



VINÍCIUS TEIXEIRA LEMOS

**ÁCIDO CÍTRICO VIA SOLO E SEUS EFEITOS
NA NUTRIÇÃO DO CAFEIEIRO**

LAVRAS - MG

2015

VINÍCIUS TEIXEIRA LEMOS

**ÁCIDO CÍTRICO VIA SOLO E SEUS EFEITOS
NA NUTRIÇÃO DO CAFEIEIRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Gladyston Rodrigues Carvalho

LAVRAS - MG

2015

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Lemos, Vinícius Teixeira.

Ácido cítrico via solo e seus efeitos na nutrição do cafeeiro/
Vinícius Teixeira Lemos. – Lavras : UFLA, 2015.
90 p.

Tese (doutorado)–Universidade Federal de Lavras, 2015.
Orientador: Gladyston Rodrigues Carvalho.
Bibliografia.

1. Ácidos orgânicos. 2. *Coffea arabica*. 3. Condicionador de solo. 4. Fertilidade do solo. 5. Produção. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título

VINÍCIUS TEIXEIRA LEMOS

**ÁCIDO CÍTRICO VIA SOLO E SEUS EFEITOS
NA NUTRIÇÃO DO CAFEIEIRO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 06 de fevereiro de 2015.

Dr. Enílson de Barros Silva	UFVJM
Dr. Francisco Dias Nogueira	EPAMIG
Dr. César Elias Botelho	EPAMIG
Dr. Virgílio Anastácio da Silva	UFLA

Dr. Gladyston Rodrigues Carvalho
Orientador

LAVRAS – MG

2015

*“A Luz que ilumina o meu caminho e
me ajuda a seguir...
essa Luz, claro que é Jesus”*

OFEREÇO

*Aos meus pais, **Nilo** (in memoriam) e
Antonieta, que sempre lutaram e
acreditaram em mim.*

*Aos meus irmãos **Eliane**, **Fernando** e
Quinzinho, aos meus sobrinhos **Geisy**,
Mell e **Arthur**.*

*À minha namorada **Otaviana**,
com carinho e amor.*

DEDICO.

"No que diz respeito ao desempenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita e com Amor ou não faz."
(Ayrton Senna)

“Pesquisar é você procurar o que nunca perdeu, mas quer encontrar”.
(Dr. Antônio Alves “Tônico” Pereira)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo!

À Universidade Federal de Lavras e ao Departamento de Agricultura, pela oportunidade de participar do curso de Doutorado em Fitotecnia/Agronomia e pela contribuição à minha formação acadêmica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro com a Bolsa de Estudo.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais - EPAMIG, pelo apoio e estrutura disponibilizada para finalizar este experimento, ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café - CBP&C - CAFÉ, pelo financiamento dos projetos de pesquisa.

Ao Dr. Gladyston Rodrigues Carvalho, pelo exemplo a ser seguido, pela paciência, confiança, prontidão e dedicação em repassar seus conhecimentos e experiências que tanto contribuíram na minha formação profissional e pessoal.

Ao Prof. Dr. Enílson Barros Silva, pela amizade, orientação, confiança e apoio, durante toda a Graduação, Mestrado e hoje, participar, também, do meu Doutorado.

Ao Prof. Dr. André Cabral França, pela amizade, orientação inicial deste trabalho, confiança e pelos valiosos ensinamentos profissionais e pessoais.

Ao Dr. Francisco Dias Nogueira, Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães, Dr. César Elias Botelho, Dr. Virgílio Anastácio da Silva, Dr. Rubens José Guimarães, Dr. Antônio Nazareno Guimarães Mendes e Dr. Rodrigo Luz da Cunha pela amizade, os quais, sem dúvida, contribuíram em muito para o aperfeiçoamento do meu trabalho.

Ao professor Dr. Valter Carvalho de Andrade Júnior, pelo incentivo inicial, despertando em mim tamanho interesse pela pesquisa no início de minha graduação.

Aos funcionários da EPAMIG que me ajudaram bastante em todos os experimentos que conduzi, em especial, ao Dr. Marcelo Ribeiro Malta, Dula, Delano, Samuel e Valter pelo apoio.

Aos amigos que sempre torceram por mim, Alcinei, Bruno Antônio, Bruno Hércules, Carlos Pedrosa, Celso Oliveira, Edmarcos Andrade, Felipe Cabeção, Henrique Maluf, Paulo Barreto, Raoni Gwinner e Ueslei Moreira.

Aos amigos pós-graduandos da Epamig Alex, Allan, Arley, Diego Cardoso, Diego Martins, João Paulo, Ramiro, Rodrigo Elias, Rogner, Tesfahun e Thamiris.

Aos produtores rurais Sr. Eduardo Yamagushi da Fazenda Forquilha, em Diamantina e Bruno Antônio Franco da Fazenda Inhame, em Campos Altos, que disponibilizaram suas lavouras para condução destes experimentos.

À Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM), pela estrutura na condução inicial destes experimentos.

Aos membros do NECAF da UFVJM, Ademilson, Ana Flávia, Bruna, Edmilson, Felipe Paolinelli, Juliano, Lariane, Lílian, Marco Túlio, Miguel, Moisés, Nikolas, Pedro e Renan pelo auxílio na realização das análises durante a condução deste trabalho.

A todos os membros do NECAF da UFLA, em especial àqueles que me ajudaram a finalizar este trabalho: Felipe Lacerda, Paulo Martins, Ravani e Thiago.

Ao Zé Maurício, Edson, Agrimar (*in memoriam*), Sérgio Brasil e Alexandre que me deram todo o apoio no setor de cafeicultura da UFLA.

À dona Dora e ao Sr. Silvio que me acolheram como um filho em Lavras.

À senhorita Marli dos Santos Túlio pelo apoio, ajuda e amizade.

Aos colegas, amigos de curso e a todos que contribuíram para a realização deste trabalho-sonho.

RESUMO

O uso exógeno de ácidos orgânicos de baixa massa molecular vem sendo ultimamente muito testado na agricultura, entretanto, estudos para verificação do efeito destes ácidos, principalmente, o cítrico via solo por meio de análises nutricionais nas plantas e química do solo são de fundamental importância. Objetivou-se avaliar a produtividade, os atributos químicos do solo, o estado nutricional e as faixas de suficiência em cafeeiros (*Coffea arabica*), durante quatro safras submetidas à aplicação de ácido cítrico (AC) em duas regiões de Minas Gerais. Foram conduzidos dois experimentos de campo em fazendas particulares, sendo um em Argissolo Amarelo distrófico (PAd) em Diamantina e o outro em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) em Campos Altos. Usaram-se, em ambos os locais de cultivo, cafezais da espécie *Coffea arabica*, L. da cultivar Catuaí Vermelho IAC-99 com idades de quatro e seis anos, com uma planta por cova nos espaçamentos 4,0 x 0,80 m e 4,0 x 0,75 m, respectivamente. Utilizou-se do delineamento experimental de blocos casualizados com duas repetições dos tratamentos por bloco com quatro blocos. Os tratamentos foram compostos por quatro doses AC (0, 1, 2 e 4 kg ha⁻¹) em aplicação única via regador na projeção da copa das plantas, em dezembro de 2008, 2009, 2010 e 2011. Foram avaliados a produtividade de grãos de café beneficiados em quatro safras (2009 a 2012), em cada local de cultivo, os atributos químicos (pH, P total, P rem, K, Ca, Mg, H+Al, CTC a pH 7, V% e C.O.) e os teores foliares de macro e micronutrientes. E, determinadas as faixas de suficiência foliares para média de quatro safras do cafeeiro nos dois locais. Pelos resultados obtidos, conclui-se que o cafeeiro respondeu em produtividade de grãos à aplicação de doses crescentes de AC em ambos os locais de cultivo. As doses de AC para produtividade máxima e 90% da máxima foram 2,9 e 0,9 kg ha⁻¹ de AC, com ganhos de até 23,0% no PAd e, 2,1 e 0,3 kg ha⁻¹ com ganhos de até 8,5% no LVd. Pequenas doses de AC em solo PAd promove reequilíbrio das bases, não alteração do pH e saturação por bases, além de não alterar o carbono orgânico. Em LVd, o AC promove aumento linear do teor de fósforo remanescente, não alteração do pH e saturação por bases. As faixas de suficiência para o cafeeiro, correspondentes a 90-100% da produção máxima nas folhas sob aplicação de AC foram de: 0,16-0,22 dag kg⁻¹ para P; 3,04-3,00 dag kg⁻¹ para K; 1,32-1,26 dag kg⁻¹ para Ca; 0,15-0,14 dag kg⁻¹ para Mg; 0,31-0,27 dag kg⁻¹ para S; 63,55-58,23 mg kg⁻¹ para B (somente Diamantina); 35,01-43,97 mg kg⁻¹ para Cu (somente Diamantina); 95,55-94,47 mg kg⁻¹ para Fe; 81,31-86,59 mg kg⁻¹ para Mn (somente Diamantina); 23,67-28,16 mg kg⁻¹ para Zn.

Palavras-chave: Ácidos orgânicos. *Coffea arabica*. Condicionador de solo. Fertilidade do solo. Produção.

ABSTRACT

Exogenous use of low molecular weight organic acids has been very recently tested in agriculture. However, studies conducted to test the effect of these acids, especially citric acid, by means of nutritional analysis in plants and chemical attributes of soil, are of fundamental importance. The objective in this study was to evaluate productivity, chemical attributes of soil, nutritional status, and sufficiency range of nutrients in coffee (*Coffea arabica*), during four harvesting seasons, subjected to the application of citric acid (CA) in two regions of Minas Gerais (MG), Brazil. The experiments were conducted at private farms. One in Diamantina (MG), in Yellow Argisol dystrophic (YAd), and another in Campos Altos (MG), in Red Oxisol dystrophic (ROd). In both cultivation locations, we used *Coffea arabica*, cultivar Catuaí Vermelho IAC-99, with ages of four and six years, and one plant per pit in spacings of 4.0 x 0.80 m and 4.0 x 0.75, respectively. The experimental design used was of randomized blocks design, with four blocks and two replicates per block. The treatments were comprised of four doses of CA (0, 1, 2 and 4 kg ha⁻¹), in single application via watering can, under the projection of the plant shoot, in December of 2008, 2009, 2010 and 2011. We evaluated the productivity of processed coffee from four harvests (from 2009 to 2012), and the chemical attributes (pH, total P, P rem, K, Ca, Mg, H+Al, CEC at pH 7, V% and C.O.) and foliar contents of micro and micronutrients, at both cultivation locations. We also determined the foliar sufficiency ranges for the mean of four coffee harvests at both locations. With the results obtained, we concluded that the coffee plant responded in grain productivity to the application of increasing doses of citric acid at both locations. The doses of CA for maximum and 90% of maximum production were of 2.9 and 0.9 kg ha⁻¹, with gains of up to 23.0% in YAd and, productions of 2.0 and 0.3 kg ha⁻¹, with gains of up to 8.5% in ROd. Small doses of CA in YAd promoted base equilibrium, did not alter pH and base saturation, and no changes organic carbon. In ROd, CA promotes the linear increase in the content of rem P and does not alter pH and base saturation. The sufficiency ranges for the coffee plant, correspondent to 90-100% of the maximum leaf production under the application of CA, were of: 0.16-0.22 dag kg⁻¹ for P; 3.04-3.00 dag kg⁻¹ for K; 1.32-1.26 dag kg⁻¹ for Ca; 0.15-0.14 dag kg⁻¹ for Mg; 0.31-0.27 dag kg⁻¹ for S; 63.55-58.23 mg kg⁻¹ for B (only for Diamantina); 35.01-43.97 mg kg⁻¹ for Cu (only for Diamantina); 95.55-94.47 mg kg⁻¹ for Fe; 81.31-86.59 mg kg⁻¹ for Mn (only for Diamantina); 23.67-28.16 mg kg⁻¹ for Zn.

Keywords: Organic acids. *Coffea arabica*. Soil conditioner. Soil fertility. Productivity.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	
1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Cafeicultura e solos intemperizados	14
2.2	Ácidos orgânicos em solos intemperizados	15
2.3	Nutrição mineral e faixas críticas e de suficiência em cafeeiros	17
3	CONCLUSÃO	20
	REFERÊNCIAS	21
	SEGUNDA PARTE - ARTIGOS	24
	ARTIGO 1 Doses de ácido cítrico no cafeeiro em argissolo amarelo distrófico e latossolo vermelho distrófico	24
1	INTRODUÇÃO	26
2	MATERIAL E MÉTODOS	29
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
3.1	Produtividade de grãos de café	35
3.2	Atributos químicos médios dos solos de quatro safras	41
3.2.1	Argissolo Amarelo distrófico - Diamantina	41
3.2.2	Latossolo Vermelho distrófico - Campos Altos	48
4	CONCLUSÕES	57
	REFERÊNCIAS	58
	ARTIGO 2 Uso de ácido cítrico no cafeeiro: produtividade e faixas de suficiência de nutrientes nas folhas em duas regiões do estado de Minas Gerais	63
1	INTRODUÇÃO	65
2	MATERIAL E MÉTODOS	68
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
3.1	Produtividade de grãos de café beneficiados	71
3.1.1	Produtividade máxima, econômica e teores foliares em Diamantina	73
3.1.2	Produtividade máxima, econômica e teores foliares em Campos Altos	75
3.2	Faixas de suficiência de nutrientes pelo uso de ácido cítrico	79
4	CONCLUSÕES	85
	REFERÊNCIAS	87

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

A sobrevivência humana e de todos os seres vivos envolve os aspectos produtivos e os seus resultados no sucesso das lavouras que são dependentes de uma adaptação positiva em ambientes diferentes. É uma acomodação de coexistência saudável entre vários componentes bióticos e abióticos do solo, ocorrida sob disputas interativas de naturezas diferentes propiciadas para uma área delimitada no entorno superficial a raiz - “a rizosfera”. Deparam-se, neste ambiente, com respostas fenológicas das plantas, microbiota do solo, alterações rizosféricas, reações bioquímicas, biológicas para a busca de colheitas. A literatura sobre rizosfera é extensa e profunda, testemunhada, assim, por inúmeras revisões com títulos diferentes sem perder a coerência do texto. Exemplos: 1 -A rizosfera como um sítio de interações bioquímicas entre vários componentes, plantas e microorganismos; 2 - Tipos, quantidades e possíveis funções de compostos liberados na rizosfera intervêm pelo crescimento e desenvolvimento das plantas cultivadas no solo; 3 - A liberação de exsudatos radiculares afetados pelo “status” fisiológico das plantas. 4 - Efeito de exsudatos de raízes sobre a população microbiológica; 5 - Efeitos diretos e indiretos de substâncias húmicas sobre o crescimento de plantas.

A gestão de riscos das lavouras conduzidas em solos tropicais, altamente intemperizados, distróficos induz produtores rurais à busca de tecnologias que proporcionem maior lucratividade, mediante um plano de negócio que ofereça prevenção de riscos desencadeados abruptamente pelas forças da natureza e às mudanças climáticas, embora mais lentas, por vezes surpreendentes, que mostram desvios de comportamento das plantas em relação às “normais climatológicas”.

Os avanços do conhecimento científico, no âmbito da agricultura, no Brasil e no exterior, antecipam-se às legislaturas que disciplinam novas tecnologias. Não quer isto dizer que elas já estão obsoletas, mas, sim, deveriam ter abertura permitindo que inovações tecnológicas saudáveis ao meio ambiente mereçam suas inclusões nas “Informações Normativas (IN)” para que se divulguem as alterações, chamadas, também, de emendas inovadoras das melhores práticas agrícolas. Por exemplo, é oportuna a pergunta: aplicar fertilizante orgânico ou condicionador orgânico no solo seriam decisões conflitantes? Resposta: **Não**. Porém o que existe ou pode existir é uma diferença tecnológica de produtos a qual mostra opções fundamentais em pesquisas inovadoras cujos resultados induziram ao consumidor de insumos destinados ao solo e à produção vegetal, escolher com naturalidade uma solução benéfica ao solo e à planta. Além do mais, “todo fertilizante orgânico é condicionador do solo, embora o enunciado não seja recíproco”.

A sobrevivência e a produtividade das lavouras são dependentes estritamente da capacidade dos seres vivos a se adaptarem aos microclimas constituídos sinergicamente sob as interações reativas entre microorganismos do solo, rocha matriz, manejo antrópico num espaço de tempo suficiente para o desenvolvimento cíclico da cultura ou apenas de uma planta isolada. Os ácidos orgânicos de baixa massa molecular, apesar de sua biodegradação rápida (8-10) dias, na presença de enzimas (fosfatases ácidas), transformam fosfatos orgânicos (Po) em Pi (fosfato inorgânico) que é a forma mais utilizada para a nutrição fosfatada das plantas.

Como resultado da utilização do carbono orgânico integrado nas moléculas orgânicas, pelo processo de biodegradação, solos ou substratos de cultivo, assim como as próprias plantas se beneficiam mutuamente. Assim, modernamente, a política biotecnológica abre novos caminhos para baixar a relação custo/benefício, para todos os cultivos produtores de resíduos orgânicos

pelo beneficiamento, após a colheita, os quais deixam incômodos para a sociedade, mas, pelo contrário, passam a ser reutilizados como bens de consumo graças às inovações tecnológicas cuja reutilização quantitativa ocupa escalas que deixam de ser toneladas por hectare e passam a serem demandadas dentro de escalas volumétricas microL até miliL/m³ (na forma líquida) e/ou micrograma até miligrama/kg (na forma sólida), abaixando, significativamente, o custo da logística no segmento do transporte dos insumos agrícolas. O mais importante destas conquistas é que tudo isto acontece aumentando-se os índices da produtividade e da qualidade dos produtos agrícolas consumidos na alimentação humana e/ou dos animais nas formas de leite e carne.

Os objetivos desta pesquisa resumem-se em contribuir para um desenvolvimento inovador da agricultura e mais especificamente para demonstração de impacto de relações custo/benefício menor (quantitativamente) e qualitativamente mais saudável, ou seja, evolução socioeconômica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cafeicultura e solos intemperizados

A importância econômica da cafeicultura no Brasil é indiscutível, sendo o maior produtor e exportador mundial de café e a sustentação das atividades satélites agregadas a ela mundialmente. O Brasil produziu na safra 2013/2014, um montante aproximado de 45,34 milhões de sacas, sendo 32,30 milhões de café arábica. O estado de Minas Gerais contribui com, aproximadamente, 69% da produção brasileira de café arábica, fato que o torna o maior produtor nacional. Porém, a produtividade média brasileira ainda é baixa, de apenas 21,45 sacas ha⁻¹ de café beneficiado, considerando que o potencial produtivo das cultivares melhoradas é superior a 40 sacas ha⁻¹ de café beneficiado (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2015).

Dentre os principais motivos que contribuem para essa baixa produtividade média brasileira, destacam-se lavouras antigas e depauperadas, deficiências nutricionais, bienalidade de produção, oscilações nos preços internacionais do produto, estresses abióticos e bióticos, desconhecimento da geração tecnológica de produção já existente, mas, ainda, não assimiladas para substituir algumas práticas agrícolas já superadas, em função da experimentação e pesquisa e problemas no manejo da cultura como a adubação fosfatada inadequada (em solos com alta capacidade de imobilizar P-PO₄⁻).

As altas quantidades de adubação fosfatada são até então necessárias e ocorre, principalmente, nos solos de cerrado, pois são solos muito intemperizados, onde houve uma mudança gradual nas suas características, basicamente, no sentido de torná-los menos eletronegativos. A CTC (capacidade de troca catiônica) é reduzida e a adsorção aniônica aumenta, diminuindo a saturação por bases e aumentando gradualmente a retenção de ânions, como o

fosfato (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007). Estes solos são extremamente pobres em fósforo (P) disponível e, conseqüentemente, são necessárias aplicações de doses elevadas de fertilizantes por ocasião do plantio, mas são extraídas pelas plantas quantidades relativamente pequenas de P, indicando que grande parte dos fosfatos adicionados estaria indisponível para o cafeeiro em crescimento (MELO et al., 2005). Segundo alguns estudos como os de Jayarama, Shankar e Souza (1998), o seu aproveitamento pelas plantas é em média de apenas 10% do total adicionado no solo. Doses elevadas tornam-se um tanto quanto inviáveis tanto ao pequeno quanto ao grande cafeeiro ao qual a difusão da tecnologia de condicionamento do solo, a baixo custo, pela adição de ácidos orgânicos de baixa massa molecular ainda não chegou.

Assim, a adubação fosfatada assume papel importante e ao mesmo tempo limitante no sistema de produção de cafeeiros implantados em solos intemperizados. E, o seu monitoramento em relação às precipitações química e adsorção aniônica já podem ser controladas por soluções acidificantes orgânicas em baixas concentrações, mas de reatividade rápida, representando uma inovação na produção dos condicionadores do solo que, simultaneamente, podem figurar no grupo de fertilizantes orgânicos.

2.2 Ácidos orgânicos em solos intemperizados

Uma sugestão, para amenizar os problemas relacionados ao uso eficiente do fósforo, seria selecionar plantas adaptadas às adversidades de solos e clima com características naturais ou introduzidas biotecnologicamente (transgênicos) condicionadas à coexistência em solos com problemas nutricionais e de acidez. Pelo melhoramento genético, tais plantas seriam capazes de extrair, à semelhança das minerações, os nutrientes necessários e, ainda, liberar substâncias capazes de neutralizar os efeitos tóxicos do alumínio (JONES,

1998). É hora de proceder à busca de características que conferem adaptação de plantas a certas adversidades ambientais, ou seja, a fitorremediação de solos intemperizados pela exsudação de ácidos orgânicos que promove aumentos na produtividade dos genótipos portadores dessa qualidade, quando comparados àqueles que não apresentam essa característica (MENOSSO et al., 2001).

As raízes liberam muitos ácidos orgânicos (cítrico, málico, oxálico, butírico, acético, láctico, etc...), e a concentração desses compostos depende de fatores como a espécie cultivada e condições de estresse às quais estejam submetidas (JONES, 1998). Os ácidos orgânicos de baixo peso molecular ocorrem na maioria dos solos cultivados e são produtos secundários no metabolismo de compostos orgânicos de alta massa molecular, como carboidratos, lipídeos e peptídeos (polímeros) ou são produtos recém fotossintetizados, participantes do “Ciclo de Krebs”.

Tais ácidos possuem radicais carboxílicos (funcionais) que os tornam capazes de formar complexos orgânicos com Al, Fe, Ca e Mg (GUPPY et al., 2005; PEARSON, 1966). Na forma exógena, biotecnologicamente produzido e/ou endógena, liberado no solo, como, por exemplo, o ácido cítrico que reage com o Al, Fe e outros cátions que se encontram precipitados labilmente, formando o fosfato, descomplexando esses elementos, que até então se encontravam inativos no solo (SILVA; NOGUEIRA; GUIMARÃES, 2005). Lemos (2012), estudando o efeito do ácido cítrico anidro (p.a.), observou que a sua aplicação na formação de mudas de café em substrato sem fósforo mostrou aumento nos teores de P e Zn foliares.

Isso acontece em razão dos grupos carboxílicos presentes em ácidos orgânicos como o ácido cítrico, que se dissocia facilmente em ampla faixa de pH do solo, liberando seus prótons, promovendo, por hidrólise, a desintegração ou intemperismo dos minerais do solo. Os ânions orgânicos podem formar complexos solúveis com cátions metálicos (SPOSITO, 1989).

Segundo Silva et al. (2008), o efeito da dissolução de óxidos de Fe e Al pode favorecer a adsorção competitiva entre P e ácidos orgânicos, reduzindo a superfície de adsorção do fósforo no solo. Andrade et al. (2003) evidenciaram que, de modo geral, há uma redução na adsorção/precipitação de fosfato com o aumento das doses de ácidos orgânicos de baixo peso molecular, tricarbóxico, como o ácido cítrico e outros mono e dicarbóxicos.

2.3 Nutrição mineral e faixas críticas e de suficiência em cafeeiros

As análises químicas do solo e da planta auxiliam no diagnóstico do estado nutricional das culturas, porém apresentam limitações. A análise do solo caracteriza apenas a disponibilidade de nutrientes, ao passo que a análise de tecidos fornece indicações sobre o estado nutricional da planta (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

A aptidão das plantas em absorver e assimilar os nutrientes minerais reflete nos seus teores e em seu equilíbrio nutricional, sobre os quais informações úteis podem ser colhidas na interpretação da análise química de certos tecidos. Apesar de outros órgãos da planta poderem ser utilizados na realização da diagnose química, a folha, frequentemente, é mais usada, pois é o órgão da planta muito sensível às alterações metabólicas exibindo com clareza sintomas tanto de deficiências como de excesso das adubações ou outras implicações reveladoras de competição aniônica e incompatibilidade nutricional (CARVALHO et al., 2001).

Resultados de análises de tecidos podem ser interpretados, após comparações com padrões obtidos de populações de plantas altamente produtivas, da mesma espécie e variedade (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Desta forma, a análise química foliar é uma importante ferramenta para identificar e corrigir deficiências e desequilíbrios nutricionais na planta

(BALDOCK; SCHULTE, 1996; MELDAL-JOHNSEN; SUMMER, 1980), monitorando e avaliando a eficiência do programa de adubação de determinada cultura (MELDAL-JOHNSEN; SUMMER, 1980) e a fertilidade do solo (DARA; FIXEN; GELDERMAN, 1992). Esta metodologia utiliza a composição mineral da folha, para avaliar o estado nutricional das plantas e a fertilidade do solo (BATAGLIA; DENCHEN; SANTOS, 1992), em que a planta funciona como extrator químico. A utilização da análise química foliar como ferramenta baseia-se na premissa de existir uma correlação positiva entre o suprimento de nutrientes e suas concentrações na planta e que aumentos ou decréscimos nestas concentrações se relacionam com produções maiores ou menores (EVENHUIS; WAAR, 1980).

O nível crítico de um determinado nutriente na planta é definido como o valor da concentração que separa a zona de deficiência da zona de suficiência. Acima dele, a probabilidade de haver aumento na produção pela adição do nutriente é baixa; abaixo, a taxa de crescimento, a produção e a qualidade diminuem significativamente (LAGATU; MAUME apud SMITH, 1988).

Entretanto, o teor do nutriente na folha pode sofrer alterações acentuadas pela influência de uma série de fatores, além de sua disponibilidade no solo, ou seja, clima, genótipo, disponibilidade de outros nutrientes, manejo, amostragem, características físicas e químicas do solo. A maior desvantagem deste método é justamente sua inabilidade de relacionar adequadamente a variação na concentração de nutrientes com base na matéria seca e idade da planta. Para superar essas e outras limitações, propõe-se o uso de faixas de suficiência, as quais melhoram a flexibilidade da diagnose (MARTINEZ; NEVES; ZANBINI, 2003). Para aumentar a flexibilidade da diagnose, sob condições variáveis de cultivo, considera-se uma faixa e não um único valor crítico (LUCENA, 1997; MARTINEZ; CARVALHO; SOUZA, 1999; MARTINEZ et al., 2000). Malavolta e Cruz (1971) definiram a concentração crítica como a faixa de

concentração de um elemento na folha abaixo da qual a produção é limitada e acima da qual a adubação não é econômica. Para o cafeeiro, o método das faixas críticas tem sido o mais empregado (MARTINEZ; NEVES; ZANBINI, 2003).

3 CONCLUSÃO

Diante do intemperismo em solo de cafeeiro e da ação positiva do ácido cítrico na liberação de nutrientes no mesmo, faz-se necessário conhecer os reais efeitos desse ácido orgânico em cafeeiros em produção, bem como conhecer a dose correta ou “ótima” para cada local de seu cultivo.

Desta forma, esta pesquisa tem como objetivo contribuir para um desenvolvimento inovador da agricultura, em especial na cafeicultura e, mais especificamente, demonstrar o impacto do uso de um condicionador de solo, que visa solubilizar nutrientes e, também, equilibrá-los no solo. Ou seja, busca-se ter um maior aporte de nutrientes para as plantas e um consequente equilíbrio nutricional, objetivando uma maior produtividade de grãos de café.

Com o intuito de avaliar a produtividade, os atributos químicos do solo, estado nutricional e faixas de suficiência do cafeeiro (*Coffea arabica* L.), cultivados em duas regiões e solos distintos, depois da aplicação de ácido cítrico via solo, durante quatro anos, realizou-se este trabalho.

REFERÊNCIAS

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.

BALDOCK, J. O.; SCHULTE, E. E. Plant analysis with standardized scores combines DRIS and sufficiency range approaches for corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, n. 3, p. 448-456, May/June 1996.

BATAGLIA, O. C.; DENCHEN, A. R.; SANTOS, W. R. Diagnose e análise de plantas. In REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., 1992, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBCS, 1992. p. 369-404.

CARVALHO, J. G. de et al. **Diagnose da fertilidade do solo e do estado nutricional de plantas**. Lavras: Editora da UFLA, 2001. 95 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café: primeira estimativa**. Brasília: Conab, 2015. 41 p.

DARA, S. T.; FIXEN, P. E.; GELDERMAN, R. H. Sufficiency level and diagnosis and recommendation integrated system approaches for evaluating the nitrogen status of the corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, n. 6, p. 1006-1010, 1992.

EVENHUIS, B.; WAAR, P. W. Principles and practices in plant analysis. In: FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Soils**. Rome: FAO, 1980. p. 152-163. (FAO. Bulletin, 38/1).

GUPPY, C. N. et al. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 43, n. 2, p. 189-202, Apr. 2005.

JAYARAMA, V.; SHANKAR, B. N.; SOUZA, V. M. D. Effect of citric acid on the solubility of phosphorus in coffee soils. **Indian Coffee**, Bangalore, v. 12, p. 13-15, 1998.

JONES, D. L. Organic acids in the rhizosphere: a critical review. **Plant and Soil**, The Hague, v. 205, n. 1, p.25-44, Aug. 1998.

LEMOS, V. T. **Aplicação do ácido cítrico no crescimento, estado nutricional e produtividade de café arábica**. 2012. 59 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2012.

LUCENA, J. J. Methods of diagnosis of mineral nutrition of plants: a critical review. **Acta Horticulturae**, Leuven, v. 448, p. 179-192, 1997.

MALAVOLTA, E.; CRUZ, V. F. A meaning for foliar diagnosis. In: SAMISH, R. M. (Ed.). **Recent advances in plant nutrition**: volume 1. New York: Gordon & Breach Science, 1971. 238 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa do Fosfato, 1997. 238 p.

MARTINEZ, H. E. P. et al. Avaliação da fertilidade do solo, padrões para diagnose foliar e potencial de resposta à adubação de lavouras cafeeiras de Minas Gerais. In: ZAMBOLIM, L. **Café: produtividade, qualidade e sustentabilidade**. Viçosa: Laércio Zambolim, 2000. p. 209-238.

MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; VENEGAS, V. H. A. (Ed.). **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5^a aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 143-168.

MARTINEZ, H. E. P.; NEVES, Y. P.; ZANBINI, V. A. Diagnóstico do estado nutricional do cafeeiro. In: ZAMBOLIM, L. **Produção integrada de café**. Viçosa: Ceres, 2003. p. 397-442.

MELDAL-JOHNSEN, A.; SUMNER, M. E. Foliar diagnosis norms for potatoes. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 2, n. 5, p. 569-576, Nov. 1980.

MELO, B. de et al. Fontes e doses de fósforo no desenvolvimento e produção do cafeeiro, em um solo originalmente sob vegetação de Cerrado de Patrocínio - MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 315-321, mar./abr. 2005.

MENOSSO, O. G. et al. Crescimento radicular e produção de ácidos orgânicos em cultivares de soja com diferentes tolerâncias ao alumínio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 11, p. 1339-1345, 2001.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. VIII fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 472-537.

PEARSON, R. G. Acids and bases. **Science**, London, v. 151, p. 172-177, 1966.

SILVA, E. B. et al. Influência da aplicação de fósforo e ácido cítrico no milho cultivado em Neossolo quartzarênico. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE E BIOLOGIA DO SOLO, 2008, Londrina. **Anais...** Londrina: SBCS, 2008. 1 CD ROM.

SILVA, E. B.; NOGUEIRA, F. D.; GUIMARÃES, P. T. G. Resposta do cafeeiro à aplicação de zinco e ácido cítrico no solo. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4., 2005, Londrina. **Anais...** Londrina: Embrapa Café, 2005 1 CD ROM.

SMITH, F. W. Interpretation of plant analysis: concepts and principles. In: REUTER, D. J.; ROBSON, J. B. (Ed.). **Plant analysis: an interpretation manual**. Melbourne: Inkata, 1988. p. 1-12.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University, 1989. 277 p.

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

**ARTIGO 1 Doses de ácido cítrico no cafeeiro em argissolo amarelo
distrófico e latossolo vermelho distrófico**

Redigido conforme as normas da NBR 6022 (ABNT, 2003).

DOSES DE ÁCIDO CÍTRICO NO CAFEIEIRO EM ARGISSOLO AMARELO distrófico E LATOSSOLO VERMELHO distrófico

RESUMO

A adoção de manejos que propiciem um incremento no teor de matéria orgânica, ou de uma fração desta (ácidos orgânicos, por exemplo), pode promover a redução da adsorção de fósforo (P), pela formação de complexos que bloqueiam os sítios de adsorção de P na superfície dos óxidos de ferro e de alumínio. Foram conduzidos dois experimentos de campo em fazendas particulares, sendo um em Argissolo Amarelo distrófico (PAd), em Diamantina (MG) e o outro em Latossolo Vermelho distrófico (LVd), em Campos Altos (MG) com o objetivo de avaliar a resposta do cafeeiro à aplicação de ácido cítrico na planta e no solo. Usaram-se, em ambos os locais de cultivo, cafezais da espécie *Coffea arabica*, L. da cultivar Catuaí Vermelho IAC-99 com idades de quatro e seis anos, plantio com uma planta por cova nos espaçamentos 4,0 x 0,80 m e 4,0 x 0,75 m, respectivamente. Utilizou-se do delineamento experimental de blocos casualizados com duas repetições dos tratamentos por bloco com quatro blocos. Os tratamentos foram compostos por quatro doses de ácido cítrico (AC) (0, 1, 2 e 4 kg ha⁻¹), em aplicação única via regador na projeção da copa das plantas, em dezembro de 2008, 2009, 2010 e 2011. Foi avaliada a produtividade de grãos de café beneficiados em quatro safras (2009 a 2012), em cada local de cultivo e os atributos químicos (pH, P total, P rem, K, Ca, Mg, H+Al, CTC a pH 7, V% e C.O.). O cafeeiro respondeu positivamente em produtividade às aplicações de doses crescentes de AC. As doses de AC para produtividade máxima foram 2,9 kg ha⁻¹ de AC, com ganhos de 23,0% no PAd e no LVd a dose média de 2,1 kg ha⁻¹ com ganhos de 8,5% em produtividade. Pequenas doses de AC em solo PAd promovem reequilíbrio das bases, sem alteração do pH e saturação por bases, além de não alterar o carbono orgânico. Em LVd, o AC promove aumento linear do teor de fósforo remanescente, não alteração do pH e saturação por bases.

Palavras-chave: Ácidos orgânicos. *Coffea arabica*. Condicionador de solo. Fertilidade do solo. Produtividade.

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura brasileira tem expandido para solos originalmente sob vegetação de Cerrado, que são extremamente pobres em fósforo (P) disponível. Nestas condições são necessárias doses elevadas de fertilizantes fosfatados por ocasião do plantio, mas somente são extraídas pelas plantas quantidades relativamente pequenas de P, indicando que grande parte dos fosfatos adicionados estaria indisponível para o cafeeiro (MELO et al., 2005). Inclusive, tais fontes de fosfatos (solúveis e insolúveis em água), usadas em cafeeiros (p.ex. superfosfato triplo e fosfato reativo), diminuem sua solubilidade ao longo do tempo (FREITAS et al., 2013). Dessa forma, a adubação fosfatada assume papel importante e ao mesmo tempo limitante no sistema de produção do café implantado em “solo de Cerrado” ou propriamente intemperizado.

Nos últimos anos, o preço do café tem oscilado muito, o que aumenta ainda mais a importância de se utilizar fontes fosfatadas da forma mais econômica e eficiente possível (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2015).

Entre as possíveis alternativas que podem minimizar a utilização de fertilizantes e/ou corrigir os desequilíbrios nutricionais no solo, destacam-se o uso de matéria orgânica e/ou de suas frações (GUIMARÃES; REIS, 2010) como: esterco de galinha, de curral e outros. Entretanto, estes autores demonstraram, também, que, quando os atributos químicos do solo estão equilibrados, o uso da matéria orgânica na implantação da lavoura cafeeira pode ser dispensada, pois esta tem alto custo logístico e algumas fontes de elevado custo.

É importante encontrar formas de aumentar a solubilidade de P no solo, em virtude da baixa eficiência da adubação fosfatada que limita a produção das culturas (no caso do cafeeiro, comprovado por DIAS, 2012) não somente pelo

baixo teor natural de P na solução do solo, mas também pela forte fixação do nutriente aplicado via adubação por meio dos fenômenos de adsorção e precipitação (ALVAREZ et al., 2002; BERTONI et al., 2003; RESENDE et al., 1999).

Os ácidos orgânicos de baixa massa molecular ocorrem na maioria dos solos cultivados e são intermediários no metabolismo de compostos orgânicos de alta massa molecular, como proteínas, carboidratos, lipídeos e peptídeos (FOX; COMERFORD, 1990). A quantidade de ácidos orgânicos (cítrico, málico, oxálico, butírico, acético, láctico, etc...) no solo, é de extrema importância, já que eles podem atuar de forma direta, favorecendo a solubilidade de elementos como fósforo (P), potássio (K) e zinco (Zn) por processos de quelação e troca de ligantes, ou indireta, pelo estímulo da atividade microbiana (JONES et al., 2003). Por possuírem grupos carboxílicos que têm facilidade para se dissociarem em ampla faixa de pH do solo, faz com que formem complexos solúveis com cátions metálicos (OBURGER; DAVID; WALTER, 2011; PALOMO; CLAASSEN; JONES, 2006; RAGHOTHAMA; KARTHIKEYAN, 2005; SCERVINO et al., 2010) e eles podem favorecer a competição entre P e ácidos orgânicos, reduzindo a quantidade de P ligado às cargas do solo e disponibilizando-lhes maior quantidade para as plantas (WEI; CHEN; XU, 2010). Em trabalho apresentado por Andrade et al. (2003), evidenciaram-se que, de modo geral, há uma redução na complexação do P nas cargas do solo, com o aumento das doses de ácidos cítrico e ele promove uma maior concentração de fosfato na solução do solo.

Em decorrência das características apresentadas pelo ácido cítrico, a sua aplicação no solo pode melhorar o aproveitamento do P pelo cafeeiro, sendo uma alternativa para a redução das quantidades aplicadas desse nutriente e diminuir o custo de produção. Todavia, a contribuição do ácido cítrico varia, em função da dose aplicada, como relatada por Gebrim et al. (2008) que notaram

que adição desse tipo de ácido (em altas quantidades) aumentou a lixiviação das bases trocáveis (K, Ca e Mg) do solo, sendo, também, de fundamental importância avaliar os atributos químicos do solo.

Contudo, no Brasil, há carência de pesquisas que elucidam os efeitos do ácido cítrico sobre a produtividade e os atributos químicos do solo de várias culturas, entre elas a cafeicultura, inclusive, em diferentes regiões.

Desta forma, objetivou-se com este trabalho avaliar a produtividade e os atributos químicos do solo de cafeeiros, submetidos à aplicação de ácido cítrico, durante quatro safras em Argissolo Amarelo distrófico e Latossolo Vermelho distrófico de Minas Gerais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos dois experimentos em condições de campo. Um realizado em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2006), fase Cerrado, em Campos Altos (MG), na Fazenda Inhame na região do Alto Paranaíba, com altitude de 1.050 m, latitude de 19°41'45"S, longitude de 46°10'15"W e a precipitação pluviométrica média anual de 1.830 mm, com o clima classificado com Cwa. O outro conduzido em Argissolo Amarelo distrófico (PAd) (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2006), fase Campo de Altitude, em Diamantina (MG), na Fazenda Forquilha região do Alto Jequitinhonha, com altitude do local de cultivo de 1.219 m, latitude de 18°31'31"S, longitude de 43°51'19"W e precipitação pluviométrica média anual de 1.082 mm, com classificação climática com Cwb.

Para a caracterização dos solos, foram coletadas amostras compostas de 0 a 0,20 m de profundidade, no momento da implantação do experimento em novembro de 2008. Depois de secas ao ar e passadas em peneira de 2 mm, foram realizadas as análises químicas e de textura dos solos. As análises químicas foram: pH em água (relação solo-água 1:2,5); Ca, Mg e Al foram extraídos pelo KCl 1mol L.⁻¹; P e K pelo Mehlich 1 e o carbono orgânico pelo método colorimétrico de acordo com Silva (2009). A análise de textura foi realizada pelo método da pipeta (CAMARGO et al., 2009). Os resultados para os dois solos são mostrados na Tabela 1. Os dados de precipitação registrados, durante o período experimental, estão representados na Tabela 2, resumidas em totais mensais por ano.

Tabela 1 Características químicas e físicas de amostras da camada de 0 a 0, 20 m dos dois solos. UFLA, Lavras - MG, 2015

Características ¹	Argissolo Amarelo distrófico (Pad) ²	Latossolo Vermelho distrófico (LVd) ³
pH (H ₂ O)	5,6 Bm	4,8 Bx
P (mg dm ⁻³)	6,3 MBx	0,7 MBx
K (mg dm ⁻³)	108 Bm	162 MBm
Ca (cmol _c dm ⁻³)	3,2 Bm	2,4 Bm
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,1 Bm	1,2 Bm
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,2 Bx	0,4 Bx
t (cmol _c dm ⁻³)	4,8 Bm	4,2 M
T (cmol _c dm ⁻³)	11,2 Bm	9,7 Bm
m (%)	4,2 MBx	9,5 MBx
V (%)	41 M	42 M
C.O. (dag kg ⁻¹)	1,87 M	1,91 M
Areia (g kg ⁻¹)	560	370
Silte (g kg ⁻¹)	180	150
Argila (g kg ⁻¹)	260 ⁴	480 ⁵

¹ MBx - muito baixo; Bx - baixo; M - médio; Bm - bom e MBm - muito bom (ALVAREZ et al., 1999). ² PAd - Argissolo Amarelo distrófico plíntico de Diamantina. ³ LVd - Latossolo Vermelho distrófico de Campos Altos. ⁴ Textura média. ⁵ Textura argilosa.

Tabela 2 Dados de precipitação no período de janeiro de 2008 a dezembro de 2012 das duas áreas experimentais. UFLA, Lavras - MG, 2015

Mês	Precipitação (mm)											
	Diamantina ³						Campos Altos ⁴					
	2008	2009	2010	2011	2012	Média	2008	2009	2010	2011	2012	Média
Jan ²	185,2	236,0	75,8	148,6	346,9	198,5	236,8	264,5	178,1	267,4	494,6	288,3
Fev ²	189,9	172,6	36,8	87,6	57,9	109,0	289,8	151,5	165,2	169,5	105,8	176,4
Mar ²	198	157,2	152,9	277,9	127,9	182,8	283,8	298,2	210,2	345,1	128,4	253,1
Abr	67,7	69,7	39,3	54,4	41,7	54,6	107,2	140,3	79,2	100,3	107,0	106,8
Mai	79,3	1,8	63,7	4,4	66,3	43,1	8,6	61,6	42,0	0,0	51,7	32,8
Jun	1,6	25,6	11,9	0,3	19,8	11,8	28,9	19,1	11,1	18,0	83,6	32,1
Jul	4	0,2	1,8	0,0	2,7	1,7	0,0	5,0	0,9	0,0	3,9	2,0
Ago	0,4	17,3	0,0	0,5	12,9	6,2	11,5	69,5	0,0	1,4	0,0	16,5
Set ¹	58,1	52,3	4,3	0,1	17,4	26,4	74,5	57,7	113,3	13,4	35,9	59,0
Out ¹	49,1	405,2	98,4	178,8	53,5	157,0	68,9	201,1	180,9	176,0	91,3	143,6
Nov	284,3	92,7	209,2	342,5	361,8	258,1	133,9	188,7	315,0	121,5	124,1	176,6
Dez	421,4	276,2	294,8	307,5	112,1	282,4	416,9	310,3	201,1	333,0	159,7	284,2
Total	1539,0	1506,8	988,9	1402,6	1220,9	1331,6	1660,8	1767,5	1497,0	1545,6	1386,0	1571,4

¹ Época de florescimento do cafeeiro ² Época de enchimento dos frutos.

³ Dados da estação climatológica lotada no mesmo município. ⁴ Dados da estação climatológica lotada em município vizinho. Fonte: Dados da Rede do INMET (2008 a 2012). Instituto Nacional de Meteorologia (2015)

Em ambos os locais, foram utilizados cafezais da espécie *Coffea arabica* L. da cultivar Catuaí Vermelho IAC-99, com uma planta por cova. Os cafeeiros apresentavam-se com quatro anos (plantio da lavoura em janeiro de 2005), cultivados no espaçamento 4,0 x 0,80 m e seis anos de idade (plantio em janeiro de 2003) no espaçamento 4,0 x 0,75m nos municípios de Diamantina e Campos Altos, respectivamente. A calagem foi realizada nos dois locais somente na implantação das lavouras em novembro de 2004 em Diamantina e novembro de 2002 em Campos Altos. Utilizou-se do delineamento experimental de blocos casualizados com duas repetições dos tratamentos por bloco com quatro blocos (BANZATTO; KRONKA, 2006). Os tratamentos foram compostos por quatro doses de ácido cítrico (0, 1, 2 e 4 kg ha⁻¹) (baseadas em estudo de JAYARAMA; SHANKAR; SOUZA, 1998), em única aplicação via regador formando uma faixa molhada de largura de 50 cm na projeção da copa das plantas, com um volume de calda de 400 L ha⁻¹, em dezembro de 2008, 2009, 2010 e 2011. A área experimental foi constituída de quatro blocos de quarenta e oito plantas em cada bloco, e cada parcela foi composta de doze plantas, sendo a parcela útil constituída pelas oito plantas centrais, simbolizando duas repetições em cada parcela, formando um total de trinta e duas parcelas experimentais. A adubação nitrogenada (ureia e sulfato de amônio), fosfatada (superfosfato simples) e potássica (cloreto de potássio) foram aplicadas em doses recomendadas para lavoura do mesmo porte e idade, segundo Guimarães et al. (1999). As adubações foram parceladas em quatro vezes iguais, outubro, dezembro, janeiro e março de cada ano. De novembro a janeiro, os experimentos receberam pulverização a alto volume de sulfato de zinco a 0,5% e de ácido bórico a 0,3% da calda, para o controle preventivo de deficiências, além dos controles fitossanitários e demais tratamentos culturais.

As análises de solo foram feitas em amostras retiradas antes da arruação para a colheita, na profundidade de 0 - 0,20 m por parcela útil na projeção da copa das plantas, nas quatro safras, em cada local de cultivo.

As seguintes análises químicas foram realizadas: pH em água (1:2,5); Ca, Mg, Al trocáveis, extraídos com solução de KCl 1 mol L⁻¹; K e P disponível, extraído com solução de Mehlich-1; carbono orgânico pelo método colorimétrico e fósforo remanescente no último ano de colheita, nos dois locais, determinado com solução de CaCl₂ 10 mmol L⁻¹, contendo 60 mg L⁻¹ de P na forma de KH₂PO₄ (ALVAREZ et al., 2000; SILVA, 2009).

Avaliou-se a produtividade das oito plantas úteis, colhidas por derriça no pano, quando se estimou previamente na lavoura, 5% de frutos verdes. Depois de colhidos, os frutos foram secos em terreiro de concreto, pesados e beneficiados. As quantidades de café beneficiado por parcela útil foram convertidas em produção de sacas de 60 kg por hectare. As produtividades de grãos de café beneficiados foram avaliadas por quatro safras, de 2008/09 até 2011/12, em cada local.

Os dados de produtividade de café beneficiados por safra, por biênio (média da safra de baixa e alta produção consecutiva) e média das quatro safras (2009 a 2012) para ambos os locais, separadamente, foram submetidos à análise de variância e regressão polinomial, cujas equações foram ajustadas às médias de produção em função das doses de ácido cítrico. Com base nas equações significativas, estimaram-se as doses de ácido cítrico para a produção máxima para cada local.

Os dados dos atributos químicos do solo: pH, P, P rem (determinado somente na última safra), K, Ca, Mg, H⁺ Al, CTC a pH 7, V% e C.O.; foram submetidos à análise de variância e regressão polinomial, cujas equações foram ajustadas.

Os dados foram submetidos à análise de variância e a seleção dos modelos de regressão foi feita baseando-se na significância dos coeficientes e não significância dos desvios de regressão para as doses de ácido cítrico

Utilizou-se o programa SISVAR, versão 5.3, nas análises dos dados e adotaram-se os níveis de significância de 1%, 5% e 10% no teste F.

As figuras foram construídas utilizando-se o programa computacional Sigma Plot versão 10.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Produtividade de grãos de café

A análise de variância para a produtividade de café mostrou que houve resposta significativa com o aumento das doses de ácido cítrico nas safras de 2009; 2010; 2011 e 2012 em Diamantina, (Argissolo Amarelo distrófico - PAd). Em Campos Altos (Latosolo Vermelho distrófico - LVd), as respostas foram significativas somente nas safras de 2009 e 2012 (Tabela 3).

Os resultados da produtividade de café, das quatro safras, na ocasião, por dois biênios e da média de quatro safras, nos dois locais de cultivo (PAd e LVd) sobre a aplicação de doses de ácido cítrico encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 Produtividade de grãos de café, por safra, por biênios de produção e média de quatro safras em função de doses de ácido cítrico (AC), em Argissolo Amarelo distrófico (PAd) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd). UFLA, Lavras - MG, 2015

Doses de AC (kg ha ⁻¹)	Sacas de 60 kg beneficiadas ha ⁻¹						
	Safra				Biênio		Média
	2009	2010 ⁽¹²⁾	2011	2012 ^(1e2)	09/10	11/12	Anual
.....Diamantina (PAd).....							
0.0	21.88	24.73	36.06	7.15	23.30	21.61	22.46
1.0	22.54	32.84	36.17	5.07	27.69	20.62	24.16
2.0	27.25	32.35	43.82	6.15	29.80	24.99	27.39
4.0	27.59	33.48	31.80	12.64	30.54	22.22	26.38
Média	24.82**	30.85*	36.96*	7.75**	27.83*	22.36⁺	25.10**
.....Campos Altos (LVd).....							
0.0	30.20	8.59	31.93	2.86	19.40	17.39	18.39
1.0	32.44	9.08	32.66	3.56	20.76	18.11	19.44
2.0	34.72	8.05	32.16	4.97	21.38	18.56	19.97
4.0	32.28	6.94	32.08	3.17	19.61	17.62	18.62
Média	32.41**	8.17	32.21	3.64⁺	20.29**	17.92	19.10⁺

+, * e ** significativos ao nível de 10, 5 e 1% pelo teste F, respectivamente; ¹ ano de baixa safra em Diamantina; ² anos de baixas safras em Campos Altos;

Para o local de Campos Altos, as safras de 2010 e 2012 foram os anos de baixa produção. Entretanto, no experimento de Diamantina, que é uma lavoura dois anos mais nova (com idade de quatro anos no momento da implantação do experimento), o ano de baixa produção ocorreu somente em 2012 (Tabela 3).

Desta forma, na lavoura de Diamantina, independente do efeito dos tratamentos, ela teve um ano de baixa produção a menos, isto, explicado por ser mais nova, assim, não ter entrado na bienalidade de produção.

Conseqüentemente, as produtividades no solo de Diamantina foram mais elevadas do que no solo LVd em Campos Altos, na média das quatro safras. A bienalidade da produção do cafeeiro, ou seja, um ano de alta produção, seguida de outro de baixa, é prejudicial à expectativa de resposta aos tratamentos, diminuindo a sua consistência na sequência anual. As melhores respostas à aplicação das doses de ácido cítrico na produção nos dois solos foram encontradas nos anos de alta produção do cafeeiro.

Na Tabela 3, verifica-se que, nas safras 2010 e 2011 em Campos Altos (um ano de baixa e alta produção seguidos), não se observaram respostas significativas às doses de ácido cítrico. Por outro lado, verifica-se, pela Tabela 1, análise de solo, antes da aplicação dos tratamentos, que os teores de P no solo de Campos Altos, foram considerados muito baixos, segundo Alvarez et al. (1999), sendo, possivelmente, reduzida a resposta à aplicação deste ácido orgânico nesta condição a partir do segundo ano de safra.

Interessante ressaltar que, em ambos os solos, ao longo das aplicações de ácido cítrico nos quatro anos, a dose para máxima produtividade diminuiu (Tabela 3).

Em Argissolo Amarelo distrófico (PAd de Diamantina), as doses de máximas foram decrescentes até iniciar a bienalidade em 2012, sendo: em 2009 a dose de 3,0 kg ha⁻¹ de AC ; em 2010 a de 2,8 kg ha⁻¹ de AC; em 2011 a de 1,8

kg ha⁻¹ de AC e, por fim, 2012 com 4,0 kg ha⁻¹ de AC calculadas sobre os dados da Tabela 3.

Já no Latossolo Vermelho distrófico (LVd de Campos Altos), a dose máxima de 2,37 kg ha⁻¹ de AC para 2009 e de 2,17 kg ha⁻¹ de AC, para 2012 calculadas pelos dados da Tabela 3. Efeito de doses máximas decrescentes, nestes dois solos, pode ser explicado pela ponte metálica e ou adsorção competitiva do ácido orgânico (AO) ao solo, obtendo um maior efeito residual (GUPPY et al., 2005).

De acordo com os trabalhos de Stevens (1949) e Fraga Junior e Conagin (1956), para maior precisão e uniformidade estatística na interpretação dos efeitos da alternância de produção, ou seja, bienalidade, bastante comum no cafeeiro, os dados serão também discutidos por meio da produtividade por biênio e pela média das quatro safras.

Pela análise de variância dos dados de produção, verifica-se que houve resposta significativa para as doses de ácido cítrico aplicadas no biênio 2009/2010 nos dois solos (PAd de Diamantina e LVd de Campos Altos). E, no segundo biênio, 2011/2012, somente foi significativo para o PAd de Diamantina (Tabela 4).

Em relação à produtividade média de quatro safras, houve resposta significativa em ambos os locais (Figuras 1a e 1b). Os dados médios encontram-se na Tabela 3 e as equações de regressão ajustadas estão descritas nas figuras respectivas a cada local.

Verifica-se que no biênio 2009/2010 foram obtidas maiores produtividades do que no biênio 2011/2012 em ambos os locais (Tabela 3). Em Diamantina, as produtividades da lavoura em cada biênio foram mais elevadas estatisticamente do que em Campos Altos, entretanto, a produtividade anual (média de quatro anos) na lavoura de Campos Altos em 2009 foi superior que a

de Diamantina, mas, como tal lavoura é dois anos mais velha, no ano seguinte, a mesma entrou na safra baixa, ao contrário da lavoura de Diamantina (Tabela 3).

Tabela 4 Equações de regressão ajustadas para produtividade de grãos de café como variáveis dependentes das doses de ácido cítrico, produção máxima e doses estimadas para produtividade máxima, para dois biênios e média de quatro safras em PAd e LVd. UFLA, Lavras - MG, 2015

Equações de regressão	R ²	Produtividade	
		Máxima (sacas ha ⁻¹)	Doses máximas de AC (kg ha ⁻¹)
Diamantina (PAd)			
..... Biênio 2009/10			
$y = 23,39 + 4,808*x - 0,7576*x^2$	0,99	31,02	3,17
..... Biênio 2011/12			
$y = 21,15 + 3,182*x - 0,6051*x^2$	0,80	25,33	2,63
..... Média anual			
$y = 22,12 + 3,516*x - 0,6063*x^2$	0,91	27,22	2,90
Campos Altos (LVd)			
..... Biênio 2009/10			
$y = 19,37 + 1,9058*x - 0,4613*x^2$	0,99	21,34	2,06
..... Biênio 2011/12			
NS			
..... Média anual			
$y = 18,36 + 1,491^+x - 0,3569^+x^2$	0,99	19,97	2,10

NS, +, * e ** não significativo, significativo ao nível de 10, 5 e 1% pelo teste t, respectivamente.

Verifica-se, na Tabela 4 e Figura 1, que houve resposta quadrática da produção média das quatro safras, com o aumento das doses de ácido cítrico nos dois locais de cultivo.

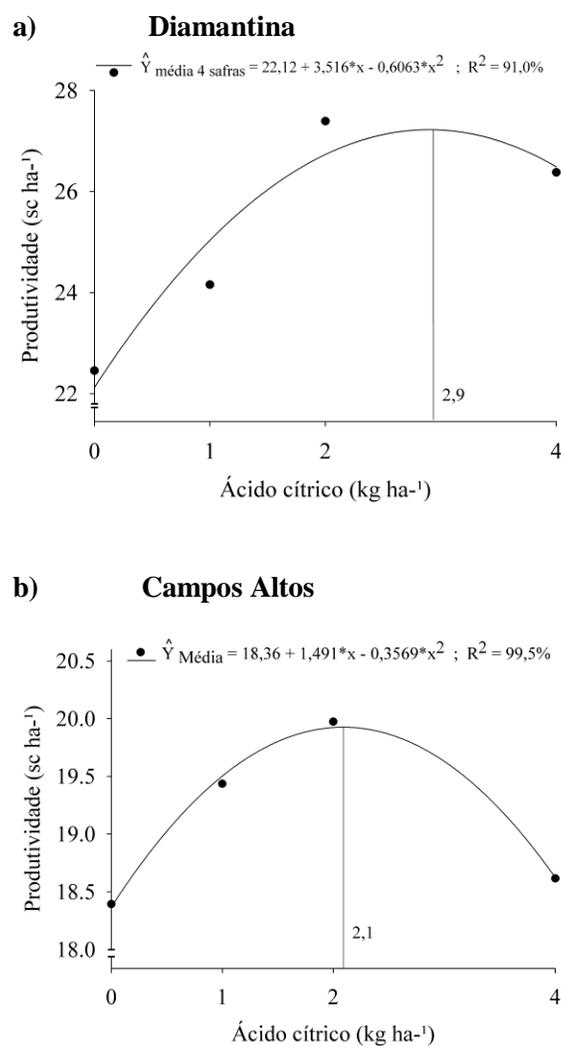


Figura 1 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável produtividade de grãos de café na média de quatro safras (2009 a 2012) em função das doses de ácido cítrico aplicadas nos solos PAd (Diamantina) **(a)** e LVd (Campos Altos) **(b)**. UFLA, Lavras - MG, 2015

A produtividade máxima estimada de grãos de café, para a média dos quatro anos de colheita, foi de 27,22 sacas ha⁻¹ alcançada no PAd (Diamantina) com a dose de 2,9 kg ha⁻¹ de ácido cítrico e de 19,96 sacas ha⁻¹ alcançada no LVd

(Campos Altos) com a dose de 2,1 kg ha⁻¹ de ácido cítrico, com incrementos de 8,5%. E com o aumento das doses de ácido cítrico, notaram-se decréscimos de 2,7% e 6,6% na produtividade em relação ao controle (sem ácido cítrico) nas lavouras de Diamantina e Campos Altos, respectivamente. Corroborou com Gebrim et al. (2008), ao notarem que adição desse tipo de ácido, em altas quantidades, aumentou a lixiviação das bases trocáveis (K, Ca e Mg) do solo, pois é de fundamental importância o equilíbrio dos nutrientes na solução do solo (MALAVOLTA, 2006). E, de acordo com a “Lei dos incrementos decrescentes”, os aumentos crescentes de fertilizantes, ou no caso a maior solubilização destes no solo correspondem a aumentos decrescentes da produção (HOFFMANN et al., 1995).

3.2 Atributos químicos médios dos solos de quatro safras

3.2.1 Argissolo Amarelo distrófico - Diamantina

Em Diamantina, pode-se observar que as doses de máxima produtividade por biênios foram: 3,17 kg ha⁻¹ e 2,63 kg ha⁻¹ com incrementos de 7,63 sacas ha⁻¹ e 4,18 sacas ha⁻¹ de média para o primeiro e segundo biênios, respectivamente (Tabela 4 e Figura 1).

Na produtividade média das quatro safras para este solo, observaram-se incrementos médios de 5,1 sacas ha⁻¹ ao ano. Ou seja, em quatro anos, com a aplicação de ácido cítrico, colheram -se em torno de 20,4 sacas ha⁻¹ a mais com a dose máxima média de 2,9 kg ha⁻¹ de ácido cítrico em Diamantina (Tabela 4 e Figura 1a). Um ganho de 23,0% em produtividade valores estes, maiores do que os relatados por Jayarama, Shankar e Souza (1998) de incrementos de 5 a 7% sobre a produtividade de café, com uma aplicação recomendada de 1,5 kg ha⁻¹ de ácido cítrico.

Pode-se relacionar esse ganho de produção na média dos quatro anos, com os atributos químicos do solo baseando-se no aumento das doses de ácido cítrico, como reequilíbrio das bases, não alteração do pH do solo e nem da saturação por bases (V%), e, por fim, uma “proteção”, ou seja, uma não alteração do carbono orgânico neste solo (Tabela 6).

Tabela 6 Equações de regressão ajustadas para P mehlich 1, P rem, pH, Mg, soma de bases (SB) e saturação por bases (V) (y) como variável dependente das doses de ácido cítrico ($x = \text{kg ha}^{-1}$), média de quatro safras no solo PAd (Diamantina). UFLA, Lavras - MG, 2015

Variável	Equações de regressão	R ²
..... Diamantina (PAd)		
..... Ácido Cítrico		
P Mehlich 1 (mg dm^{-3})	$y = 1,37^{\text{ns}}$	-
^{1/} P rem (mg L^{-1})	$y = 6,79^{\text{ns}}$	-
pH (H ₂ O)	$y = 5,6^{\text{ns}}$	-
Mg solo ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	$y = 0,50^{\text{ns}}$	-
Soma de bases-SB ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	$y = 1,95^{\text{ns}}$	-
Saturação por bases - V (%)	$y = 26,7^{\text{ns}}$	-

NS, * e **: não significativo, significativo ao nível de 5 e 1% pelo teste t, respectivamente.

^{1/} Avaliado somente na última safra (2012) neste local.

Tal reequilíbrio das bases no solo PAd de Diamantina é observado, quando se verifica que o K (Figura 2) aumentou de forma quadrática, ao passo que o Ca (Figura 3) diminuiu, também, de forma quadrática e o Mg se manteve inalterado (Tabela 6). Assim, quando se observa a soma de bases média, ao longo destes quatro anos, nota-se que não houve diferença significativa, justamente, explicada pelo reequilíbrio das bases neste solo. Corroborando com Gebrim et al. (2008), que observaram que a adição do ácidos orgânicos, se, em concentrações ideais, promovem um reequilíbrio das bases trocáveis no solo.

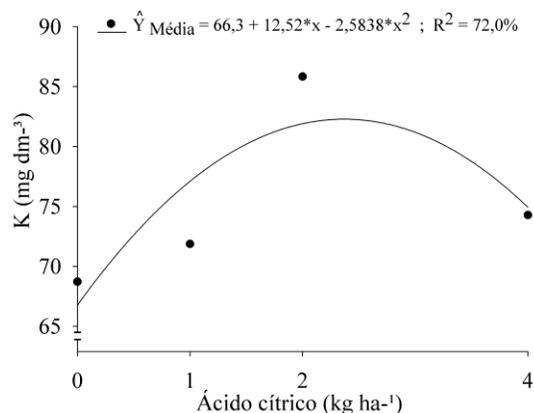


Figura 2 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável K (mg dm⁻³) na média de quatro safras (2009 a 2012) em função das doses de ácido cítrico aplicadas no solo PAd (Diamantina). UFLA, Lavras - MG, 2015

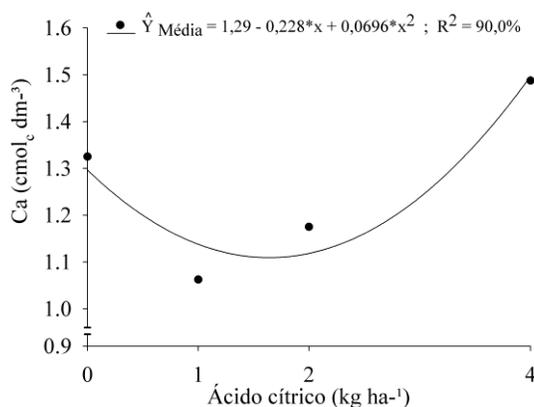


Figura 3 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável Ca (cmol_c dm⁻³) na média de quatro safras (2009 a 2012) em função das doses de ácido cítrico aplicadas no solo PAd (Diamantina). UFLA, Lavras - MG, 2015

Observando-se a média de quatro anos de avaliações do pH no solo PAd, não se verificou diferença significativa (Tabela 6). Fato este já observado

por Jayarama, Shankar e Souza (1998) que, em cafeeiros plantados em vasos na Índia sob aplicação de doses semelhantes de ácido cítrico, o pH do solo não foi alterado.

Observando a saturação por bases (V%), nota-se que não houve influência da aplicação de ácido cítrico no PAd (Tabela 6). Inclusive, por não ter sido feita calagem, durante o período experimental, teve um maior decréscimo na V%, ao longo dos anos, em virtude de ser um solo menos tamponado (textura média). Entretanto, foi justamente neste solo que obtivemos as maiores respostas à aplicação de ácido cítrico com um consequente aumento de produtividade (Tabela 4 e Figura 1a).

Houve um acréscimo linear de carbono orgânico (C.O.), ao longo dos quatro anos em Diamantina, com a aplicação de ácido cítrico (Figura 4). É importante salientar que, em solos com alto teor de carbono orgânico, a adsorção de compostos orgânicos de baixa massa molecular, no caso, o ácido cítrico, ocorre, em sua maioria, em superfícies orgânicas. Embora tanto superfícies minerais quanto orgânicas, nestas condições, estariam envolvidas em adsorção (SCHNITZER; KHAN, 1978) e o carbono orgânico estaria mais protegido da degradação, ou seja, pouca alteração do mesmo ao longo do tempo.

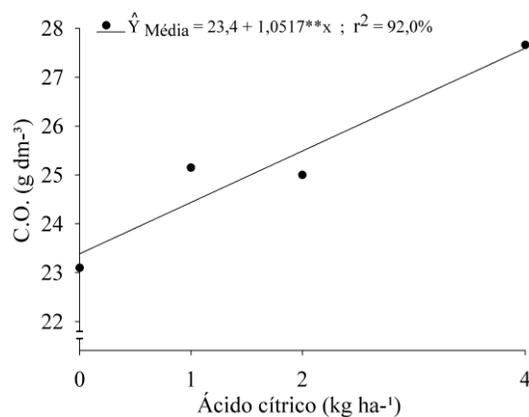


Figura 4 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável CO (g dm⁻³) na média de quatro safras (2009 a 2012) em função das doses de ácido cítrico aplicadas no solo PAd (Diamantina). UFLA, Lavras - MG, 2015

Ao se observar os valores da CTC a pH 7,0, ao contrário dos outros atributos do solo, este é muito importante, considerando o objetivo de se ter um maior equilíbrio entre troca de cátions e de ânions (Figura 5). Em Diamantina (PAd), tal CTC potencial acompanhou o comportamento do Ca no solo, onde se verifica um comportamento quadrático negativo, com ponto de mínimo valor de 1,2 kg ha⁻¹ de ácido cítrico nos quatros anos de média.

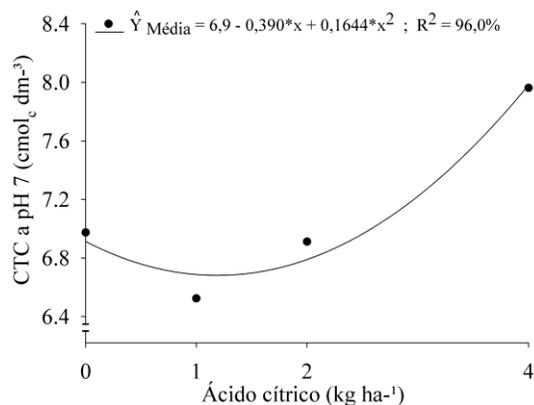


Figura 5 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável CTC a pH 7,0 (cmol_c dm⁻³) na média de quatro safras (2009 a 2012) em função das doses de ácido cítrico aplicadas no solo PAd (Diamantina). UFLA, Lavras - MG, 2015

A acidez potencial (H+Al) comportou-se de forma diferente da CTC a pH 7,0 em Diamantina, pois esta última tinha aumentado de forma quadrática com o aumento das doses de ácido cítrico e a acidez potencial diminuiu (Figura 6). No solo PAd de Diamantina observou-se um crescimento linear na média dos quatros anos de amostragens. Possivelmente, por ser um solo menos tamponado (textura média) logo se observou diferença com o uso de ácido cítrico. Tirloni et al. (2011), trabalhando com ácido cítrico em dois solos, um de textura média e o outro muito argiloso, também observaram tal efeito de tamponamento, em que só houve alterações na acidez potencial pelo uso de ácido cítrico no solo de textura média.

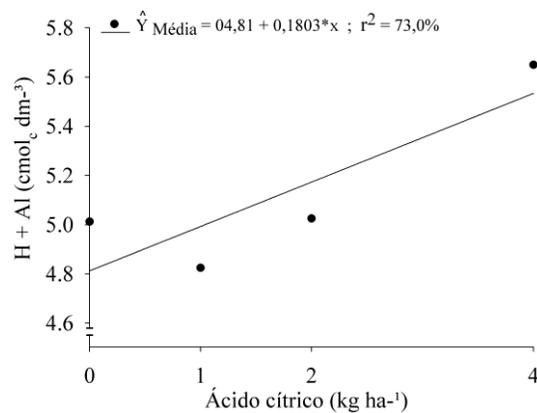


Figura 6 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável H + Al (cmol_c dm⁻³) na média de quatro safras (2009 a 2012) em função das doses de ácido cítrico aplicadas no solo PAd (Diamantina). UFLA, Lavras - MG, 2015

A acidez trocável (Al) aumentou de forma quadrática (Figura 7), à medida que se aumentaram as doses de ácido cítrico, corroborando com Chatterjee, Datta e Manjaiah (2015), quando fizeram uma curva de liberação de Al, conforme diferentes concentrações de ácido cítrico.

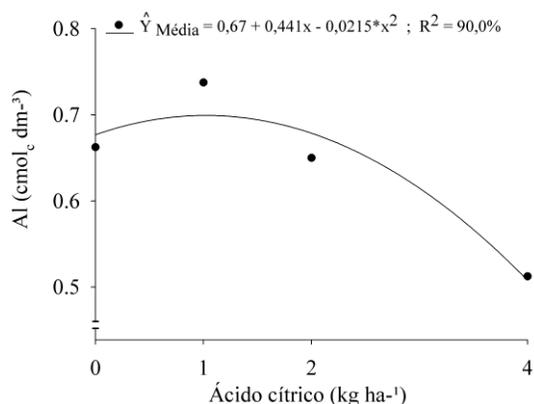


Figura 7 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável Al (cmol_c dm⁻³) na média de quatro safras (2009 a 2012) em função das doses de ácido cítrico aplicadas no solo PAd (Diamantina). UFLA, Lavras - MG, 2015

3.2.2 Latossolo Vermelho distrófico - Campos Altos

No LVd de Campos Altos, somente no primeiro biênio demonstrou comportamento significativo, com acréscimo de 1,96 sacas ha⁻¹ de média, ou seja, quase 4,0 sacas de café de ganho nas safras de 2009 e 2010 somadas (Tabela 4 e Figura 1b).

Observando a produtividade média das quatro safras para este local, notam-se incrementos médios de 1,6 sacas ha⁻¹ ao ano. Ou seja, em quatro anos, com a aplicação de ácido cítrico, colheram-se em torno de 6,4 sacas ha⁻¹ a mais do que no tratamento controle (zero kg ha⁻¹ de ácido cítrico) (Tabela 4 e Figura 1b). Um ganho de 8,5% em produtividade com a dose máxima de 2,1 kg ha⁻¹ de ácido cítrico, valores estes, também, próximos aos relatados por Jayarama, Shankar e Souza (1998) de incrementos de 5 a 7% sobre a produtividade de café, com uma aplicação recomendada de 1,5 kg ha⁻¹ de ácido cítrico.

Relaciona-se esse ganho de produção na média dos quatro anos, com os atributos químicos do solo no aumento das doses de ácido cítrico, como o aumento linear do teor de P-rem (Figura 8), não alteração do pH do solo e da saturação por bases (V%) (Tabela 7).

Tabela 7 Equações de regressão ajustadas para P mehlich 1, pH, H +Al, saturação por bases (V) e carbono orgânico no solo (C.O.) (y) como variável dependente das doses de ácido cítrico (x = kg ha⁻¹), média de quatro safras do solo LVd (Campos Altos). UFLA, Lavras - MG, 2015

Variável	Equações de regressão	R ²
.....Campos Altos (LVd).....		
.....Ácido Cítrico.....		
P Mehlich 1 (mg dm ⁻³)	y = 11,87 ^{ns}	-
pH (H ₂ O)	y = 6,3 ^{ns}	-
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	y = 3,05 ^{ns}	-
Saturação por bases - V (%)	y = 67,9 ^{ns}	-
Carbono orgânico solo (dag dm ⁻³)	y = 30,9 ^{ns}	-

NS, * e **: não significativo, significativo ao nível de 5 e 1% pelo teste t, respectivamente.

Tal teor de P-rem no solo LVd (Campos Altos), no último ano de colheita, notou-se um crescimento linear de P-rem, aumentando 0,401 mg L⁻¹ para cada quilograma de ácido cítrico aplicado (Figura 8). Tirloni et al. (2009) trabalharam com mesmo solo dentro de colunas de PVC em ambiente controlado, usando, inclusive, as mesmas doses de ácido cítrico, observaram também um crescimento linear com o aumento das doses e que, inclusive, não foi atingido o ponto de máximo valor para o P-rem, e os seus valores são ainda crescentes nas doses estudadas. Por fim, estes mesmos autores (TIRLONI et al., 2009) ainda concluíram a importância de um novo estudo de dose ótima para

atingir tal ponto de máximo valor de teor de P-rem e mínima adsorção de P em LVd.

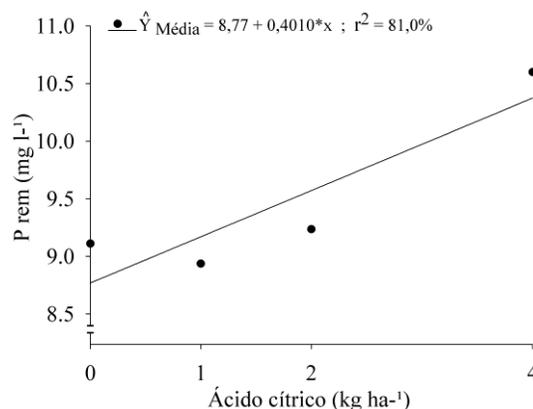


Figura 8 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável P rem (mg l⁻¹) na média de quatro safras (2009 a 2012) em função das doses de ácido cítrico aplicadas no solo LVd (Campos Altos). UFLA, Lavras - MG, 2015. (^{1/} Avaliado somente na última safra (2012) neste local)

Em Campos Altos, sendo um LVd, de textura muito argilosa, observou-se que o pH não alterou, além disso, o ácido cítrico não influenciou a saturação por bases (V%) na média das quatro safras (Tabela 7) e nem ao longo do período experimental (Tabelas 1 e 7).

Verifica-se que, no momento do plantio desta lavoura em Campos Altos (novembro de 2002), foi realizada calagem em área total e, depois, aplicada, a cada ano, uma fonte de fertilizante fosfatado, logo, possivelmente, ao longo do tempo, formaram -se fosfatos de Ca (P-Ca) e eles têm disponibilidade diminuída em solos corrigidos e tamponados (pH médio 6,3 de 0-0,20 m) como observado (Figura 9). Como as doses de ácido cítrico são pequenas (que, inclusive, não se observou o ponto de máximo valor para o P-rem neste LVd), assim, tal ácido ou

não afetou a solubilização de tais fosfatos de Ca, como aconteceu no PAd em Diamantina, que é um solo de textura média e de pH ~5,6 um pouco mais ácido e/ou, por camada 0-5 cm ser mais alcalina do que 0-0,20 m, pode ter havido alguma parte do ácido cítrico adicionado ser utilizado com a formação de citrato de cálcio e, inclusive, um possível aumento de liberação Fe em solução (CHATTERJEE; DATTA; MANJIAH, 2015).

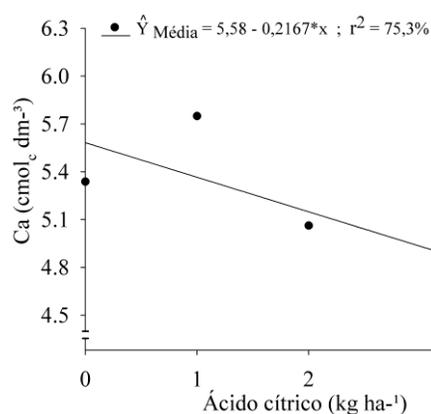


Figura 9 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável Ca (cmol_c dm⁻³) na média de quatro safras (2009 a 2012) em função das doses de ácido cítrico aplicadas no solo LVd (Campos Altos). UFLA, Lavras - MG, 2015

Observa-se, na Figura 10, que, de modo geral, o efeito do ácido cítrico, em um solo em relação à disponibilidade de K, é praticamente o inverso de um local para o outro. Ou seja, com o aumento das doses de ácido cítrico no Argissolo de Diamantina, aumentou o teor de K disponível em quatro anos de média (reequilíbrio de bases), e, no Latossolo de Campos Altos, a cada quilograma de ácido cítrico adicionado, diminui-se 7,941 mg dm⁻³ de K no mesmo. Corroborando, Silva et al. (2008) demonstraram que a cinética de liberação de K, sob efeito de ácidos orgânicos, são maiores em Latossolos do

que para Argissolos em curto prazo, mas, ao longo do tempo, a disponibilidade é maior no Argissolo.

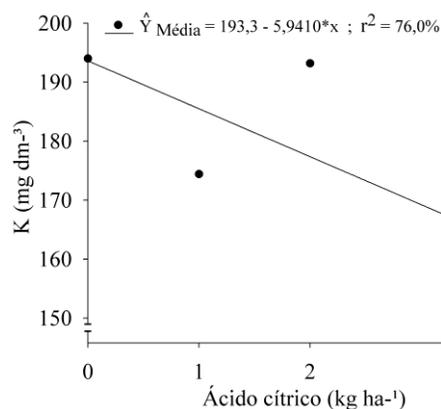


Figura 10 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável K (mg dm⁻³) na média de quatro safras (2009 a 2012) em função das doses de ácido cítrico aplicadas no solo LVd (Campos Altos). UFLA, Lavras - MG, 2015

O alumínio trocável se comportou de forma crescente nos dois solos, podendo ser observado um comportamento linear no LVd (Campos Altos) (Figura 11) e quadrático no PAd (Diamantina) (Figura 7). Observa-se que presença de ácidos orgânicos como o ácido cítrico na solução do solo pode formar de cinco a seis ligações com o Al (HUE; CRADDOCK; ADAMS, 1986), fato que aumenta a formação do quelato lábil Al-citrato e diminui seu teor. Entretanto, Andrade et al. (2003) e Tirloni et al. (2009) concordam que, com uma aplicação de ácido cítrico na superfície do solo, pode provocar uma pequena acidificação do meio, tornando a superfície das argilas oxídicas com carga positiva, aumentando a dissolução de minerais do solo, liberando Fe e Al para a solução e promovendo maior adsorção do P (ANDRADE et al., 2003),

sendo mais provável tal efeito no LVd de Campos Altos, pois, o aumento do Al foi maior que no PAd de Diamantina (Figura 11).

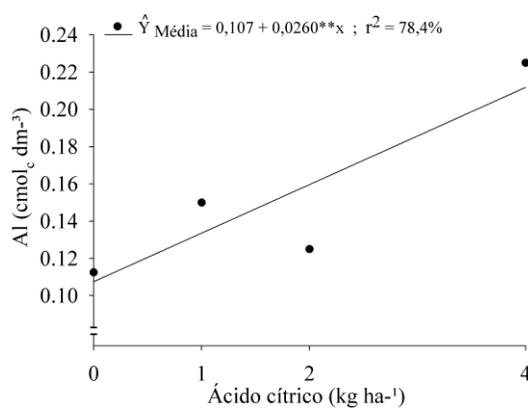


Figura 11 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável Al (cmol_c dm⁻³) na média de quatro safras (2009 a 2012) em função das doses de ácido cítrico aplicadas no solo LVd (Campos Altos). UFLA, Lavras - MG, 2015

Tal maior liberação de Al, também, explica o comportamento de reequilíbrio do Mg neste solo, pois, observa-se nele pequenos decréscimos médios com o aumento das doses de ácido cítrico, ao longo dos quatro anos (Figura 12).

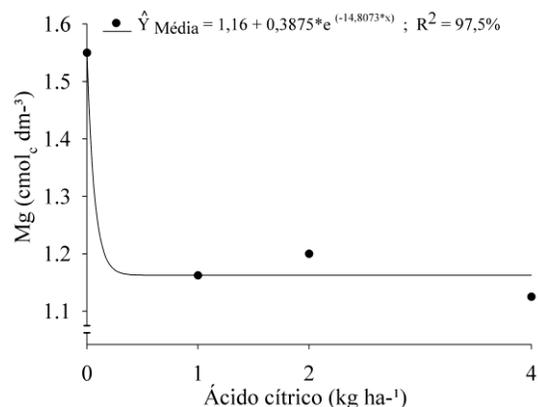


Figura 12 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável Mg (cmol_c dm⁻³) na média de quatro safras (2009 a 2012) em função das doses de ácido cítrico aplicadas no solo LVd (Campos Altos). UFLA, Lavras - MG, 2015

No Latossolo Vermelho distrófico de Campos Altos, por ser um solo mais tamponado (argiloso) não se observou diferença na acidez potencial (H + Al) com o uso de ácido cítrico (Tabela 7). Tirloni et al. (2011) observaram tal efeito de tamponamento, em que também não houve alterações na acidez potencial (H + Al) pelo uso de ácido cítrico no solo argiloso.

Observa-se que a CTC a pH 7,0 teve um comportamento de forma linear negativa neste solo, com diminuição de 0,228 cmol_c dm⁻³ para cada quilograma de ácido cítrico aplicado (Figura 13). Da mesma forma, foi o comportamento da soma de bases (SB), só que com decréscimos de 0,3196 cmol_c dm⁻³ (Figura 14).

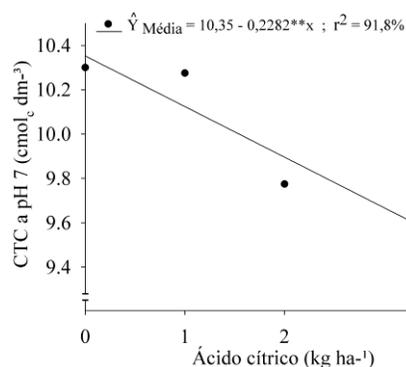


Figura 13 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável CTC a pH 7,0 (cmol_c dm⁻³) na média de quatro safras (2009 a 2012) em função das doses de ácido cítrico aplicadas no solo LVd (Campos Altos). UFLA, Lavras - MG, 2015

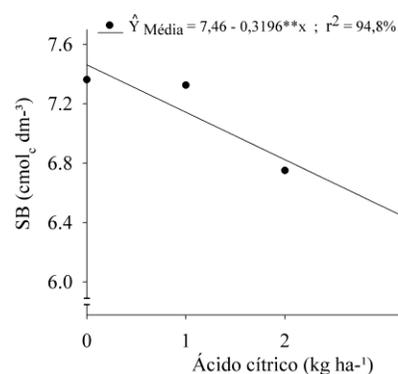


Figura 14 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável SB (cmol_c dm⁻³) na média de quatro safras (2009 a 2012) em função das doses de ácido cítrico aplicadas no solo LVd (Campos Altos). UFLA, Lavras - MG, 2015

Entretanto, pode-se considerar que tal diminuição tanto da CTC a pH 7,0 quanto da soma de bases, pouco influenciou negativamente nos atributos químicos deste solo, pelo contrário, fez com que o P-rem aumentasse com o aumento das doses de ácido cítrico. E, conseqüentemente, aumentar a

produtividade de cafeeiros no solo LVd de Campos Altos na média dos quatro anos de colheita (Tabela 4 e Figura 1b).

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 em mesmo local de diferentes texturas; bem como realizar o seu parcelamento; além da aplicação do ácido cítrico junto a produtos fitossanitários na projeção da copa do café, para reduzir o custo de aplicação.

Inclusive, para futuros trabalhos, é recomendável avaliar o tempo de biodegradação do ácido cítrico aplicado no solo associadamente com: adição de matéria orgânica no solo, relacionando com curvas de retenção de água (CRA).

4 CONCLUSÕES

A melhor resposta das plantas de café foi com a dose média de 2,9 kg ha⁻¹ de ácido cítrico (AC) e ganhos de 23,0% em produtividade no PAd e, no solo LVd a dose média de 2,1 kg ha⁻¹ com ganhos de 8,5% em produtividade.

Pequenas doses de AC em cafeeiro em solo PAd promovem reequilíbrio das bases, sem alteração do pH e V%, além de não alterar o C.O.

Em LVd, o AC promove aumento linear do teor de P-rem, sem alteração do pH e V%.

ABSTRACT

Applying management practices increase the content of organic matter or its fractions (such as organic acids), which can reduce phosphorus absorption (P) by forming compounds that block the P absorption site in the surface of iron and aluminum oxides. Two experiments were conducted in private farms, one in Diamantina (MG), Minas Gerais (MG), Brazil, presenting Yellow Argisols dystrophic (YAd), and another in Campos Altos (MG), presenting Red Oxisol dystrophic (ROd). The objective was to the response of coffee plants to the application of citric acid (CA). We used *C. arabica* cultivar Catuaí Vermelho IAC-99, with 4 and 6 years of age. The experiment was conducted with a completely randomized block design, using four replicates, two plants per treatment, and spacing of 4.0 x 0.80 m and 4.0 x 0.75 m for the four and six year old plants, respectively. The treatment was comprised of four doses of CA (0, 1, 2, and 4 kg ha⁻¹), with a single application via watering can, under the projection of the tree canopy, in December of 2008, 2009, 2010 and 2011. We evaluated coffee bean productivity and chemical attributes (pH, P total, P rem, K, Ca, Mg, H+Al, CEC at pH 7, V% and C.O.) in four consecutive years (from 2009 to 2012) at each location. The coffee plant positively responds for coffee bean production with increasing dosage of CA. Maximum production occurred at 2.9 kg ha⁻¹ CA, with gain of 23.0 % on YAd and ROd, in the dosage of 2.1 kg ha⁻¹, and 8.5% gain in productivity. The minimum doses of CA in the AYd soil promote equilibrium of bases, did not change pH and base saturation, and protected organic carbon. In ROd, the CA promotes the linear increase of the rate of the remaining phosphorous and does not change pH and base saturation.

Keywords: Organic acids. *Coffea arabica*. Soil conditioner. Soil fertility. Productivity

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ V, V. H. et al. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000.
- _____. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; VIEGAS, V. H. A. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.
- _____. Utilização de fósforo do solo e do fertilizante por tomateiro. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 1, p. 167-172, 2002.
- 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.
- BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 237 p.
- BERTONI, J. C. et al. Níveis críticos de fósforo para o arroz num solo de várzea inundado em condições de casa-de-vegetação. **Revista Universidade Rural**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 2, p. 45-53, 2003.
- CAMARGO, O. A. et al. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: IAC, 2009. 77 p.
- CHATTERJEE, D.; DATTA, S. C.; MANJIAH, K. M. Effect of citric acid treatment on release of phosphorus, aluminium and iron from three dissimilar soils of India. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Oxford, v. 61, n. 1, p. 105-117, May 2015.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DE SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. 320 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira café**: primeira estimativa. Brasília: Conab, 2015. 41 p.

DIAS, K. G. L. **Fontes e doses de fósforo para o cafeeiro**: produtividade, dinâmica de nutrientes no solo e nutrição mineral das plantas. 2012. 90 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2006. 306 p.

FOX, T. R.; COMERFORD, N. B. Low molecular weight organic acids in selected forest soil of the southwestern USA. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 54, p. 1139-1144, 1990.

FRAGA JÚNIOR, C. G.; CONAGIN, A. Delineamentos e análises de experimentos com cafeeiros. **Bragantia**, Campinas, v. 15, n. 17, p. 177-191, 1956.

FREITAS, I. F. et al. Phosphorus extracted by ion exchange resins and Mehlich-1 from Oxisols (Latosols) treated with different Phosphorus rates and sources for varied soil-source contact periods. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 3, p. 667-677, maio/jun. 2013.

GEBRIM, F. O. et al. Lixiviação de cátions favorecida pela presença de ânions inorgânicos e ácidos orgânicos de baixa massa molecular em solos adubados com camadas de aviário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2255-2267, nov./dez. 2008.

GUIMARÃES, P. T. G.; et al. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; VIEGAS, V. H. A. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**: 5ª aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 289-302.

GUIMARAES, P. T. G.; REIS, T. H. P. Nutrição e adubação do cafeeiro. In: REIS, P. R.; CUNHA, R. L. da (Ed.). **Café Arábica do plantio à colheita**. Lavras: Epamig, 2010. p. 343-414.

GUPPY, C. N. et al. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 43, n. 2, p. 189-202, Apr. 2005.

HOFFMANN, C. R. et al. O nitrogênio e o fósforo no crescimento da braquiária e do colônio em amostras de um latossolo da região Noroeste do Paraná.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 19, p. 79-86, 1995.

HUE, N. V.; CRADDOCK, G. R.; ADAMS, F. Effect of organic acids on aluminium toxicity in subsoils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, n. 1, p. 28-34, May 1986.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa/BDMEP**. Brasília: INMET, 2015.

JAYARAMA, V.; SHANKAR, B. N.; SOUZA, V. M. D. Effect of citric acid on the solubility of phosphorus in coffee soils. **Indian Coffee**, Bangalore, v. 12, p. 13-15, 1998.

JONES, D. L. et al. Organic acid behavior in soils - misconceptions and knowledge gaps. **Plant and Soil**, The Hague, v. 248, n. 1, p. 31-41, Jan. 2003.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 631 p.

MELO, B. de et al. Fontes e doses de fósforo no desenvolvimento e produção do cafeeiro, em um solo originalmente sob vegetação de Cerrado de Patrocínio - MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 315-321, mar./abr. 2005.

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, p. 363-382, Apr. 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**, Elmsford, v. 38, p.683-692, 2006.

RAGHOTHAMA, K. G.; KARTHIKEYAN, A. S. Phosphate acquisition. **Plant and Soil**, The Hague, v. 274, p. 37-49, 2005.

RESENDE, A. V. et al. Crescimento inicial de espécies florestais de diferentes grupos sucessionais em resposta a doses de fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, n. 11, p. 2071-2081, nov. 1999.

SCERVINO, J. M. et al. Soil fungal isolates produce diferente organic acid patterns involved in phosphate salts solubilization. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 46, p. 755-763, 2010.

SCHNITZER, M.; KHAN, S. U. **Soil organic matter developments in soil science**. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1978. 319 p.

SILVA, E. B. et al. Adubação potássica do cafeeiro: produção, faixas críticas de nutrientes no solo e nas folhas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, 25, n. 4, p. 801-811, jul./ago. 2001.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2009. 627 p.

SILVA, V. A. et al. Kinetics of K release from soils of Brazilian coffee: effect of organic acids. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 533-540, mar./abr. 2008.

STEVENS, W. L. Análise estatística do ensaio de variedades de café. **Bragantia**, Campinas, v. 9, p. 103-123, 1949.

TIRLONI, C. et al. Disponibilidade de fósforo em função das adições de calagem e de um bioativador do solo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, n. 4, p. 977-984, jul./ago. 2009.

TIRLONI, C. et al. Disponibilidade e movimentação de cátions no solo, em função da calagem e da adição de ácido cítrico associado a um ativador enzimático. **Revista de Ciências Agrárias**, Belém, v. 54, n. 1, p. 20-27, jan./abr. 2011.

WEI, L.; CHEN, C.; XU, Z. Citric acid enhances the mobilization of organic phosphorus in subtropical and tropical forest soils. **Biology an Fertility of Soils**, Berlin, v. 46, n. 7, p. 765-769, Sept. 2010.

ARTIGO 2 **Uso de ácido cítrico no cafeeiro:** produtividade e faixas de
suficiência de nutrientes nas folhas em duas regiões do estado de
Minas Gerais

Redigido conforme as normas da NBR 6022 (ABNT, 2003).

USO DE ÁCIDO CÍTRICO NO CAFEIEIRO: PRODUTIVIDADE E FAIXAS DE SUFICIÊNCIA DE NUTRIENTES NAS FOLHAS EM DUAS REGIÕES DO ESTADO DE MINAS GERAIS

RESUMO

O uso exógeno de ácidos orgânicos de baixa massa molecular vem sendo ultimamente muito testado na agricultura, entretanto, estudos para verificação do efeito destes ácidos, principalmente, o cítrico por meio de análises nutricionais nas plantas são de fundamental importância. Objetivou-se avaliar a produtividade, o estado nutricional e as faixas de suficiência em cafeeiros (*Coffea arabica*), durante quatro safras submetidas à aplicação de ácido cítrico, (AC) em duas regiões de Minas Gerais. Foram conduzidos dois experimentos de campo em fazendas particulares, sendo um em Argissolo Amarelo distrófico (PAd) em Diamantina (MG) e o outro em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) em Campos Altos (MG). Usaram-se, em ambos os locais de cultivo, cafezais da espécie *Coffea arabica* L. da cultivar Catuaí Vermelho IAC-99 com idades de quatro e seis anos, com uma planta por cova nos espaçamentos 4,0 x 0,80 m e 4,0 x 0,75 m, respectivamente. Utilizou-se do delineamento experimental de blocos casualizados com duas repetições dos tratamentos por bloco com quatro blocos. Os tratamentos foram compostos por quatro doses de AC (0, 1, 2 e 4 kg ha⁻¹) em aplicação única via regador na projeção da copa das plantas, em dezembro de 2008, 2009, 2010 e 2011. Foi avaliada a produtividade de grãos de café, beneficiados em quatro safras (2009 a 2012), em cada local de cultivo e os teores foliares de nutrientes do cafeeiro, durante quatro safras (2009 a 2012), em cada local de cultivo. As faixas de suficiência foliares foram avaliadas para média de quatro safras do cafeeiro. O cafeeiro respondeu positivamente em produção de grãos à aplicação de doses de AC com ganhos de 23,0% e 8,5% para Diamantina e Campos Altos, respectivamente. As faixas de suficiência para o cafeeiro, correspondentes a 90-100% da produtividade máxima nas folhas com uso de AC são de: 0,16-0,22 dag kg⁻¹ para P; 3,04-3,00 dag kg⁻¹ para K; 1,32-1,26 dag kg⁻¹ para Ca; 0,15-0,14 dag kg⁻¹ para Mg; 0,31-0,27 dag kg⁻¹ para S; 63,55-58,23 mg kg⁻¹ para B (somente Diamantina); 35,01-43,97 mg kg⁻¹ para Cu (somente Diamantina); 95,55-94,47 mg kg⁻¹ para Fe; 81,31-86,59 mg kg⁻¹ para Mn (somente Diamantina); 23,67-28,16 mg kg⁻¹ para Zn.

Palavras-chave: Ácidos orgânicos. *Coffea arabica*. Condicionador de solo. Nutrição mineral. Produtividade.

1 INTRODUÇÃO

Verifica-se que os cafezais brasileiros, até a década de 60, eram cultivados em áreas recém-desmatadas, com solos de média a alta fertilidade, com bons estoques de micronutrientes presentes na matéria orgânica. A partir dos anos 80, expandiram-se para solos de cerrado e campo que, na sua maior parte, são muito intemperizados e pobres em nutrientes, o que requer aplicação de elevadas quantidades de fertilizantes, principalmente, os fosfatados (MELO et al., 2005), sendo necessário se adicionar micronutrientes, pois são essências para a produção das plantas. Dentre os micronutrientes usados no cafeeiro, o zinco (Zn) é um dos mais limitantes. Com a perda da matéria orgânica do solo, o Zn torna-se fortemente adsorvido ou fixado pela argila ou complexado com outros minerais do solo e o cafeeiro não consegue absorvê-lo. Assim, a aplicação de Zn só é eficiente na correção do solo para cafeeiros em solos arenosos. Em solos argilosos não se obtêm bons resultados, aplicando-o junto ao solo, em virtude da forte adsorção pelos seus colóides (SILVA; NOGUEIRA; GUIMARÃES, 2005).

Nota-se que compostos hidrossolúveis, como os ácidos orgânicos de baixa massa molecular (AOBMM), tal como o ácido cítrico são capazes de formar complexos com Cu, Fe, Zn e Mn e favorecer sua difusão no solo (PEGORARO et al., 2005) tornando-os mais disponíveis às plantas. A habilidade desses AOBMM, principalmente o cítrico de formar complexos estáveis com formas Al^{+3} e Fe^{+3} na solução do solo (KOCHIAN; HOEKENGA; PIÑEROS, 2004; RAGHOTHAMA; KARTHIKEYAN, 2005), é outro fator importante a ser destacado, pois diminui o efeito nocivo destes elementos (CHATTERJEE; DATTA; MANJAIAH, 2015). Em solos calcários, o ácido cítrico auxilia na liberação do P dos fosfatos de Ca. Geralmente, este composto é mais eficiente em aumentar a disponibilidade de P pelo bloqueio dos sítios de

adsorção, tornando o P mais disponível (ANDRADE, 2003; GUPPY et al., 2005). Há evidências de adição de ácido orgânico no solo, especialmente o citrato, ou também chamado de cítrico e o mesmo promove a solubilização de quantidades significativas de P fixado e pode reduzir a adsorção do fertilizante a ser aplicado (BOLAN et al., 1994) o que pode reduzir o custo de aplicação dos mesmos.

Em estudos realizados na Índia com aplicação de ácido cítrico via solo (JAYARAMA; SHANKAR; SOUZA, 1998) em área cultivada com café, observou-se aumento nos teores de P, K e Zn no solo e 7% de incrementos em produtividade, sendo recomendado pelos autores uma dose “ótima” de 1,5 kg ha⁻¹ do ácido orgânico misturado à formulação NPK utilizada para a fertilização da cultura.

Diversos estudos têm evidenciado os benefícios e as doses utilizadas de ácido cítrico em: milho com as doses de 0,8 e 2,0 kg ha⁻¹ para um Neossolo Quartzarênico e um Latossolo Vermelho Amarelo (SANTOS, 2012); feijão com a dose 2,66 kg ha⁻¹ (FRANCO et al., 2009); em cafeeiros em produção (conduzidos por uma safra) com 2,7 kg ha⁻¹ no Sul de Minas (SILVA; NOGUEIRA; GUIMARÃES, 2005) e 2,4 kg ha⁻¹ no Alto Jequitinhonha com média de três safras (LEMOS, 2012). Contudo, há carência de pesquisas que elucidam os efeitos do ácido cítrico e a dose “ótima” nos cafeeiros em diversas regiões com médias de, pelo menos, quatro safras (duas safras de alta e duas de baixa produção) para se comprovar tal eficiência.

Todavia, a contribuição do ácido cítrico varia em função da dosagem aplicada, como relatada por Gebrim et al. (2008) que notaram que adição desse tipo de ácido em altas quantidades aumentou a lixiviação das bases trocáveis (K, Ca e Mg) do solo.

Observa-se que a análise foliar dos tecidos é uma das mais importantes ferramentas para avaliação do estado nutricional das plantas e permite verificar a

eficiência dos adubos e relacionar a obtenção dos níveis de produtividades com os seus teores foliares (REIS JÚNIOR et al., 2002). Para uma adequada interpretação, é de fundamental importância a utilização de faixas críticas (FARNEZI; SILVA; GUIMARÃES, 2009), verificando a região de adequação, em que há uma resposta no crescimento da produção, proporcional ao crescimento da concentração, até se atingir uma concentração ótima (nível crítico), acima da qual não há mais resposta na produção.

Desta forma, objetivou-se com o presente trabalho avaliar a produtividade, o estado nutricional e as faixas de suficiência de cafeeiros (*Coffea arabica*), durante quatro safras submetidas à aplicação de doses de ácido cítrico, em duas regiões de Minas Gerais.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foram conduzidos dois experimentos em condições de campo. Um realizado em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2006), fase Cerrado, em Campos Altos (MG) na Fazenda Inhame na região do Alto Paranaíba. O outro experimento foi conduzido em Argissolo Amarelo distrófico (PAd) (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2006), fase Campo de Altitude, em Diamantina (MG), na Fazenda Forquilha região do Alto Jequitinhonha. A caracterização química e da textura em amostras dos solos coletadas na profundidade de 0 - 0,20 m encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 Características químicas e de textura de amostras na profundidade de 0 a 0,20 m dos dois solos^{1/}. UFLA, Lavras - MG, 2015

Características	Argissolo Amarelo distrófico (PAd) ^{1/}	Latossolo Vermelho distrófico (LVd) ^{2/}
pH (H ₂ O)	5,6 Bm	4,8 Bx
P (mg dm ⁻³)	6,3 MBx	0,7 MBx
K (mg dm ⁻³)	108 Bm	162 MBm
Ca (cmol _c dm ⁻³)	3,2 Bm	2,4 Bm
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,1 Bm	1,2 Bm
Al (cmol _c dm ⁻³)	0,2 Bx	0,4 Bx
t (cmol _c dm ⁻³)	4,8 Bm	4,2 M
T (cmol _c dm ⁻³)	11,2 Bm	9,7 Bm
m (%)	4,2 MBx	9,5 MBx
V (%)	41 M	42 M
C.O. (dag kg ⁻¹)	1,87 M	1,91 M
Areia (g kg ⁻¹)	560	370
Silte (g kg ⁻¹)	180	150
Argila (g kg ⁻¹)	260	480

^{1/}PAd - Argissolo Amarelo distrófico plúntico de Diamantina. ^{2/}LVd - Latossolo Vermelho distrófico de Campos Altos. ^{3/} MBx - muito baixo; Bx - baixo; M - médio; Bm - bom e MBm - muito bom (CFSEMG, 1999)

Em ambos os locais, foram utilizados cafezais da espécie *Coffea arabica* L. da cultivar Catuaí Vermelho IAC-99, com uma planta por cova. Os cafeeiros apresentavam-se com quatro anos cultivados no espaçamento 4,0 x 0,80 m e seis anos de idade no espaçamento 4,0 x 0,75m nos municípios de Diamantina e Campos Altos, respectivamente. A calagem foi realizada nos dois locais somente na implantação das lavouras em novembro de 2004 em Diamantina e novembro de 2002 em Campos Altos.

Utilizou-se o delineamento experimental de blocos casualizados com duas repetições dos tratamentos por bloco com quatro blocos (BANZATTO; KRONKA, 2006). Os tratamentos foram compostos por quatro doses de ácido cítrico (0, 1, 2 e 4 kg ha⁻¹) (baseadas em estudo de JAYARAMA; SHANKAR; SOUZA, 1998), em única aplicação via regador formando uma faixa molhada de largura de 50 cm na projeção da copa das plantas, com um volume de calda de 400 L ha⁻¹, em dezembro de 2008, 2009, 2010 e 2011. A área experimental foi constituída de quatro blocos de quarenta e oito plantas em cada bloco, e cada parcela foi composta de doze plantas, sendo a parcela útil constituída pelas oito plantas centrais, simbolizando duas repetições em cada parcela, formando um total de trinta e duas parcelas experimentais. A adubação nitrogenada (ureia e sulfato de amônio), fosfatada (superfosfato simples) e potássica (cloreto de potássio) foram aplicadas em doses recomendadas, para lavoura do mesmo porte e idade, segundo Guimarães et al. (1999). As adubações foram parceladas em quatro vezes iguais, outubro, dezembro, janeiro e março de cada ano. De novembro a janeiro, os experimentos receberam pulverização a alto volume de sulfato de zinco a 0,5% e de ácido bórico a 0,3% da calda, para o controle preventivo de deficiências, além dos controles fitossanitários e demais tratamentos culturais.

Avaliou-se a produtividade de grãos das oito covas úteis, colhidos por derriça no pano, quando se estimou previamente na lavoura, a presença de 5%

de frutos verdes. Depois de colhidos os frutos, foram secados em terreiro cimentado, pesados e beneficiados. As quantidades de café beneficiado por parcela útil foram convertidas em produção de sacas de 60 kg por hectare. As produções de grãos de café beneficiados foram avaliadas por quatro safras, de 2009 até 2012, em cada local.

A amostragem para as determinações dos teores de nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn) nas folhas foram feitas, segundo recomendação de Malavolta (2006), ou seja, colhendo-se o terceiro e quarto pares de folhas a partir das pontas dos ramos laterais, inseridos na altura média da planta e ao seu redor, em junho de cada ano (MALAVOLTA, 1992), nas quatro safras, em cada local de cultivo.

Os teores de N nas folhas foi determinado por micro Kjeldahl (digestão sulfúrica), segundo metodologia descrita por Malavolta (2006). No extrato, obtido por digestão nitroperclórica, foram dosados os teores totais de P por colorimetria; o K por fotometria de chama; os de Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn por espectrofotometria de absorção atômica e os de S total por turbidimetria (MALAVOLTA, 2006).

As variáveis estudadas foram submetidas à análise de variância e estudos de regressão, utilizando-se o programa SISVAR, versão 5.3, cujas equações foram ajustadas à produtividade de grãos de café beneficiados, média de quatro safras, em função das doses de ácido cítrico aplicadas, em ambos os locais. E as figuras construídas utilizando-se também o Sigma Plot versão 10.

Baseando-se nas equações obtidas, estimaram-se as doses para 90 e 100% da produtividade máxima de grãos de café beneficiados.

As faixas de suficiência dos nutrientes nas folhas foram estimadas, substituindo-se as doses de ácido cítrico necessárias para obter 90 e 100% da produtividade máxima, nas equações que relacionam as doses aplicadas com seus teores dos nutrientes nas folhas para ambos os locais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Produtividade de grãos de café beneficiados

Pela análise de variância, para a produção de grãos de café, média de quatro safras, mostrou que as doses de ácido cítrico aplicadas nos dois solos influenciaram significativamente esta variável.

As equações quadráticas foram as que melhor se ajustaram à produtividade média, de quatro safras, de grãos de café para as doses de ácido cítrico nos solos avaliados (Figuras 1 e 2). O modelo explica aumentos significativos na produtividade de grãos com a aplicação das doses de ácido cítrico. Após atingir um ponto máximo, a produtividade decresce nos dois locais. Corroborando com Gebrim et al. (2008) que notaram que adição desse tipo de ácido em altas quantidades aumenta a lixiviação das bases trocáveis (K, Ca e Mg) do solo. Entretanto, é de fundamental importância o equilíbrio dos nutrientes na solução do solo (MALAVOLTA, 2006) e um condicionador de solo como esse, quando em altas doses, pode proporcionar um desequilíbrio das bases em vez do equilíbrio.

De acordo com Hoffmann et al. (1995), a “*Lei dos incrementos decrescentes*” é definida da forma que com os aumentos crescentes de fertilizantes, ou no caso, desequilíbrio destes no solo correspondem a aumentos decrescentes da produção”. Na ocasião, pode ter ocorrido a maior solubilização proporcionada pelo condicionador ácido cítrico, o que possivelmente proporcionou um desequilíbrio entre as bases.

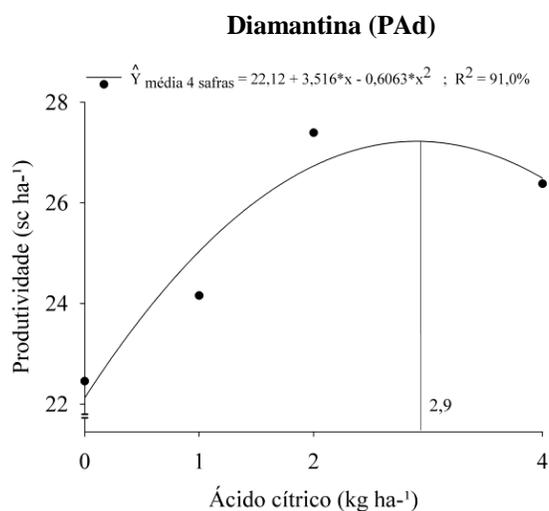


Figura 1 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável produtividade de grãos de café, média de quatro safras, em função das doses de ácido cítrico aplicadas no solo PAd. UFLA, Lavras - MG, 2015. (* e **significativo a 5 e 1% pelo teste t, respectivamente)

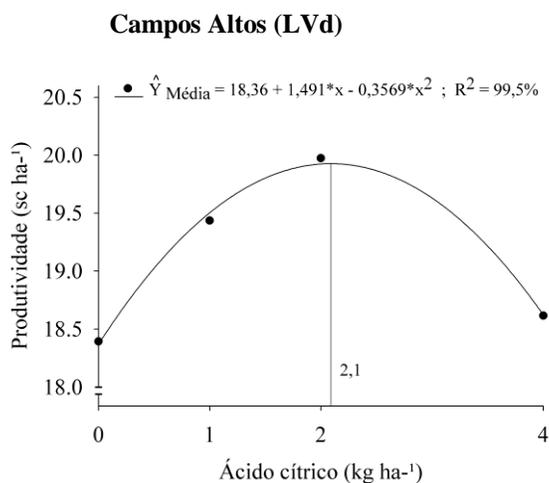


Figura 2 Representação gráfica, equações de regressão e coeficiente de determinação para a variável produtividade de grãos de café, média de quatro safras, em função das doses de ácido cítrico aplicadas no solo LVd. UFLA, Lavras - MG, 2015. (* e ** significativo a 5 e 1% pelo teste t, respectivamente)

Com base nas equações das Figuras 1 e 2, estimaram-se as produções e as doses de ácido cítrico, correspondentes à produtividade máxima e 90% da máxima (2,9 e 0,9 kg ha⁻¹ para Diamantina; 2,1 e 0,3 kg ha⁻¹ para Campos Altos). No índice de 90% da produção máxima, estima-se representar a máxima eficiência econômica para os dois locais (MALAVOLTA, 2006).

As doses de ácido cítrico permitiram a máxima produção e podem-se observar variações em função de cada local.

3.1.1 Produtividade máxima, econômica e teores foliares em Diamantina

Em Diamantina, pode-se observar que as doses de máxima produção média das quatro safras, para este solo, promoveram incrementos médios de 6,7 sacas ha⁻¹ ao ano. Desta forma, em quatro anos, com a aplicação de ácido cítrico, colheram-se em torno de 26,7 sacas ha⁻¹ a mais com a dose máxima média de 2,9 kg ha⁻¹ de ácido cítrico neste local (Figura 1).

Com base na equação da média das quatro safras (Figura 1), estimaram-se, além da produção máxima, também, a 90% da máxima (econômica) e as doses de ácido cítrico correspondente as mesmas: 27,2 sacas ha⁻¹ e 24,5 sacas ha⁻¹, com as doses de 2,9 kg ha⁻¹ e 0,9 kg ha⁻¹ respectivamente.

Assim, observamos um ganho de 23,0% e 10,7% em produção máxima e econômica, valores estes, próximos e, inclusive, um pouco acima dos relatados por Jayarama, Shankar e Souza (1998), em cafeeiros na Índia, que conseguiram incrementos de 5 a 7% sobre a produtividade de café, com uma aplicação recomendada de 1,5 kg ha⁻¹ de ácido cítrico.

Pode-se relacionar esse ganho de produção na média dos quatro anos, com os teores foliares desta lavoura a partir do aumento das doses de ácido cítrico, como acréscimos nos teores foliares de P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn e Zn. Além de, possivelmente, promover um reequilíbrio destes nutrientes no solo e,

consequentemente, interno foliar nos teores de S e B e, por fim, não alterar o N foliar (Tabela 2).

Tabela 2 Equações de regressão ajustadas para teores foliares de nutrientes (y) como variável dependente das doses de ácido cítrico (x = kg ha⁻¹), média de quatro safras em Diamantina (PAd). UFLA, Lavras - MG, 2015

Variável	Equações de regressão	R ²
.....Diamantina (PAd)		
N (dag kg ⁻¹)	y = 2,66 ^{ns}	-
P (dag kg ⁻¹)	y = 0,113 + 0,065 ⁺ x - 0,0151*x ²	0,83
K (dag kg ⁻¹)	y = 2,68 + 0,216*x - 0,0444*x ²	0,82
Ca (dag kg ⁻¹)	y = 0,99 + 0,098**x - 0,0220*x ²	0,99
Mg (dag kg ⁻¹)	y = 0,12 + 0,021**x - 0,0037*x ²	0,99
S (dag kg ⁻¹)	y = 0,269 - 0,0244**x	0,80
B (mg kg ⁻¹)	y = 65,99 - 2,6775**x	0,78
Cu (mg kg ⁻¹)	y = 19,43 + 21,080**x - 4,3514**x ²	0,76
Fe (mg kg ⁻¹)	y = 92,3 + 3,6028**x	0,92
Mn (mg kg ⁻¹)	y = 78,9 + 2,6521**x	0,77
Zn (mg kg ⁻¹)	y = 23,5 + 17,915*x - 3,0213**x ²	0,92

⁺, * e **significativo a 10%, 5% e 1% pelo teste t, respectivamente.

Esta melhor resposta à produção é explicada pelo efeito de que o ácido cítrico promoveu no solo com teor de P muito baixo (Tabela 1) e que, mesmo o extrator utilizado (Mehlich 1) seja menos sensível para a detecção de P, quando se aplica ácido cítrico (SANTOS, 2012), logo, a planta começa a ser responsiva a partir de doses maiores do mesmo com a solubilização do P adsorvido no solo (JAYARAMA; SHANKAR; SOUZA, 1998) (Figura 1). Consequentemente, há um aumento da fitodisponibilidade de P no solo, solubilizando P de P-Al, P-Fe e P-Ca por meio da quebra destes precipitados, que, inclusive, também foi relatado por Bolan et al. (1994).

Nota-se, também, que, além da maior fitodisponibilidade do P, Fe e Ca, e um conseqüente maior teor nas folhas, as outras bases como K e Mg também aumentaram o seu teor foliar (Tabela 2). Possivelmente, explicado pelo desenvolvimento de cargas negativas na superfície dos argilominerais neste solo de carga variável, o que, também, foi relatado por Bolan et al. (1994).

Além disso, estes ácidos orgânicos tornaram o Zn trocável com maior capacidade de dessorção, ou seja, solubilizando-o no solo (XUE; HUANG, 1995); e disponibilizando os demais micronutrientes (Cu e Mn) essenciais para as plantas. Martinez et al. (2003), estudando o estado nutricional e as produtividades de quatro regiões cafeeiras de Minas Gerais, notaram que os maiores desequilíbrios são observados em relação aos micronutrientes, sendo as lavouras mais equilibradas nutricionalmente as mais produtivas tanto no ano de alta carga quanto no de baixa.

Observa-se diminuição linear tanto do S como do B nos teores foliares (decrêscimos de $0,0244 \text{ dag kg}^{-1}$ e $2,6775 \text{ mg kg}^{-1}$ para cada unidade de ácido cítrico aplicada, respectivamente) e ao mesmo tempo aumento de produção neste local (Tabela 2). Entretanto, tal comportamento é explicado por Alvarez et al. (2007) que, com o aumento dos ácidos orgânicos no solo, aumenta competição aniônica entre o citrato e sulfato, abaixando o teor disponível deste último para as plantas. O decréscimo do B, com aumento das doses do ácido cítrico, é explicado pelo efeito diluição na planta, pois, o mesmo é pouco móvel (COELHO, 1973) e, como a planta produziu mais, tal fato explica tal efeito, ou seja, maior uso e exportação deste nutriente.

3.1.2 Produtividade máxima, econômica e teores foliares em Campos Altos

Observando a produção média das quatro safras para este local, notam-se incrementos médios de $1,6 \text{ sacas ha}^{-1}$ ao ano. Ou seja, em quatro anos, com a

aplicação de ácido cítrico, colheram -se em torno de 6,4 sacas ha^{-1} a mais do que no tratamento controle (zero kg ha^{-1} de ácido cítrico) (Figura 2). Um ganho de 8,5% em produtividade com a dose máxima de 2,1 kg ha^{-1} de ácido cítrico, valores estes, também próximos aos relatados por Jayarama, Shankar e Souza (1998) de incrementos de 5 a 7% sobre a produtividade de café, com uma aplicação recomendada de 1,5 kg ha^{-1} de ácido cítrico.

Baseando-se na equação da média das quatro safras (Figura 2), estimaram-se, além da produção máxima, também, a 90% da máxima (econômica) e as doses de ácido cítrico correspondente às mesmas: 19,9 sacas ha^{-1} e 18,4 sacas ha^{-1} , com as doses de 2,1 kg ha^{-1} e 0,3 kg ha^{-1} respectivamente.

Relaciona-se esse ganho de produção na média dos quatro anos, com os teores foliares correspondentes ao aumento das doses de ácido cítrico, como equilíbrio nutricional da absorção das bases K, Ca e Mg e dos ânions P e S, além de influenciar também os micronutrientes Fe e Zn foliares.

Tal equilíbrio nutricional da absorção de bases, primeiramente se explica, no caso do K, ocorrendo um decréscimo linear (Tabela 3) com o aumento das doses de ácido cítrico. Tal efeito acontece em decorrência da cinética de liberação do K em latossolos sob aplicação de ácidos orgânicos ser maior do que em outros solos (SILVA et al., 2008). Assim, tal ácido promoveu maior disponibilidade deste nutriente para equilibrar seu teor no solo e, conseqüentemente sua absorção na planta, também relatado por Gebrim et al. (2008).

Tabela 3 Equações de regressão ajustadas para teores foliares de nutrientes (y) como variável dependente das doses de ácido cítrico (x = kg ha⁻¹), média de quatro safras em Campos Altos (LVd). UFLA, Lavras - MG, 2015

Variável	Equações de regressão	R ²
.....Campos Altos (LVd).....		
N (dag kg ⁻¹)	y = 2,83 ^{ns}	-
P (dag kg ⁻¹)	y = 0,157 - 0,0048*x	0,97
K (dag kg ⁻¹)	y = 3,26 - 0,0932**x	0,83
Ca (dag kg ⁻¹)	y = 1,65 - 0,219**x + 0,0542**x ²	0,93
Mg (dag kg ⁻¹)	y = 0,17 - 0,028**x + 0,0050*x ²	0,81
S (dag kg ⁻¹)	y = 0,403 - 0,0625*x + 0,0119*x ²	0,74
B (mg kg ⁻¹)	y = 68,9 ^{ns}	-
Cu (mg kg ⁻¹)	y = 23,7 ^{ns}	-
Fe (mg kg ⁻¹)	y = 98,4 - 9,576**x + 1,7428*x ²	0,85
Mn (mg kg ⁻¹)	y = 117,6 ^{ns}	-
Zn (mg kg ⁻¹)	y = 31,9 - 2,2285**x	0,85

⁺, * e **significativo a 10%, 5% e 1% pelo teste t, respectivamente.

Observando os teores de Ca e Mg foliares, nota-se que houve também diminuição quadrática em resposta à aplicação de ácido cítrico (Tabela 3). Gebrim et al. (2008) relataram que, com a adição do ácido cítrico, se, em concentrações acima das ideais, pode vir a aumentar a lixiviação das bases trocáveis no solo, como é o caso do Ca e Mg, e, conseqüentemente, seu teor diminui nas plantas.

Observa-se diminuição linear tanto dos ânions P como o S nos teores foliares (decréscimos de 0,0048 e 0,0115 dag kg⁻¹ para cada unidade de ácido cítrico aplicado, respectivamente) (Tabela 3) e ao mesmo tempo aumento de produção também em Campos Altos (LVd) (Figura 2). Entretanto, tal comportamento do S é explicado por Alvarez et al. (2007) que, com o aumento dos ácidos orgânicos no solo, aumenta competição aniônica entre o citrato e sulfato, abaixando o teor disponível deste último para as plantas e, no caso do P,

por este solo ser argiloso (480 g kg^{-1} de argila) e de seu carbono orgânico (implantação do experimento) ser médio (Tabela 1), conseqüentemente, este solo é muito tamponado, logo, estes decréscimos de P na folha não podem ser atribuídos somente ao efeito da aplicação de ácido orgânico.

Apesar do B, Cu e Mn foliares não terem sido influenciados pela aplicação de ácido cítrico na média de safras em Campos Altos (LVd), o Fe e o Zn foram, e de forma quadrática e linear negativa, respectivamente (Tabela 3). Provavelmente, alguma parte do ácido cítrico adicionado ao solo tenha sido utilizada formando o precipitado citrato de ferro, e, sendo seu teor fitodisponível sendo inicialmente menor com posterior aumento de liberação Fe em solução, efeito semelhante observado em um Alfissolo por Chatterjee, Datta e Manjaiah (2015). No caso do Zn foliar ter diminuído linearmente, pode ter duas explicações: ou, em virtude da formação de ponte metálica do Zn e o ácido orgânico no solo que, segundo Guppy et al. (2005), promove um aumento dos sítios de adsorção nos coloides do solo, desta forma, ficando menos fitodisponível às plantas. No caso, por ser um solo argiloso, ou, em razão do P que, sendo liberado em solução (porém o Mehlich 1 não é sensível ao mesmo, como explicado por Santos (2012)) com o aumento das doses de ácido cítrico tem efeito antagônico ao Zn na absorção pelas plantas (ABREU et al., 2007) e, com o aumento das doses do ácido orgânico, ocorre um provável desbalanço de nutrientes.

Para os dois locais estudados (Diamantina e Campos Altos), as doses correspondentes a 90% da máxima produção de grãos indicam reduções médias de 69% e 84% de ácido cítrico, respectivamente, para se atingir a produção máxima. Essas grandes reduções na dose do ácido é acompanhada de uma redução de apenas 10% da produção, representando, assim, uma considerável economia e, ao mesmo tempo uma otimização da aplicação deste ácido orgânico

via solo e levando certamente a uma relação custo/benefício substancialmente menor, considerando os seus benefícios de incrementos de produção observados.

Na literatura de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas se exemplificam que, em experimentos de campo, geralmente, não há viabilidade econômica quando se busca a produção máxima. Isto porque, de acordo com a “Lei dos incrementos decrescentes”, os incrementos crescentes de fertilizantes correspondem a aumentos decrescentes da produção, e a “colheita máxima econômica” situa-se sempre pouco abaixo da colheita máxima fisiológica (HOFFMANN et al., 1995; RAIJ, 1991). No presente trabalho, ressalta-se, também, a importância de se saber a “colheita máxima econômica” com o uso deste solubilizador e condicionador de solo, que é o ácido cítrico.

3.2 Faixas de suficiência de nutrientes pelo uso de ácido cítrico

As equações que relacionam os nutrientes nas folhas, e as doses de ácido cítrico aplicadas no PAd (Diamantina) e LVd (Campos Altos) foram apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Com as doses de ácido cítrico, correspondentes à produção máxima e de 90% da máxima (econômica) estimadas para cada local (2,9 e 0,9 kg ha⁻¹ para Diamantina; 2,1 e 0,3 kg ha⁻¹ para Campos Altos) e substituindo-as nas equações ajustadas para os teores foliares de cada nutriente foliar (Tabela 2 e 3), estimaram-se as faixas de suficiência dos mesmos para os dois locais (Tabela 4).

Os modelos quadráticos e lineares ajustaram-se aos teores dos nutrientes nas folhas, em função das doses aplicadas de ácido cítrico, com exceção do N que não foi significativo em ambos os locais (Tabela 2 e 3). Além do N, o B, o Cu e o Mn também não foram significativos para Campos Altos (Tabela 3), logo, não foram estudadas suas faixas de suficiência dos mesmos.

Tabela 4 Faixas de suficiência de nutrientes nas folhas do cafeeiro em dois solos e média destas, para 90-100% da produção máxima sob o efeito de aplicação de ácido cítrico via solo. UFLA, Lavras - MG, 2015

Nutriente	PAd ^{1/}		LVd ^{2/}		Média ^{3/}	
	90%	100%	90%	100%	90%	100%
N (dag kg ⁻¹)	-	-	-	-	-	-
P (dag kg ⁻¹)	0,16	0,30	0,16	0,15	0,16	0,22
K (dag kg ⁻¹)	2,85	2,94	3,23	3,07	3,04	3,00
Ca (dag kg ⁻¹)	1,06	1,09	1,59	1,43	1,32	1,26
Mg (dag kg ⁻¹)	0,14	0,15	0,16	0,13	0,15	0,14
S (dag kg ⁻¹)	0,25	0,20	0,37	0,35	0,31	0,27
B (mg kg ⁻¹)	63,55	58,23	-	-	-	-
Cu (mg kg ⁻¹)	35,01	43,97	-	-	-	-
Fe (mg kg ⁻¹)	95,58	102,75	95,51	86,19	95,55	94,47
Mn (mg kg ⁻¹)	81,31	86,59	-	-	-	-
Zn (mg kg ⁻¹)	16,15	28,89	31,19	27,42	23,67	28,16

^{1/} Diamantina

^{2/} Campos Altos

^{3/} Médias dos dois locais.

Em Diamantina, observa-se que houve aumento quadrático dos teores de P foliar com aumento das doses de ácido cítrico (Tabela 2). Considerando-se nas doses estimadas para obtenção de 90 e 100% da produção máxima, 0,9 kg ha⁻¹ e 2,9 kg ha⁻¹ respectivamente, e substituindo-as nas equações ajustadas nos teores de P nas folhas do cafeeiro, em função das doses aplicadas de ácido cítrico, estimaram-se as faixas de suficiência de P para média das quatro safras (Tabela 4). O conceito de faixa crítica utilizada foi aquele proposto por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), que define faixa crítica como a amplitude de teores do nutriente na folha abaixo da qual a colheita reduz-se e acima da qual a adubação não é econômica.

Entretanto, como neste estudo, não se trabalha com doses de nutrientes igual proposto por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997), determinou-se na ocasião as faixas de suficiência sob o uso de ácido cítrico anidro (P.A.) via solo.

A faixa de suficiência de 0,16 a 0,30 dag kg⁻¹ de P para Diamantina (Tabela 4), está dentro das faixas determinadas em algumas regiões de Minas Gerais (Matiello (1997) de 0,16-0,19 dag kg⁻¹; Martinez et al. (2003) de 0,12-0,20 dag kg⁻¹; Farnezi, Silva e Guimarães (2009) de 0,18-0,22 dag kg⁻¹), inclusive, a faixa proposta por Farnezi, Silva e Guimarães (2009) para região do Alto Jequitinhonha, foi a que mais se ajustou a este local. Entretanto um pouco acima do adequado determinado por Martinez et al. (2004) (0,10-0,15 dag kg⁻¹ de P), mesmo não sendo a época de amostragem de folhas igual às referenciadas, segundo Malavolta (1992) não há muita diferença nos teores foliares do cafeeiro ao longo do ano.

Em Campos Altos, a faixa crítica de 0,16 a 0,15 dag kg⁻¹ de P (Tabela 4), está dentro das faixas determinadas em algumas regiões de Minas Gerais (MATIELLO, 1997; MARTINEZ et al., 2003; MARTINEZ et al., 2004).

A faixa crítica de K para Diamantina foi de 2,85 a 2,94 dag kg⁻¹ (Tabela 4), está acima do adequado indicado por diversos autores que determinaram para cafeeiros em produção (Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) de 2,20-2,50 dag kg⁻¹; Matiello (1997) de 1,80-2,50 dag kg⁻¹; Martinez et al. (2003) de 1,80-2,66 dag kg⁻¹) inclusive a de Farnezi, Silva e Guimarães (2009) de 1,72-2,10 dag kg⁻¹. Entretanto, está adequada a faixa proposta por Martinez et al. (2004) de 2,24 a 3,10 dag kg⁻¹ de K.

Em Campos Altos, a faixa de suficiência obtida para o K foi de 3,23 a 3,07 dag kg⁻¹, e, está acima do adequado indicado por diversos autores que determinaram para cafeeiros em produção (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997; MARTINEZ et al., 2003; MARTINEZ et al., 2004; MATIELLO, 1997).

Para Diamantina, a faixa de suficiência de Ca (1,06 a 1,09 dag kg⁻¹) (Tabela 4) observou-se que está um pouco abaixo da determinada para a região por Farnezi, Silva e Guimarães (2009) de 1,26 a 1,51 dag kg⁻¹. Inclusive, abaixo também das determinadas por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) de 1,30 a 1,50 dag kg⁻¹. Entretanto, estão dentro da faixa adequada por outros autores (Matiello (1997) de 1,00 a 1,50 dag kg⁻¹; Martinez et al. (2003) de 0,89 a 1,12 dag kg⁻¹; Martinez et al. (2004) de 1,00 a 1,34 dag kg⁻¹).

Em Campos Altos, tanto a faixas de suficiência do Ca (1,59 a 1,43 dag kg⁻¹) foi acima das faixas proposta por alguns autores (MARTINEZ et al., 2003; MARTINEZ et al., 2004) e dentro das determinadas por outros (Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) de 1,30 a 1,50 dag kg⁻¹ e a de Matiello (1997) de 1,00 a 1,50 dag kg⁻¹).

As faixas de Mg foliar tanto para Diamantina (0,14 a 0,15 dag kg⁻¹) quanto para Campos Altos (0,16 a 0,13 dag kg⁻¹) (Tabela 4), pode-se observar que estão abaixo de todas encontradas na literatura para diversas regiões de Minas Gerais (Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) de 0,40-0,45 dag kg⁻¹; Matiello (1997) de 0,35-0,50 dag kg⁻¹; Martinez et al. (2003) de 0,31-0,41 dag kg⁻¹; Martinez et al. (2004) de 0,36-0,52 dag kg⁻¹; Farnezi, Silva e Guimarães (2009) de 0,29-0,35 dag kg⁻¹). Um dos motivos que pode explicar isso (independente dos tratamentos aplicados neste trabalho), é que, atualmente, existe uma legislação que não obriga as mineradoras a ter uma relação compatível de óxidos de Ca e de Mg proporcionais, sendo exigido somente o somatório mínimo de 38% de óxidos (%CaO + %MgO) (PRIMAVESI; PRIMAVESI, 2004), desta forma, os teores de óxidos de Mg são encontrados em concentração abaixo da adequada.

Observou-se uma faixa de 0,25 a 0,20 e de 0,37 a 0,35 dag kg⁻¹ de S para Diamantina e Campos Altos, respectivamente (Tabela 4). Para Diamantina, esta faixa não está adequada somente para Martinez et al. (2004) que é de 0,13-0,18

dag kg^{-1} de S. Entretanto, sua faixa de suficiência está dentro da faixa crítica determinada para a região (FARNEZI; SILVA; GUIMARÃES, 2009) de 0,13-0,32 dag kg^{-1} de S. Já a faixa de suficiência de S para Campos Altos (0,37-0,35 dag kg^{-1}) está acima de todos os autores comparados (Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) de 0,15-0,20 dag kg^{-1} ; Matiello (1997) de 0,15-0,20 dag kg^{-1} ; Martinez et al. (2003) de 0,19-0,25 dag kg^{-1} ; Martinez et al. (2004) de 0,13-0,18 dag kg^{-1}), com exceção de Farnezi, Silva e Guimarães (2009). Demonstrando que esta competição aniônica entre o citrato e o sulfato, explicado por Alvarez et al. (2007), não interfere nos teores de S da produção máxima.

Obteve-se a faixa de suficiência estimada do B para a dose recomendável de ácido cítrico para obtenção de 90 e 100% da produção máxima somente para Diamantina, com procedimento igual ao utilizado para o P, K, Ca, Mg e S foliar. Notou-se que a faixa de suficiência de 63,55-58,23 mg kg^{-1} (Tabela 4) mostrou-se um pouco abaixo da faixa determinada para o Alto Jequitinhonha (Farnezi, Silva e Guimarães (2009) de 83,8-96,3 mg kg^{-1}), no entanto, esta faixa esteve dentro dos valores adequados para as outras regiões cafeeiras, não sendo assim, classificado como deficiência elevada.

A faixa de suficiência de Cu (35,01-43,97 mg kg^{-1}) (Tabela 4) para Diamantina está acima da determinada para tal região por Farnezi, Silva e Guimarães (2009) de 5,7-9,3 mg kg^{-1} , no entanto, tal faixa está dentro das estipuladas por Matiello (1997) de 10-50 mg kg^{-1} e Martinez et al. (2004) de 26-72 mg kg^{-1} .

A faixa de suficiência do Fe de 95,6-102,8 mg kg^{-1} (Tabela 4) para Diamantina está dentro do adequado descrito na literatura consultada (Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) de 100-130 mg kg^{-1} ; Matiello (1997) de 100-200 mg kg^{-1} ; Martinez et al. (2003) de 48-125 mg kg^{-1} ; Martinez et al. (2004) de 94-159 mg kg^{-1}), inclusive na de Farnezi, Silva e Guimarães (2009) 67-116 mg kg^{-1} que foi desenvolvida na mesma região. As faixas críticas de Campos Altos

foram inferiores (95,51-86,19 mg kg⁻¹) somente do que as faixas propostas por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) e Matiello (1997).

A faixa crítica do Mn foliar em Diamantina, de 81,31-86,59 mg kg⁻¹ (Tabela 4) encontra-se dentro das faixas dos demais autores para lavouras cafeeiras em produção (Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) de 80-100 mg kg⁻¹; Matiello (1997) de 50-100 mg kg⁻¹; Martinez et al. (2003) de 71-177 mg kg⁻¹; Martinez et al. (2004) de 77-141 mg kg⁻¹) contudo, mostrou-se abaixo dos teores determinados para esta região (Farnezi, Silva e Guimarães (2009) de 219-422 mg kg⁻¹), provavelmente explicado pela ausência de aplicação deste micronutriente na lavoura.

Os teores de Zn para Diamantina de 16,15-28,90 mg kg⁻¹ (Tabela 4) estão dentro dos determinados para tal região por Farnezi, Silva e Guimarães (2009) de 17,4-30,0 mg kg⁻¹ e, também, para outras regiões de Minas Gerais (Malavolta, Vitti e Oliveira (1997) de 15-20 mg kg⁻¹; Matiello (1997) de 10-20 mg kg⁻¹; Martinez et al. (2004) de 10-30 mg kg⁻¹), e um pouco acima da determinada por Martinez et al. (2003) de 7-11 mg kg⁻¹. Em Campos Altos, a faixa de suficiência de 31,19-27,42 mg kg⁻¹ está acima das determinadas por Malavolta, Vitti e Oliveira (1997); Martinez et al. (2003) e Matiello (1997), entretanto, está de acordo com as faixas críticas determinadas por Martinez et al. (2004) e Farnezi, Silva e Guimarães (2009).

Para futuros trabalhos, é aconselhável mais estudos da aplicação do ácido cítrico em diferentes regiões cafeeiras determinando também suas faixas de suficiência correlacionando com a produtividade, bem como o uso de diferentes doses de adubações de N, P e K com o uso deste ácido.

4 CONCLUSÕES

O cafeeiro apresenta melhor resposta em produtividade de grãos para a média de quatro safras com doses de 0,9 kg ha⁻¹ e 2,9 kg ha⁻¹ de ácido cítrico para dose econômica e máxima, respectivamente, com ganhos médios de até 23,0 % em Diamantina.

Para Campos Altos as doses de 0,3 kg ha⁻¹ e 2,0 kg ha⁻¹ de ácido cítrico, dose econômica e a máxima, respectivamente, com ganhos de até 8,5%.

O melhor equilíbrio do estado nutricional das lavouras cafeeiras em estudo é influenciado com pequenas aplicações de ácido cítrico.

As faixas de suficiência para a produtividade média de quatro safras do cafeeiro, correspondentes a 90-100% da produção máxima nas folhas sob aplicação de ácido cítrico nos dois locais, foram de: 0,16-0,22 dag kg⁻¹ para P; 3,04-3,00 dag kg⁻¹ para K; 1,32-1,26 dag kg⁻¹ para Ca; 0,15-0,14 dag kg⁻¹ para Mg; 0,31-0,27 dag kg⁻¹ para S; 63,55-58,23 mg kg⁻¹ para B (somente Diamantina); 35,01-43,97 mg kg⁻¹ para Cu (somente Diamantina); 95,55-94,47 mg kg⁻¹ para Fe; 81,31-86,59 mg kg⁻¹ para Mn (somente Diamantina); 23,67-28,16 mg kg⁻¹ para Zn.

ABSTRACT

Exogenous use of low molecular weight organic acids has been very recently tested in agriculture. However, studies conducted to test the effect of these acids, especially citric acid, by means of nutritional analysis in plants, are of fundamental importance. The objective in this study was to evaluate productivity, nutritional status, and sufficiency range of nutrients in coffee (*Coffea arabica*), during four harvesting seasons, subjected to the application of citric acid (CA) in two regions of Minas Gerais (MG), Brazil. The experiment was conducted in a private farm presenting Yellow Argisols dystrophic (YAd) in Diamantina (MG), and another in Campos Altos (MG), presenting Red Oxisol dystrophic (ROd). We used seedlings from *Coffea arabica* cultivar Catuaí Vermelho IAC-99, with four and six years of age, using one plant per hole, with spacing of 4.0 x 0.80 m and 4.0 x 0.75 m, respectively. The experiment was performed using completely randomized block design, with four blocks and two replicates per treatments. The treatments were comprised of four doses of CA (0, 1, 2 and 4 kg ha⁻¹), with a single application via watering can, under the projection of the tree canopy, in December 2008, 2009, 2010 and 2011. Coffee bean productivity and nutrient content were recorded during four harvesting seasons (from 2009 to 2012), in each location. Leaf nutrient sufficiency ranges were evaluated using an average of four harvests. The positive response for bean productivity was observed with the application of citric acid, obtaining gain of 23.0 and 8.5% in Diamantina and Campos Altos, respectively. The nutrient sufficiency range corresponds to 90-100 %, and the maximum productivity of leaves when applying CA were of: 0.16-0.22 dag kg⁻¹ for P; 3.04-3.00 dag kg⁻¹ for K; 1.32-1.26 dag kg⁻¹ for Ca; 0.15- 0.14 dag kg⁻¹ for Mg; 0.31-0.27 dag kg⁻¹ for S; 63.55-58.23 mg kg⁻¹ for B (only in Diamantina); 35.01-43.97 mg kg⁻¹ for Cu (only in Diamantina); 95.55-94.47 mg kg⁻¹ for Fe; 81.31-86.59 mg kg⁻¹ for Mn (only in Diamantina); 23.67-28.16 mg kg⁻¹ for Zn.

Keywords: Organic acids. *Coffea arabica*. Soil conditioner. Mineral nutrition. Productivity

REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A. de et al. **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 720 p.
- ALVAREZ, V. V. H. et al. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. 156 p.
- 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.
- BANZATTO, D. A.; KRONKA, S. N. **Experimentação agrícola**. 4. ed. Jaboticabal: FUNEP, 2006. 237 p.
- BOLAN, N. S. et al. Influence of low-molecular-weight organic acids on the solubilization of phosphates. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 18, n. 4, p. 311-319, Dec. 1994.
- CHATTERJEE, D.; DATTA, S. C.; MANJIAIAH, K. M. Effect of citric acid treatment on release of phosphorus, aluminium and iron from three dissimilar soils of India. **Archives of Agronomy and Soil Science**, Oxford, v. 61, n. 1, p. 105-117, May 2015.
- COELHO, F. S. Nitrogênio no solo e na planta. In: INSTITUTO CAMPINEIRO DE ENSINO AGRÍCOLA. **Fertilidade do solo**. 2. ed. Campinas: ICEA, 1973. p. 16-64.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DE SOLO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: CFSEMG, 1999. 320 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2006. 306 p.
- FARNEZI, M. M. M.; SILVA, E. B.; GUIMARÃES, P. T. G. Diagnose nutricional de cafeeiros da região do Alto Jequitinhonha (MG): normas DRIS e faixas críticas de nutrientes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p.969-978, 2009.

FRANCO, B. A. H. et al. Influência da aplicação de ácido cítrico na produtividade e nos componentes de produção do feijoeiro cultivado em neossoloquartzarênico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: CBCS, 2009. 1 CD ROM.

GEBRIM, F. O. et al. Lixiviação de cátions favorecida pela presença de ânions inorgânicos e ácidos orgânicos de baixa massa molecular em solos adubados com camadas de aviário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2255-2267, nov./dez. 2008.

GUIMARÃES, P. T. G.; et al. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; VIEGAS, V. H. A. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 289-302.

GUPPY, C. N. et al. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v. 43, n. 2, p. 189-202, Apr. 2005.

HOFFMANN, C. R. et al. O nitrogênio e o fósforo no crescimento da braquiária e do colônio em amostras de um latossolo da região Noroeste do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 79-86, 1995.

JAYARAMA, V.; SHANKAR, B. N.; SOUZA, V. M. D. Effect of citric acid on the solubility of phosphorus in coffee soils. **Indian Coffee**, Bangalore, v. 12, p. 13-15, 1998.

KOCHIAN, L. V.; HOEKENGA, O. A.; PIÑEROS, M. A. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. **Annual Review of Plant Biology**, Palo Alto, v. 55, p. 459-493, 2004.

LEMOS, V. T. **Action of citric acid on growth, nutritional status and productivity of coffee Arabica**. 2012. 64 p. Dissertation (Masters in Vegetable Production) - Federal University of the Jequitinhonha and Mucuri Valleys, Diamantina, 2012.

MALAVOLTA, E. **ABC da análise de solos e folhas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1992. 124 p.

_____. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Ceres, 2006. 631 p.

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

MARTINEZ, H. E. P. et al. Faixas críticas de concentrações de nutrientes e avaliação do estado nutricional de cafeeiros em quatro regiões de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 6, p. 703-713, jun. 2003.

_____. **Nutrição mineral, fertilidade do solo e produtividade do cafeeiro nas regiões de Patrocínio, Manhuaçu, Viçosa, São Sebastião do Paraíso e Guaxupé**. Belo Horizonte: EPAMIG, 2004. 60 p. (Boletim Técnico, 72).

MATIELLO, J. B. **Gosto do meu cafezal**. Rio de Janeiro: Globo, 1997. 139 p.

MELO, B. de et al. Fontes e doses de fósforo no desenvolvimento e produção do cafeeiro, em um solo originalmente sob vegetação de Cerrado de Patrocínio - MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 2, p. 315-321, mar./abr. 2005.

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**, Washington, v. 168, n. 3, p. 334-340, June 2005.

PRIMAVESI, A. C.; PRIMAVESI, O. **Características de corretivos agrícolas**. São Carlos: Embrapa, 2004. 25 p. (Documentos, 37).

RAGHOTHAMA, K. G.; KARTHIKEYAN, A. S. Phosphate acquisition. **Plant and Soil**, The Hague, v. 274, p. 37-49, 2005.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, 1991. 343 p.

REIS JÚNIOR, R. A. et al. Diagnose nutricional de cafeeiros da região sul de Minas Gerais: normas DRIS e teores foliares adequados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 801-808, jul./ago. 2002.

SANTOS, S. R. **Forms and bioavailability of phosphorus in the soil in response to the addition of citric acid**. 2012. 33 p. Dissertation (Masters in Vegetable Production) - Federal University of the Jequitinhonha and Mucuri Valley, Diamantina, 2012.

SILVA, E. B.; NOGUEIRA, F. D.; GUIMARÃES, P. T. G. Resposta do cafeeiro à aplicação de zinco e ácido cítrico no solo. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 4., 2005, Londrina. **Anais...** Londrina: Embrapa Café, 2005 1 CD ROM.

SILVA, V. A. et al. Kinetics of K release from soils of Brazilian coffee: effect of organic acids. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, p. 533-540, mar./abr. 2008.

XUE, J.; HUANG, P. M. Zinc adsorption-desorption on short-range ordered iron oxide as influenced by citric acid during its formation. **Geoderma**, Amsterdam, v.64, n. 3-4, p. 343-356, Jan. 1995.