seedlings. Was not effective dose of 2.0 mg dm⁻³ of citric acid for the development of the same quality to the point of planting, while increasing the concentration of Ca, N, P, S, Cu, Fe and Zn in the leaves.

Index terms: *Coffea arabica*, organic acids, Dickson index, phosphorus release.

1 INTRODUÇÃO

O parque cafeeiro brasileiro é estimado em mais de 6,7 bilhões de covas, presentes em propriedades de tamanhos diversos, ocupando mais de 2,0 milhões de hectares (Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2014).

De acordo com a CONAB (2014), mesmo os produtores desestimulados pelas baixas no valor da saca de café do mercado dos últimos dois anos agrícola, 2012/2013 a 2013/2014, houve um aumento de 10,0% de lavouras de cafeeiros arábicas em formação, proporcionando demanda por mudas, mesmo na época de baixa.

¹Universidade Federal de Lavras/UFLA -Departamento de Agricultura/DAG - 37.2000-000 - Lavras - MG - lemosvt@yahoo.com.br
^{2,3,9}Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri/UFVJM - Departamento de Agronomia/DAG - Cx. P. 38 39.100-000 - Diamantina - MG - cabralfranca@yahoo.com.br, enilson.barros.silva@gmail.com, julianomiari@gmail.com
⁴Universidade Federal de Viçosa/UFV - Departamento de Fitotecnia - Cx. P. 251 - 36.570-000 -Viçosa - MG - renan_lsm@hotmail.com
^{5,6,7}Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri/UFVJM - Departamento de Agronomia/DAG - Cx. P. 38 39.100-000 - Diamantina - MG - miguelmhrf@yahoo.com.br, moisesdalagoa@yahoo.com.br, ninhadtna13@hotmail.com
⁸Universidade Federal de Viçosa/UFV - Departamento de Biologia Vegetal - Cx. P. 251 - 36.570-000 -Viçosa - MG - lilian_reis@ymail.com
¹⁰Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais/EPAMIG/URESM - Campus UFLA - Cx. P. 176 - 37200-000 - Lavras - MG carvalho@epamig.ufla.br

Em Minas Gerais, a produção de mudas em sacolas plásticas representa grande parte do total de mudas de cafeeiro produzidas, por apresentar baixo custo inicial, em relação ao uso de tubetes, facilidade na obtenção do substrato e ser um sistema de produção amplamente difundido, em todas as regiões cafeeiras.

Entretanto, um dos grandes desafios enfrentados por pequenos viveiristas é o alto custo dos fertilizantes minerais. Os fertilizantes possuem grande importância na formação da muda, tendo sido objetivo de várias pesquisas, principalmente quanto à composição de substratos para a produção de mudas, o que representa um valor alto no custo de sua produção. Sabe-se, no entanto, que, um substrato indicado como ideal terá que satisfazer às exigências físicas, químicas e biológicas, contendo ainda quantidades suficientes de elementos essenciais (água, ar e nutrientes minerais) indispensáveis ao crescimento e desenvolvimento das plantas.

A produção de mudas saudáveis e bem desenvolvidas é um fator de extrema importância para qualquer cultura, principalmente para as perenes, como o cafeeiro. Quando esta etapa é bem conduzida, a performance da lavoura bem formada é distinguível visualmente e com menores custos. O sistema de produção de mudas adequado proporciona tanto o maior desenvolvimento das mudas no viveiro, como também, minimiza o stress operacional no transplante para condições de campo (MATIELLO et al., 2005).

Na busca de melhorar a eficiência dos fertilizantes no solo, alguns autores (GUPPY et al., 2005; JONES et al., 2003; PAVINATO; ROSOLEM, 2008) demonstraram que os ácidos orgânicos de baixa massa molecular como o cítrico, apresentam grande eficiência, quando aplicados no solo ou no substrato recomendado pela Comissão de Fertilidade de Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG (1999). Por possuírem grupos carboxílicos, os ácidos orgânicos têm facilidade de se dissociar em ampla faixa de pH do solo, fazendo com que se formem complexos solúveis com cátions metálicos (JEMO et al., 2006; OBURGER; DAVID; WALTER, 2011; PALOMO; CLAASSEN; JONES, 2006; RAGHOTHAMA; KARTHIKEYAN, 2005; SCERVINO et al., 2010) e, estes podem favorecer a competição entre P e ácidos orgânicos, como o cítrico por exemplo, reduzindo a quantidade de P ligado às cargas do solo, disponibilizando maior quantidade para as plantas (DECHASSA; SCHENK, 2004; WEI; CHEN; XU, 2010). Lembrando que, Gonçalves

et al. (2009) observaram que o aumento da disponibilidade de P, para as mudas de café, promoveu aumento da produção de matéria seca.

De modo geral, há uma redução na complexação do fósforo nas cargas do solo com o aumento das doses de ácido cítrico, e que este promove uma maior concentração de fosfato na solução do solo (ANDRADE et al., 2003). Devido às características apresentadas pelo ácido cítrico, a sua aplicação no solo pode melhorar o aproveitamento do P pelas culturas, sendo uma alternativa para a redução das quantidades aplicadas desse nutriente e para diminuir o custo de produção (SILVA et al., 2002).

Para a produção de mudas com baixo custo, a utilização do ácido cítrico é uma boa alternativa, pois, pode aumentar a eficiência de utilização dos fertilizantes, diminuindo a quantidade padrão utilizada e garantindo o adequado desenvolvimento das mudas de cafeeiro, com um mínimo de aplicação de fósforo no substrato. Objetivou-se, no trabalho, avaliar o crescimento, a qualidade e o estado nutricional de mudas de café (*Coffea arabica* L.), submetidas às diferentes doses de ácido cítrico e fósforo no substrato.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em ambiente protegido, com condições controladas de temperatura e umidade, sendo o local coberto com uma tela de polipropileno com 50% à sombra (TATAGIBA; PEZZOPANE; REIS, 2010), e irrigados com microaspersores, fluxo de 50 L h⁻¹. Utilizou-se a cultivar Catuaí Vermelho IAC 99, com todos os substratos compostos pela mesma mistura de 300 l de esterco de curral curtido; 0,5 kg de cloreto de potássio e 700 l de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2006), para cada metro cúbico de substrato, conforme recomendado pela CFSEMG (1999). Utilizou-se o esterco bovino de curral, pois, ele é o mais adequado para a produção de mudas de café (ALMEIDA et al., 2011). Para composição dos tratamentos com adição de P, utilizou-se superfosfato simples, como fonte deste nutriente (cuja fórmula comercial continha: 18% P₂O₅ solúvel em CNA+ água, 20% Ca e 12% S). Os resultados das análises físicas e químicas do solo utilizado encontram-se na Tabela 1 (Análises realizadas no Laboratório de Análises Físicas e Químicas de Solo do Departamento de Agronomia da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri-UFVJM, Diamantina).

TABELA 1 - Atributos físicos e propriedades químicas do Latossolo Vermelho distrófico, utilizado no substrato do experimento¹.

Análise granulométrica (g kg ⁻¹)											
Areia	Silte		Argila			Classe textural					
380	60		560			Argilosa					
Análise química											
pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H + Al	SB	t	T	m	V
H ₂ O	mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³%.....
6,1	1,3	8	0,1	0,1	0,3	4,6	0,3	0,6	4,9	50	6
P-rem	Zn	Fe	Mn	Cu		B	MO				
mg L ⁻¹	mg dm ⁻³					dag kg ⁻¹				
7,3	0,2	30,5	0,7	0,1		0,1	1,9				

¹pH água: Relação solo-água 1:2,5. P, K, Zn, Cu, Fe e Mn: Extrator Mehlich-1. Ca, Mg e Al: Extrator KCl 1 mol L⁻¹, B: Água quente. T: Capacidade de troca de cátions a pH 7,0. m: Saturação de alumínio. V: Saturação por bases. MO – Teor de matéria orgânica determinado pelo método da oxidação do carbono por dicromato de potássio, em meio ácido multiplicado por 1,724.

Utilizou-se esquema fatorial (4x4), sendo quatro doses de ácido cítrico (0,0; 0,5; 1,0 e 2,0 mg dm⁻³) e quatro doses de fósforo (0, 450, 900 e 1800 mg P₂O₅ dm⁻³) no substrato da muda, equivalente a 0, 1/2x, 1x, 2x, segundo a recomendação da CFSEMG (1999), para aplicação do nutriente na formação de mudas de cafeeiro. O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados com cinco repetições, sendo as parcelas constituídas por uma muda de cafeeiro (saquinho de polietileno 11 x 22 cm com 0,7 dm³ de volume).

Aos 70 dias após a semeadura (DAS), quando as mudas apresentavam as folhas cotiledonares, aplicaram-se 25 ml da solução de ácido cítrico, em cada unidade experimental.

A avaliação do crescimento e da qualidade ocorreu aos 180 DAS, quando as mudas continham quatro a cinco pares de folhas definitivas. Avaliaram-se a altura da parte aérea (cm) e o diâmetro do coleto (mm), a área foliar (cm²), sendo esta realizada de acordo com o método não destrutivo, proposto por Antunes et al. (2008). Posteriormente, as mudas foram cortadas rente ao solo, divididas em folhas, caules e raízes determinando-se a massa seca (g), massa seca total (g) e a partir da coleta destes, foi determinada a qualidade das mudas, em que calculou-se o Índice de Qualidade de Dickson (IQD), obtido pela fórmula $IQD = [massa\ seca\ total / (RAD + RPAR)]$, onde RAD = relação da altura da parte aérea

(cm) com o diâmetro do coleto (mm) e RPAR= relação da massa seca da parte aérea (g) com a massa seca de raízes (g) (MARANA et al., 2008). A determinação analítica dos teores de nutrientes foliares foi de acordo com Malavolta (2006). Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e regressão, com escolha dos modelos em função da sua significância, do fenômeno biológico e do coeficiente de determinação. A superfície de resposta foi estimada substituindo-se a dose de P e ácido cítrico para máximo valor das variáveis: massa seca total, área foliar, índice de qualidade de Dickson, e dos teores foliares de Ca, N, P, S, B, Cu, Fe e Zn das mudas. Assim, cada equação relaciona estes dois fatores (P e ácido cítrico) numa mesma resposta para cada variável. Utilizou-se o programa SAS para Windows, pelos procedimentos PROG GLM e REG para realização das análises estatísticas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as variáveis mensuradas aos 180 DAS, massa seca total, área foliar e índice de qualidade de Dickson (IQD) observou-se efeito significativo dos fatores testados (fósforo e ácido cítrico), sendo as mesmas estudadas e representadas em forma de superfície de resposta.

O aumento das doses de ácido cítrico proporcionou o acúmulo de massa seca total (MST) e área foliar (AF), sobre as diferentes

doses de fósforo adicionadas ao substrato, como se observa nas Figuras 1 e 2, respectivamente. E, as combinações estimadas para proporcionar máxima massa seca total (3,15g) foram 1800 mg dm⁻³ de P₂O₅ e 0,9 mg dm⁻³ de AC (Figura 1) e, a máxima de área foliar (200,7 cm²) foram 1260 mg dm⁻³ de P₂O₅ e 1,0 mg dm⁻³ de AC (Figura 2). Guimarães (1994), trabalhando com mesma

cultivar aplicando-se 900 mg P₂O₅ dm³ e sem adição de ácido cítrico obteve valor semelhante ao encontrado, com média de MST de 1,42 g. Com a adição do ácido cítrico, nota-se um maior acúmulo na massa seca alcançando uma “dose ótima” aplicada, corroborando com Jayarama, Shankar e Violet (1998) que encontraram a melhor dose de 0,75 mg dm⁻³, quando trabalharam com crescimento de mudas.

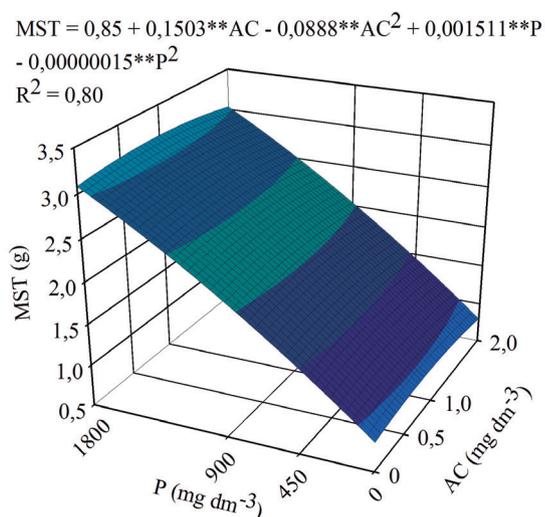


FIGURA 1 - Massa seca total de mudas de café, em função de doses de ácido cítrico (AC) e de fósforo (P) em substratos, aos 180 dias após semeadura (DAS) (**significativa a 1% pelo teste de t).

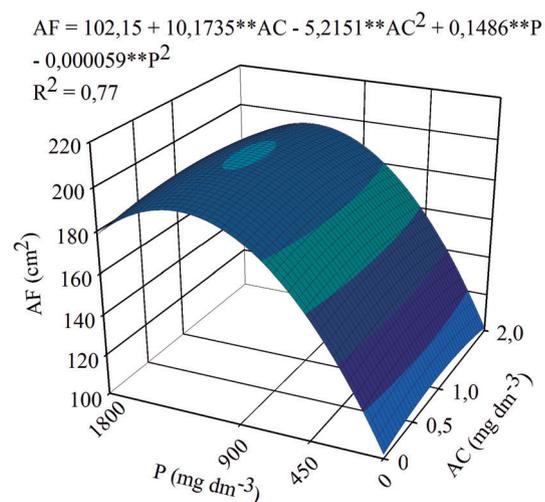


FIGURA 2 - Área foliar acumulada de mudas de café, em função de doses de ácido cítrico (AC) e de fósforo (P) em substratos, aos 180 dias após semeadura (DAS) (**significativa a 1% pelo teste de t).

Observou-se, por meio dos coeficientes angulares das equações das superfícies de resposta que, no Índice de Qualidade de Dickson (IQD) do café, houve maior influência do P que do AC na resposta das plantas às combinações de doses de P e AC nos substratos dos solos estudados (Figura 3). O ponto de máximo valor do IQD (0,24) foi obtido com as doses de 1404,0 mg P₂O₅ dm⁻³ e 1,0 mg dm⁻³ de AC, e, conseqüentemente, alcançando o valor mínimo de qualidade de mudas de 0,20, conforme recomendação de Marana et al. (2008), o que apresenta mudas de qualidade superior. Inclusive, os valores ótimos para P são muito próximos aos 1308,0 mg P₂O₅ dm⁻³, encontrados por Santinato et al. (2014).

Oburger, David e Walter (2011) destacaram o potencial do AC para melhorar a aquisição de P por plantas, em solos com potencial para fixação de P e constataram que, para alguns solos com capacidade de fixação extremamente alta, uma concentração maior de ânions citrato teria sido necessário para atingir considerável aumento no P solúvel no solo e, conseqüente crescimento das plantas.

Observou-se também que, quando aplicado em um substrato com o dobro de fósforo padrão, segundo recomendação de Guimarães e Reis (2010) (1800 mg P₂O₅ dm⁻³), as doses crescentes de ácido cítrico proporcionaram um comportamento quadrático com posterior redução do IQD (Figura 3).

Evidencia-se que, dentre os vários fatores que afetam a qualidade de mudas, pode-se citar a adubação do substrato (CRUZ; PAIVA; GUERRERO, 2006). Marana et al. (2008) demonstraram que o princípio de avaliação pelo maior aumento do crescimento ou seja, quanto maior a muda de café melhor, não é correto e não deve ser generalizado, pois, podem ocorrer distorções provenientes do excesso de nitrogênio. Usando-se o IQD (Índice de Qualidade de Dickson), obtiveram melhor resposta à qualidade das mudas de café, sendo o índice de 0,21 em suas mudas mais vigorosas, por isto, é de fundamental importância, avaliar mudas submetidas à aplicação de ácido cítrico e fósforo em doses crescentes.

Quanto aos teores foliares das mudas de café aos 180 DAS, houve efeito significativo dos fatores testados (fósforo e ácido cítrico), sendo estudadas as doses de fósforo e de ácido cítrico nos nutrientes como: Ca, N, P, S, B, Cu, Fe e Zn. Para os demais nutrientes, como Mg, K e Mn, houve efeito significativo somente das doses de fósforo.

As doses de AC e P influenciaram significativamente nos teores de Ca e N nas folhas de café, sendo que as combinações estimadas para proporcionar o máximo teor de Ca (10,3 g kg⁻¹) foram 1240 mg dm⁻³ de P₂O₅ e 1,0 mg dm⁻³ de AC (Figura 4-a) e, a máxima de N nas folhas, (28,2 g kg⁻¹) foram 0,0 mg dm⁻³ de P₂O₅ e 2,0 mg dm⁻³ de AC (Figura 4-b).

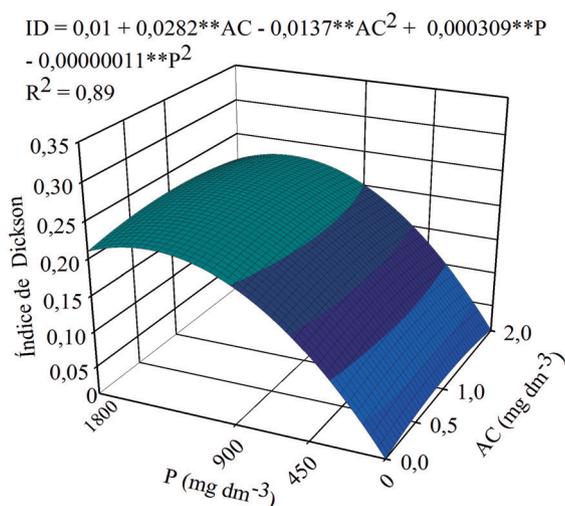


FIGURA 3 - Índice de qualidade de Dickson em mudas de café em função de doses de ácido cítrico (AC) e de fósforo (P) em substratos, aos 180 dias após a semeadura (DAS) (** significativo a 1%, pelo teste de t).

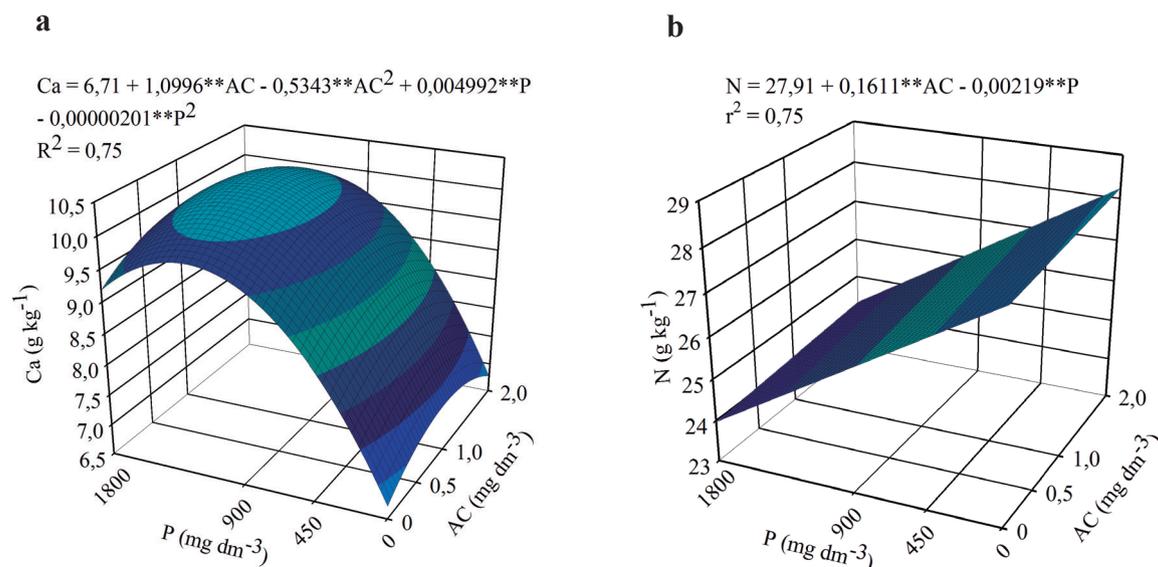


FIGURA 4 - Teores de cálcio (Ca) (a) e nitrogênio (N) (b) em folhas de café em função de doses de ácido cítrico (AC) e de fósforo (P) em substratos, aos 180 dias após a semeadura (DAS) (** significativo a 1%, pelo teste de t).

Focando uma comparação de resultados, os teores de Ca foram ligeiramente superiores aos limites de máximo da faixa adequada, proposta por Gontijo (2004) de 25,7-27,8 g kg⁻¹ e, podem ser atribuídos às adubações diferenciadas de fósforo no substrato e, por sua vez, a fonte utilizada (superfosfato simples) possui cálcio na formulação (Figura 4-a). A posterior redução no teor de Ca foliar pode ser explicada por baixa solubilização de precipitados químicos (P-Ca) após 180 dias da semeadura, e que, o ácido cítrico promove, por processos de quelação e troca de ligantes (FOX; COMERFORD, 1990 citados por SILVA et al., 2002). Este elemento, em alta concentração na solução do solo, promove uma inibição competitiva com o cálcio, diminuindo a absorção pela planta (GUIMARÃES; REIS, 2010).

Nos teores de N na massa seca das folhas até a concentração de 450 mg de P₂O₅ dm⁻³ juntamente com a aplicação do ácido orgânico proporcionou um modelo linear positivo nos teores foliares, com ponto de, no máximo 2,0 mg dm⁻³ com 27,25 g kg⁻¹, onde as mudas ainda estavam dentro da faixa crítica de teor de N, determinada por Gontijo (2004) (Figura 4-b).

As doses de ácido cítrico influenciaram os teores de P na massa seca das folhas, onde destaca-se o aumento linear do nutriente nas mudas em que não se colocou fósforo no substrato (Figura 5). Nota-se ainda que, para cada miligrama aplicada de ácido cítrico, houve um aumento de 0,0812 g kg⁻¹ de P na massa seca das folhas, sendo que a dose de 0,5 mg dm⁻³ do ácido garantiu

a adequação dos teores na faixa crítica de P em folhas de cafeeiro de 3,3 – 3,8 g kg⁻¹, determinada por Gontijo (2004).

Entretanto, mesmo obtendo uma alta resposta em teor foliar de P, as mudas que não receberam fósforo na mistura do substrato demonstraram ser inferiores em massa seca total (Figura 1) e área foliar acumulada (Figura 2). Este fato pode ser decorrente do desenvolvimento irregular na parte aérea e sistema radicular em substratos com deficiência de fósforo (MELO et al., 2006). Infere-se que, ou o ácido cítrico isoladamente não proporcionou resposta equivalente ao tratamento com fósforo mineral, e/ou o cálcio presente na fonte de adubo (superfosfato simples) tenha promovido, parcialmente, o desenvolvimento das mudas. Pois, com metade da dose da recomendação da CFSEMG (1999) para P em substratos (450 mg de P₂O₅ dm⁻³), observou-se que o teor atingiu a faixa crítica de P (GONTIJO, 2004) (Figura 5). Lembrando que estes valores estão próximos ao ponto de máximo valor do índice de qualidade de Dieckson (0,24), pois, o mesmo foi obtido com as doses de 1404,0 mg P₂O₅ dm⁻³ e 1,0 mg dm⁻³ de AC, e, conseqüentemente, alcançando o valor mínimo de qualidade de mudas de 0,20.

As doses de ácido cítrico influenciaram, de forma positiva, no teor de S na massa seca das folhas onde, no substrato com a dose de P, segundo a recomendação da CFSEMG (1999) (900 mg de P₂O₅ dm⁻³), foi verificada a menor variação nos teores do nutriente (Figura 6).

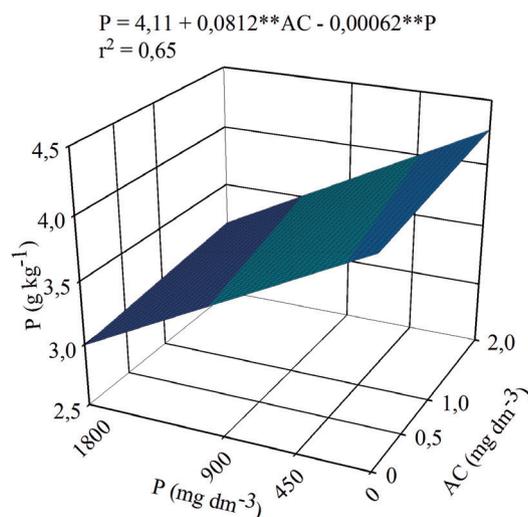


FIGURA 5 - Teores de fósforo (P) em folhas de café em função de doses de ácido cítrico (AC) e de fósforo (P) em substratos, aos 180 dias após a semeadura (DAS) (** significativo a 1%, pelo teste de t).

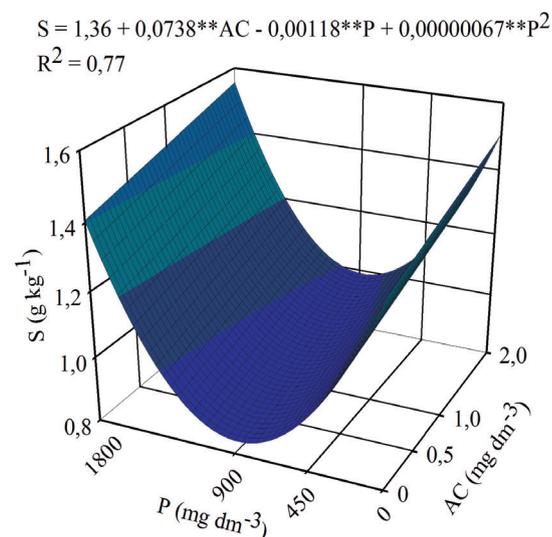


FIGURA 6 - Teores de enxofre (S) em folhas de café em função de doses de ácido cítrico (AC) e de fósforo (P) em substratos, aos 180 dias após a semeadura (DAS) (** significativo a 1%, pelo teste de t).

E, o P no substrato proporcionou uma reposta quadrática negativa com o aumento do AC, no teor de S nas folhas. No substrato com 0 mg de P_2O_5 dm^{-3} , verificou-se um crescimento quadrático no teor de S nas folhas, atingindo o ponto de máximo na dose de 1,39 mg dm^{-3} de ácido cítrico, com valor de 1,45 g kg^{-1} . Valor este abaixo da faixa crítica (GONTIJO, 2004). Demonstrando assim, o efeito antagônico entre o AC e o P, para o teor de S nas folhas. Estudos da dinâmica da interação do S e do P demonstraram

que há uma interação fortemente positiva entre estes nutrientes, e que a utilização de altos teores de P e/ou, de N podem provocar deficiência de S, quando o teor no solo é baixo, promovendo um desbalanço entre ânions (GUIMARÃES; REIS, 2010). Além disso, o grau de afinidade dos ânions com o citrato (ácido orgânico de baixa massa molecular) e o fosfato, é bem maior do que a do sulfato, por meio de bloqueio dos sítios de adsorção (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007), assim, este último sendo possivelmente lixiviado pelas regas

diárias das mudas, que conseqüentemente será menos absorvido pelas plantas.

As doses de ácido cítrico influenciaram os teores de B e de Cu na massa das folhas, submetidas a diferentes doses de fósforo no substrato, de forma diferenciada em cada dose (Figura 7-a e 7-b). Nos teores de B, somente o substrato com dose 1800 mg P₂O₅ dm⁻³ submetido à aplicação do AC, que atingiu a faixa crítica de 39,7-39,9 mg kg⁻¹, determinada por Gontijo et al. (2007), para este nutriente. A equação com os dois fatores demonstra que, à medida que o AC proporcionou incrementos lineares positivos (2,54 de mg kg⁻¹ de B para unidade de AC adicionado), o P proporcionou um comportamento quadrático negativo, ou seja, houve um efeito competitivo aniônico. Todavia, o teor um pouco abaixo da faixa crítica é comum, pois o B é um nutriente facilmente lixiviado (ABREU; LOPES; SANTOS, 2007), principalmente pelas regas diárias das mudas.

Doses de ácido cítrico influenciaram o teor de Cu na massa seca das folhas sobre as diferentes doses de fósforo no substrato, entretanto, o ácido cítrico teve maior eficiência com o acréscimo das doses em que não se aplicou fósforo no substrato (Figura 7-b). Observa-se ainda que, este tratamento seguiu modelo quadrático crescente, atingindo o ponto de máximo de 24,5 mg kg⁻¹ com a dose 1,5 mg dm⁻³ de ácido cítrico, acrescentando 56,9% em teor deste nutriente nas folhas e, com uma posterior redução na dose de 2,0 mg dm⁻³.

Esse comportamento é explicado devido à solubilização dos macro e micronutrientes no solo, em especial o Cu, promovida pelos ácidos orgânicos, como o cítrico, que disponibiliza nutrientes para a absorção das plantas, liberando tanto cátions como ânions, através de reações solubilizadoras de precipitados orgânicos (PEGORARO et al., 2005). No substrato com 450 mg de P₂O₅ dm⁻³, a aplicação de ácido cítrico proporcionou efeito quadrático negativo, com uma redução de 16,47 mg kg⁻¹ para 12,24 mg kg⁻¹ de Cu, na dose de 2,0 mg dm⁻³. Todos os tratamentos com ácido cítrico e fósforo proporcionaram teores de Cu acima do que a faixa crítica determina, para mudas de café com 180 dias, determinada por Gontijo et al. (2007), embora o AC possa ser biodegradado rapidamente, como fonte de C orgânico, para a microbiota do solo.

O AC influenciou, de forma variada, os teores de Fe (Figura 8-a) e de Zn (Figura 8-b). Em todas as doses de P no substrato, o teor de Fe na massa seca das folhas reagiu de forma linear crescente, com aumento de 10,6 mg kg⁻¹ a cada miligrama de ácido cítrico aplicado (Figura 8-a). Aumento este devido à complexação metálica exercida pelo ácido cítrico, que, atua descomplexando os sítios do ortofosfato com os oxi-hidróxidos de Fe, liberando o fosfato em solução (SILVA et al., 2002) e, liberando também na solução Fe complexado com o ácido cítrico (GUPPY et al., 2005), podendo este ser absorvido pelas plantas.

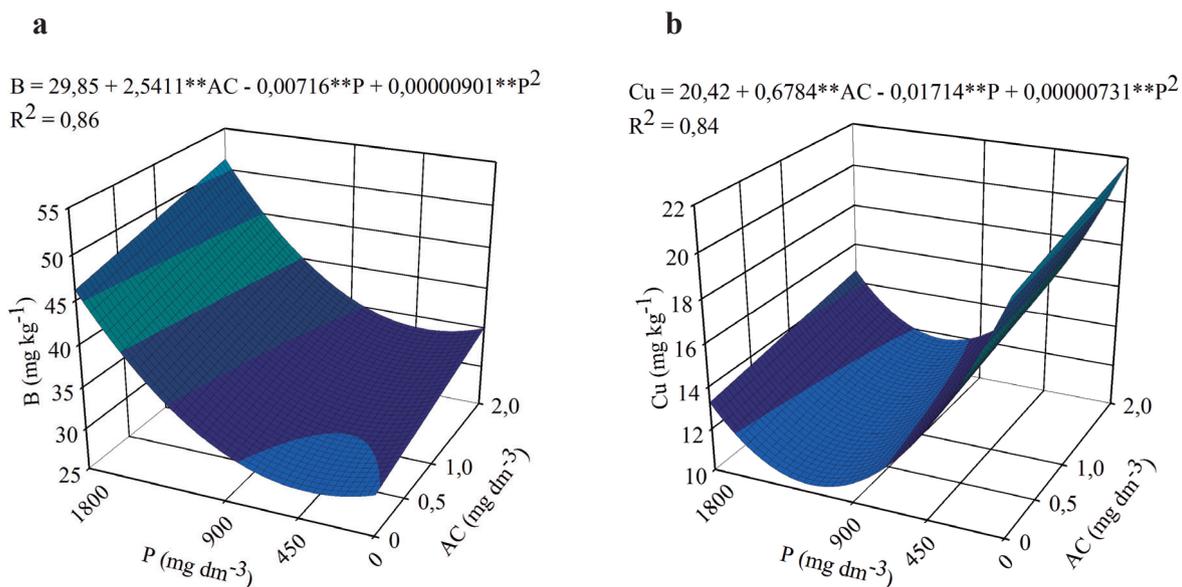


FIGURA 7 - Teores de boro (B) (a) e cobre (Cu) (b) em folhas de café em função de doses de ácido cítrico (AC) e de fósforo (P) em substratos, aos 180 dias após a semeadura (DAS) (** significativo a 1%, pelo teste de t).

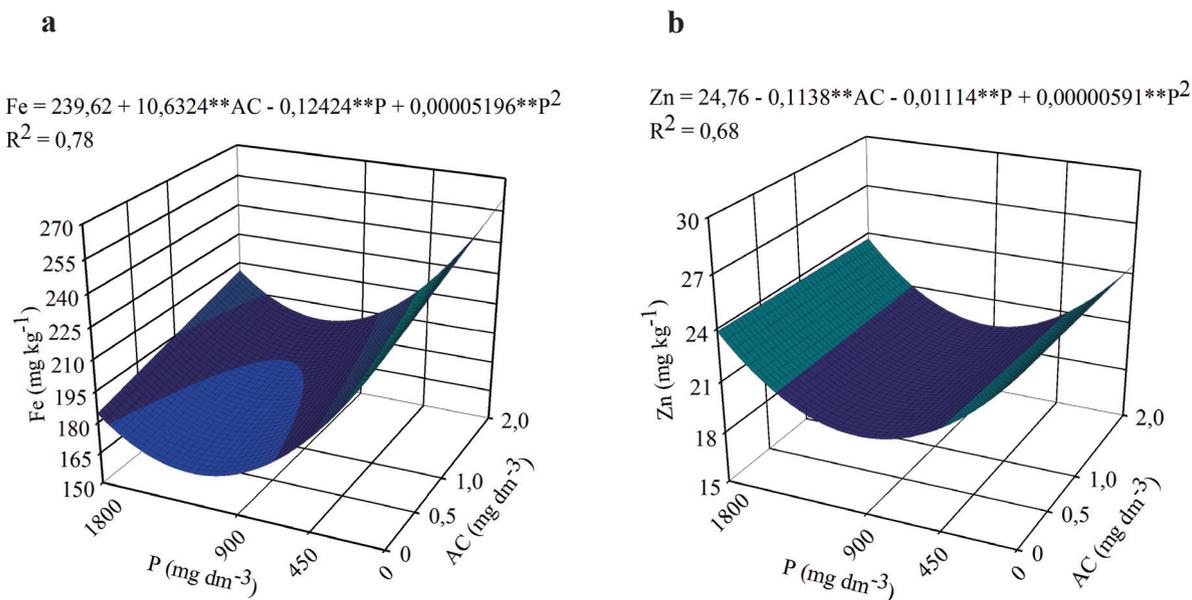


FIGURA 8 - Teores de ferro (Fe) (a) e zinco (Zn) (b) em folhas de café em função de doses de ácido cítrico (AC) e de fósforo (P) em substratos, aos 180 dias após a semeadura (DAS) (** significativo a 1%, pelo teste de t).

Por outro lado, com o aumento das doses de P no substrato, em todas as aplicações de ácido cítrico, observou-se modelo quadrático negativo, com ponto de mínimo teor de $165,2 \text{ mg kg}^{-1}$ de Fe, com a dose de $1200,0 \text{ mg de P}_2\text{O}_5 \text{ dm}^{-3}$, valor este abaixo da faixa crítica para o elemento ($209\text{-}214 \text{ mg kg}^{-1}$ de Fe) em mudas, determinado por Gontijo et al. (2007), podendo ser explicado pelo efeito diluição, devido à planta crescer rapidamente com a presença de P no substrato.

Observa-se que a aplicação de ácido cítrico influenciou de forma linear negativa o teor de Zn nas mudas, em todas as doses de P, aplicados nos substratos (a cada unidade de AC aplicada, reduziu $0,11 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn, nas folhas) e, as doses de P influenciaram de forma quadrática negativa em todas as doses de AC; assim, na ilustração da superfície de resposta (Figura 8-b), o valor mínimo de Zn nas folhas ($19,3 \text{ mg kg}^{-1}$) foi observado quando se aplicou $2,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de AC e $940,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de P. Sendo assim, com a maior dose de P no substrato, se pressupõe que houve uma formação de fosfato de Zn e assim a planta absorveu mais este nutriente. Corroborando, Jayarama, Shankar e Violet (1998) notaram que o teor foliar de Zn em mudas de café se elevou, com o aumento de doses de ácido cítrico.

Tornam-se necessários estudos mais profundos sobre a ação dos ácidos orgânicos de

baixo peso molecular, em especial o ácido cítrico, sobre a disponibilidade de nutrientes no solo e/ou em substratos de mudas. Inclusive, para futuros trabalhos, é recomendável avaliar-se o tempo de biodegradação do ácido cítrico aplicado no solo associadamente com: adição de matéria orgânica no substrato, relacionando com curvas de retenção de água (CRA).

4 CONCLUSÕES

A aplicação de doses de $1404,0 \text{ mg P}_2\text{O}_5 \text{ dm}^{-3}$ e $1,0 \text{ mg dm}^{-3}$ de ácido cítrico no substrato influencia positivamente na qualidade das mudas.

O ácido cítrico promove aumento nos teores foliares de Ca, N, P, S, Cu, Fe e Zn com doses “ótimas”, variando de $0,8$ a $2,0 \text{ mg dm}^{-3}$ em mudas implantadas em substrato sem fósforo adicionado, entretanto, isso não é efetivo para o desenvolvimento com qualidade das mesmas até o ponto de plantio no campo.

5 AGRADECIMENTOS

À FAPEMIG (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais), pelo apoio financeiro e provisão de recursos, bem como à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela bolsa de pesquisa cedida ao primeiro autor.

6 REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A. de; LOPES, A. S.; SANTOS, G. C. G. XI-Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 645-736.
- ALMEIDA, S. L. S. et al. Adição de resíduos orgânicos ao substrato para produção de mudas de café em tubetes. **Revista Agroambiental**, Pouso Alegre, v. 3, n. 2, p. 9-13, 2011.
- ANDRADE, F. V. et al. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 1003-1011, nov./dez. 2003.
- ANTUNES, W. C. et al. Allometric models for non-destructive leaf area estimation in coffee (*Coffea arabica* and *Coffea canephora*). **Annals of Applied Biology**, Oxford, v. 153, n. 1, p. 33-40, 2008.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DE SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG, 1999. 320 p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café: segunda estimativa**, maio/2014. Brasília, 2014.
- CRUZ, C. A. F.; PAIVA, H. N.; GUERRERO, C. R. A. Efeito da adubação nitrogenada na produção de mudas de sete-casca (*Samaneaipinata* (Harms) Ducke). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 537-546, jul./ago. 2006.
- DECHASSA, N.; SCHENK, M. K. Exudation of organic anions by roots of cabbage carrot and potato as influenced by environmental factors and plant age. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Tharandt, v. 167, p. 623-629, 2004.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 2006. 306 p.
- GONÇALVES, S. M. et al. Faixas críticas de teores foliares de macronutrientes em mudas de café (*Coffea arabica* L.) produzidas em tubetes. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 3, p. 743-752, maio/jun. 2009.
- GONTIJO, R. A. N. **Faixas críticas de teores foliares de macro e micronutrientes em mudas de café (*Coffea arabica* L.)**. 2004. 84 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.
- GONTIJO, R. A. N. et al. Faixas críticas de teores foliares de micronutrientes em mudas de café (*Coffea arabica* L.). **Coffee Science**, Lavras, v. 2, n. 2, p. 135-141, jul./dez. 2007.
- GUIMARÃES, P. T. G.; REIS, T. H. P. Nutrição e adubação do café. In: REIS, P. R.; CUNHA, R. L. da (Ed.). **Café arábica do plantio à colheita**. Lavras: EPAMIG, 2010. p. 343-414.
- GUIMARÃES, R. J. **Análise do crescimento e da quantificação de nutrientes em mudas de café (*Coffea arabica* L.), durante seus estádios de desenvolvimento em substrato padrão**. 1994. 113 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1994.
- GUPPY, C. N. et al. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Crawley, v. 43, p. 189-202, 2005.
- JAYARAMA, V.; SHANKAR, B. N.; VIOLET, M. D. S. Citric acid as a potential phosphate solubiliser in coffee soils. **Indian Coffee**, Bangalore, v. 12, p. 13-15, 1998.
- JEMO, M. et al. Phosphorus benefits from grain-legume crops to subsequent maize grown on acid soils of southern Cameroon. **Plant and Soil**, The Hague, v. 284, n. 1/2, p. 385-397, 2006.
- JONES, D. L. et al. Organic acid behavior in soils: misconceptions and knowledge gaps. **Plant and Soil**, The Hague, v. 248, n. 1/2, p. 31-41, 2003.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 631 p.
- MARANA, J. P. et al. Índices de qualidade e crescimento de mudas de café produzidas em tubetes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 1, p. 39-45, 2008.
- MATIELLO, J. B. et al. **Cultura do café no Brasil: novo manual de recomendações**. Varginha: PROCAFÉ, 2005. 438 p.
- MELO, B. de et al. Substratos, fontes e doses de P₂O₅ na produção de mudas de café (*Coffea arabica* L.) em tubetes. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 19, n. 2, p. 35-44, 2006.

- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. VIII fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471-550.
- OBURGER, E.; DAVID, J. L.; WALTER, W. W. Phosphorus saturation and pH differentially regulate the efficiency of organic acid anion-mediated P solubilization mechanisms in soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 341, n. 1/2, p. 363-382, 2011.
- PALOMO, L.; CLAASSEN, N.; JONES, D. L. Differential mobilization of P in the maize rhizosphere by citric acid and potassium citrate. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 38, n. 4, p. 683-692, 2006.
- PAVINATO, P. S.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de nutrientes no solo: decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais: revisão de literatura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 911-920, 2008.
- PEGORARO, R. F. et al. Diffusive flux of cationic micronutrients in two Oxisols as affected by low molecular weight organic acids and cover crop residue. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Tharandt, v. 168, p. 334-341, 2005.
- RAGHOTHAMA, K. G.; KARTHIKEYAN, A. S. Phosphate acquisition. **Plant and Soil**, The Hague, v. 274, p. 37-49, 2005.
- SANTINATO, F. et al. Doses of phosphorus associated with nitrogen on development of coffee seedlings. **Coffee Science**, Lavras, v. 9, n. 3, p. 419-426, 2014.
- SCERVINO, J. M. et al. Soil fungal isolates produce different organic acid patterns involved in phosphate salts solubilization. **Biology and Fertility of Soils**, Oxford, v. 46, n. 7, p. 755-763, 2010.
- SILVA, F. A. M. et al. Determinação de ácidos orgânicos de baixo peso molecular na rizosfera de cafeeiro por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE). **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, p. 1391-1395, 2002. Edição especial.
- TATAGIBA, S. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; REIS, E. F. Crescimento vegetativo de mudas de café arábica (*Coffea arabica* L.) submetidas a diferentes níveis de sombreamento. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 3, p. 251-261, 2010.
- WEI, L.; CHEN, C.; XU, Z. Citric acid enhances the mobilization of organic phosphorus in subtropical and tropical forest soils. **Biology and Fertility of Soils**, Oxford, v. 46, n. 7, p. 765-769, 2010.