**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Nível crítico de cálcio para o desenvolvimento de mudas do café arábica

Lucas Caixeta Vieira

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

**Piracicaba
2020**

Lucas Caixeta Vieira
Engenheiro Agrônomo

Nível crítico de cálcio para o desenvolvimento de mudas do café arábica
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LAÉRCIO FAVARIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia

Piracicaba
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Vieira, Lucas Caixeta

Nível crítico de cálcio para o desenvolvimento de mudas do café arábica /
Lucas Caixeta Vieira. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018
de 2011. - - Piracicaba, 2020.

34 p.

Dissertação (Mestrado) - USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de
Queiroz”.

1. Produção relativa 2. Consumo de luxo 3. Eficiência de recuperação de cálcio
I. Título

*Dedico este trabalho, a meus pais,
Lauro Afonso Vieira e
Maria Aparecida Caixeta Vieira,
grandes colaboradores e incentivadores.*

*“Tenho a impressão de ter sido uma
criança brincando à beira-mar,
divertindo-me em descobrir uma
pedrinha mais lisa ou uma concha
mais bonita que as outras,
enquanto o imenso oceano da verdade
continua misterioso diante de meus olhos”.*

(Isaac Newton)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida e de meus familiares, pela saúde e, principalmente, por permitir que eu tivesse forças para suportar todas as dificuldades pessoais enfrentadas durante o período do mestrado.

Agradeço aos meus pais pelo suporte mental e financeiro durante esta etapa. Agradeço meu pai Lauro Afonso Vieira por sempre me apoiar e inspirar na caminhada do AGRO, e minha mãe Maria Aparecida Caixeta Vieira por sempre dedicar seu tempo livre em prol da educação dos filhos.

Agradeço aos meus irmãos Leandro Caixeta Vieira e Lauro Afonso Vieira Filho pelos ensinamentos e companheirismo de sempre. Esses são os irmãos que eu sempre agradeço a Deus em minhas orações.

Agradeço, em especial, a Elisangela Souza Caixeta e Amanda Caixeta Campos, que por consequências da vida, vieram morar conosco na casa de nossa família e acabamos ganhando mais duas irmãs. Vocês foram fundamentais para esta conquista.

Agradeço a minha noiva Fernanda Caroline Silva Paula por sempre me dar forças para continuar e dedicar horas do seu dia para me apoiar durante a escrita deste trabalho. Agradeço também a meus sogros (Antonio Cunha de Paula e Marlene Silva Paula) por sempre me terem como filho.

Agradeço ao meu orientador e amigo, José Laércio Favarin, pelo suporte, apoio, companheirismo e, principalmente, compaixão e entendimento dos problemas enfrentados durante o mestrado.

Agradeço ao Paulo Mazzafera e José Lavres Júnior por aceitarem participar do comitê de acompanhamento e estarem presentes sempre que solicitados.

Agradeço aos meus amigos e colaboradores da ESALQ/USP pela receptividade e apoio durante toda minha estadia em Piracicaba/SP. Em especial, aos amigos do Laboratório Multiusuário do Departamento de Produção Vegetal.

Agradeço a todos os colaboradores da ESALQ/USP, a PPG e ao Departamento de fitotecnia (Produção Vegetal). Agradeço também à banca julgadora deste trabalho, pelas considerações feitas.

Agradeço ao Luiz de Queiroz, por ser um visionário e permitir que, hoje, esta “Escola” seja referência mundial no setor AGRO.

Agradeço ao João de Deus Godinho e Carlos Diego da Silva por todo o apoio durante a escrita deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos e mestres do MMA e BRAZILIAN JIU JITSU por serem peças fundamentais no controle da minha ansiedade e por auxiliarem na construção do meu autocontrole.

Agradeço ao Flávio Augusto, Robert T. Kiyosaki e Shirleyson Kaissner, por me inspirarem e auxiliarem na mudança do meu *mindset*.

Agradeço ao PROEX/CAPES pelo apoio financeiro concedido pela bolsa de mestrado. Esse recurso foi fundamental para minha pesquisa. Agradeço também ao Adilson Pereira Domingues Júnior pelo auxílio financeiro nas análises laboratoriais.

Por fim, agradeço a todos que auxiliaram de forma direta e indireta esta etapa da minha vida. Fica aqui registrado o meu muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	11
LISTA DE SÍMBOLOS	12
INTRODUÇÃO	13
MATERIAL E MÉTODOS	15
RESULTADOS.....	19
DISCUSSÃO	27
CONCLUSÕES	31
REFERÊNCIAS	33

RESUMO

Nível crítico de cálcio para o desenvolvimento de mudas do café arábica

O cálcio é um macronutriente secundário absorvido pelas plantas na forma de cátion (Ca^{2+}). Nível crítico (NC) representa o teor trocável do nutriente no solo responsável por 90% de produção relativa. Com isto, objetivou-se na presente pesquisa determinar o NC de Ca, por meio do extrator resina aniônica, para o desenvolvimento de mudas de café arábica, a fim de estabelecer três classes de teores com base na produção relativa (PR) de massa seca da muda de café arábica, a saber: teor baixo (< 90% de PR), teor médio (90 a 100% de PR) e teor alto (> 100% de PR). Esta pesquisa foi realizada em casa de vegetação, na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (USP/ESALQ), no município de Piracicaba/SP, Brasil, com início dia 02/08/2018. O experimento foi instalado em delineamento experimental de blocos casualizados (DBC), com sete tratamentos e quatro repetições. Cada unidade experimental foi composta por uma planta em vaso de 8 dm^3 em substrato areia lavada. Os teores de Ca trocáveis (3, 5, 7, 9, 11 e $22 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) representam os tratamentos, definidos a partir do controle, o qual tinha o menor teor de Ca ($1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), após sucessivas lavagens da areia com água destilada. Os tratamentos foram obtidos com a aplicação de Cloreto de Cálcio, a fim de não alterar o pH e fornecer apenas Ca. O excedente da solução nutritiva, após a aplicação das mesmas e após as irrigações, era coletado em vidro preso aos vasos, a fim de retornar o material lixiviado. Foram utilizadas mudas do cultivar Obatã Amarelo IAC 4739 transplantadas com três pares de folhas expandidas. A produção relativa de biomassa superior a 90% ocorreu com o teor de $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca trocável no substrato. A eficiência de recuperação de Ca associada ao NC, evidenciou consumo de luxo pelo cafeeiro arábica. Determinou-se três classes de teores de Ca trocável para fim de interpretação: teor baixo (< $5,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), teor médio ($5,0$ a $17,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e teor alto (> $17,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Os produtores de café arábica devem ficar atentos com os teores de Ca no solo, visto que mesmo com níveis acima de $5,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca, já se é possível atingir o teor médio. Porém, doses elevadas podem apresentar correlações negativas fracas, regulares e fortes com macro e micronutrientes, bem como elevação desnecessária no custo de produção.

Palavras-chave: Produção relativa; Consumo de luxo; Eficiência de recuperação de cálcio

ABSTRACT

Critical calcium level for the development of arabica coffee seedlings

Calcium is a secondary macronutrient absorbed by plants in the form of a cation (Ca^{2+}). Critical level (NC) represents the exchangeable content of the nutrient in the soil responsible for 90% of relative production. With this, the objective of this research was to determine the NC of Ca, by means of the anionic resin extractor, for the development of Arabica coffee seedlings, in order to establish three classes of contents based on the relative production (PR) of dry mass of Arabica coffee seedling, namely: low content (<90% of PR), medium content (90 to 100% of PR) and high content (> 100% of PR). This research was carried out in a greenhouse, at the School of Agriculture “Luiz de Queiroz” (USP / ESALQ), in the municipality of Piracicaba / SP, Brazil, starting on 02/08/2018. The experiment was installed in a randomized block design (DBC), with seven treatments and four replications. Each experimental unit was composed of a plant in an 8 dm^{-3} pot on a washed sand substrate. The exchangeable Ca contents (3, 5, 7, 9, 11 and $22 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) represent the treatments, defined from the control, which had the lowest Ca content ($1 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), after successive washes of sand with distilled water. The treatments were obtained with the application of Calcium Chloride, in order not to alter the pH and provide only Ca. The excess of the nutrient solution, after application and after irrigation, was collected in glass attached to the pots, in order to return the leachate material. Seedlings of the cultivar Obatã Amarelo IAC 4739 transplanted with three pairs of expanded leaves were used. The relative biomass production above 90% occurred with the content of $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ of exchangeable Ca in the substrate. The efficiency of Ca recovery associated with NC, showed luxury consumption by Arabica coffee. Three classes of exchangeable Ca content were determined for interpretation: low content (< $5.0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), medium content (5.0 to $17.5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) and high content (> $17.5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Arabica coffee producers should pay attention to the Ca content in the soil, since even with levels above $5.0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ of Ca, it is already possible to reach the average content. However, high doses can present weak, regular and strong negative correlations with macro and micronutrients, as well as unnecessary increase in production cost.

Keywords: Relative production; Luxury consumption; Calcium recovery efficiency

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Vermiculita + areia em diferentes proporções (a), areia lavada com água comum (b), sistema interno dos vasos (c) e areia lavada com água comum + água destilada (d). Piracicaba, SP, Brasil.. 16
- Figura 2.** Figura 2. Corte superficial das raízes (a), muda nua (b), fracionamento em parte aérea e raízes após 120 dias (c), substratos preparados para análise química (d), folhas em moinho Wiley (e), materiais vegetativos para análise química (f) e sistema externo dos vasos (g). Piracicaba, SP, Brasil..... 17
- Figura 3.** Produção relativa de massa seca de café arábica (a) e eficiência de recuperação (b) em função do teor de Ca trocável no substrato. Piracicaba, SP, Brasil. 20
- Figura 4.** Altura de plantas (a, mm), diâmetro de caule (b, mm) e número de folhas (c) de mudas de café em função do teor de Ca trocável, nas várias épocas de avaliação. Piracicaba, SP, Brasil 21
- Figura 5.** Teores dos macronutrientes primários na parte aérea (a), raiz (b), total (c) e secundários na parte aérea (d), raiz (e), total (f) nas mudas de café arábica, em função do teor de Ca trocável do substrato. Piracicaba, SP, Brasil 23
- Figura 6.** Teores de micronutrientes na parte aérea (a), raiz (b), total (c) nas mudas de café arábica, em função do teor de Ca trocável no substrato. Piracicaba, SP, Brasil 24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Equações de regressão e coeficiente de correlação das figuras 1 e 2. Piracicaba, SP, Brasil	22
Tabela 2. Equações de regressão e coeficiente de correlação das figuras 3 e 4. Piracicaba, SP, Brasil	25
Tabela 3. Correlações (coeficiente de correlação de Pearson) entre os nutrientes em plantas de café arábica. Piracicaba, SP, Brasil	26

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

B reg	Regressão linear para o boro
Ca reg	Regressão linear para o cálcio
Cu reg	Regressão linear para o cobre
DBC	Delineamento em blocos casualizados
ERCa	Eficiência de recuperação pela planta do Ca^{2+} aplicado
ESALQ	Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
et al.	e colaboradores
Fe reg	Regressão linear para o ferro
IAC	Instituto Agronômico de Campinas
K reg	Regressão linear para o potássio
Mg reg	Regressão linear para o magnésio
Mn reg	Regressão linear para o manganês
N reg	Regressão linear para o nitrogênio
NC	Nível crítico
P reg	Regressão linear para o fósforo
QAd	Quantidade do nutriente absorvida pela planta na parcela adubada
QAp	Quantidade do nutriente aplicada no solo
QNAd	Quantidade do nutriente absorvida pela planta na parcela não adubada
S reg	Regressão linear para o enxofre
SP	São Paulo
USP	Universidade de São Paulo
Zn reg	Regressão linear para o zinco

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
<90%	Menor do que 90%
>100%	Maior do que 100%
B	Boro
Ca	Cálcio
Ca ²⁺	Cálcio
CaCl ₂	Cloreto de Cálcio
cm	Centímetros
Cu	Cobre
Fe	Ferro
Zn	Zinco
K	Potássio
L	Litros
Mg	Magnésio
mL	Mililitro
mmol _c dm ⁻³	milimol de carga por decímetro cúbico
Mn	Manganês
N	Nitrogênio
NaOH	Hidróxido de Sódio
°C	Graus Celsius
P	Fósforo
pH	Potencial hidrogeniônico
r	Coeficiente de correlação
S	Enxofre
t ha ⁻¹	Toneladas por hectare
y	Equação de regressão

INTRODUÇÃO

No Brasil, grande parte das lavouras cafeeiras estão localizadas em regiões de solos intemperizados, especificamente em áreas anteriormente ocupadas por vegetação de cerrado. Estes solos são naturalmente ácidos, com baixa disponibilidade de nutrientes. Nessa condição, uma prática indispensável é o uso de calcário, a fim de elevar o pH do solo. O uso desse material, com alta concentração de Ca na composição, eleva muito a quantidade trocável desse elemento. O predomínio de Ca no complexo de troca mantém a solução do solo com alta concentração desse cátion, superior aos demais cátions como o magnésio (Mg) e potássio (K). Por esta razão, nunca foi determinado o nível crítico de cálcio trocável para as culturas em geral, não apenas para o cafeeiro arábica.

O cálcio é um elemento químico absorvido pelas plantas na forma catiônica (Ca^{2+}), classificado para fim didático como macronutriente secundário. Os nutrientes entram em contato com as raízes por vários mecanismos (fluxo de massa, difusão e interceptação radicular). No caso do Ca os mecanismos principais são o fluxo de massa e a interceptação radicular. O fluxo de massa é responsável pelo movimento do elemento na direção das raízes da planta, o qual pode contribuir com até 300% do Ca absorvido pelas plantas em geral (Vargas, 1982). Essa absorção superior a 100% é denominada “consumo de luxo” e ocorre em razão da alta concentração desse cátion na solução de solos que receberam calcário. O consumo de luxo não necessariamente causa toxidez à planta (Costa et al., 2012; Wadt et al., 2012).

Para o cafeeiro, há na literatura indicação de que o teor trocável de Ca adequado para o desenvolvimento da cultura é de aproximadamente $20 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca, determinado por resina aniônica (Martinez & Neves, 2015; Mesquita et al., 2016). No entanto, Raij (2011) propôs uma faixa de variação bem inferior, entre $4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e $7 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca, e, ainda, comenta que esses valores podem estar superestimados, uma vez que a necessidade de Ca não é obtida isoladamente da correção do pH do solo.

As plantas geralmente absorvem uma quantidade de nutrientes acima da necessidade metabólica (Galindo et al., 2018). Em relação ao Ca, os níveis supracitados não foram obtidos isoladamente do efeito da correção da acidez do solo. Portanto, a planta estaria submetida a uma dose extra de Ca, responsável pelo consumo de luxo do nutriente (Vargas, 1982). Para o crescimento de raízes e da parte aérea, espera-se que os valores sejam inferiores, pelo fato desse elemento não ser aplicado como nutriente em todas as culturas, mas em consequência da correção da acidez do solo.

O nível crítico (NC) normalmente representa o teor trocável do nutriente responsável por 90% da produtividade máxima da cultura. No entanto, esse valor varia em razão de outros fatores como genótipo, órgão da planta analisado, idade da planta e da folha, dentre outros, o que impede a adoção de um nível crítico único (Coelho et al., 2013).

Finalmente, espera-se com a determinação do NC de Ca para o crescimento e desenvolvimento de mudas de café arábica, estabelecer a relação entre a produção relativa (PR) de massa seca de raízes e parte aérea (y) e o teor de Ca trocável (x), em substrato com diferentes teores do nutriente por meio de uma fonte que não o calcário, para estabelecer três classes de teores para fim de interpretação da fertilidade: teor baixo ($< 90\%$ de PR), teor médio (90 a 100% de PR) e teor alto ($> 100\%$ de PR).

Provavelmente o teor de Ca para fins de crescimento e produção de plantas serão diferentes dos valores apresentados em literaturas oficiais. Como o fluxo de massa se trata da relação entre volume, água transpirada e concentração do íon disponível no solo, mesmo que o estudo tenha sido feito com mudas, ele representa a relação entre a água transpirada para o volume e concentração do ambiente em que a muda está inserida e, em lavouras adultas, os valores obtidos estarão relacionados a este novo ambiente, ou seja, o potencial vegetativo será maior, assim como a transpiração, porém, trata-se da mesma concentração de íons em um determinado volume.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em casa de vegetação no Departamento de Produção Vegetal da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), localizada no município de Piracicaba/SP, Brasil, em 2018.

O delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados (DBC) com sete tratamentos e quatro repetições, no total de 28 unidades experimentais, compostas por vasos de polietileno com capacidade para 8 L. Os tratamentos foram 1, 3, 5, 7, 9, 11 e 22 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Ca. O tratamento controle foi 1 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Ca, valor este referente ao teor do nutriente disponível no substrato antes da instalação do experimento.

Inicialmente, foram coletadas amostras em diversos locais na cidade de Piracicaba/SP, com a finalidade encontrar solos com baixos níveis de Ca. Porém, mesmo em subsuperfície (camadas abaixo de 1 m) o menor valor encontrado foi 9 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Ca. Posteriormente, foram realizados testes com vermiculita (fina, média e grossa) associada a areia lavada, em diferentes proporções (Figura 1a). Entretanto, todos os testes apresentaram valores superiores à 5 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Ca, visto que como na composição da vermiculita encontra-se Ca, mesmo após sucessivas lavagens com produtos químicos para redução dos níveis deste elemento, posteriormente os valores eram elevados e retornavam para 5 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Ca.

Desta forma, para garantir que o teor de Ca no solo fosse oriundo apenas dos tratamentos, utilizou-se areia média peneirada como substrato. Em um estudo com diferentes substratos Tillmann et al. (1994) observaram que a areia foi satisfatória em comparação ao solo nos fatores analisados: densidade, espaço poroso total, retenção de água na capacidade de campo e espaço com ar na capacidade de campo. A areia foi lavada com água comum (Figura 1b) para retirar as impurezas e, posteriormente, com água destilada (Figura 1c). Após este processo, o pH foi corrigido para 6,5 com hidróxido de sódio (NaOH).

Figura 1. Vermiculita + areia em diferentes proporções (a), areia lavada com água comum (b), sistema interno dos vasos (c) e areia lavada com água comum + água destilada (d). Piracicaba, SP, Brasil.

As mudas utilizadas foram do cultivar Obatã Amarelo IAC 4739 transplantadas com três pares de folhas totalmente desenvolvidas. Foi realizado o corte à 2 cm do ápice radicular, afim de evitar que a raiz pivotante apresentasse “pião torto” (Figura 2a). Após o corte, foram lavadas com água destilada para eliminar as partículas aderidas às raízes – “muda nua” (Figura 2b).

Depois do transplântio, os nutrientes foram aplicados semanalmente, pela aplicação de 50 mL de solução adaptada de Hoagland & Arnon (1950), sem Ca, o qual foi fornecido isoladamente de acordo a dose de cada tratamento, uma única vez, no início do experimento. A fonte de Ca utilizada foi o cloreto de cálcio (CaCl_2), aplicado via solução nutritiva e o cloro foi ajustado para os demais tratamentos. Para atender a demanda de água foi construído um sistema individual para cada unidade experimental (vaso de 8 L), com mangueira no fundo dos vasos conectada a um recipiente de 2 L (Figura 2g). Diariamente, a solução excedente contida neste recipiente era retornada para os respectivos vasos.

As avaliações de crescimento das plantas foram feitas quinzenalmente (i) altura de plantas, (ii) diâmetro de caule (a 2 cm da superfície do solo), (iii) número de nós e de folhas expandidas. Para cada avaliação, foram realizadas três medidas e considerado o valor médio, afim de evitar erros advindos da medição manual. As plantas foram retiradas dos vasos após 120 dias, lavadas para a retirada de impurezas e fracionadas em parte aérea e raízes (Figura 2c). As amostras foram acondicionadas em estufa à 70 °C, secadas até atingirem massa constante e depois pesadas. Posteriormente, foram moídas em moinho tipo Wiley (Figura 2e) e o material vegetal foi submetido a análise química de macronutrientes e micronutrientes (Figura 2f), assim como os substratos (Figura 2d).

Figura 2. Corte do ápice radicular (a), “muda nua” (b), fracionamento em parte aérea e raízes após 120 dias (c), substratos preparados para análise química (d), folhas em moinho Wiley (e), materiais vegetativos para análise química (f) e sistema externo dos vasos (g). Piracicaba, SP, Brasil.

A eficiência de recuperação do Ca pela planta (total, somatório de parte aérea e raízes) foi calculada a partir da seguinte equação (Fageria, 1998):

$$ERCa = \left[\frac{(QAd - QNAd)}{QAp} \right] \times 100$$

em que: ERCa (%) corresponde a eficiência de recuperação pela planta do Ca aplicado, QAd (kg ha⁻¹) é a quantidade do nutriente absorvida pela planta na parcela adubada; QNAd (kg ha⁻¹) é a quantidade do nutriente absorvida pela planta na parcela não adubada; QAp (kg ha⁻¹) corresponde a quantidade do nutriente aplicada no substrato.

Os dados obtidos no experimento foram analisados quanto à homocedasticidade e a normalidade pelos testes de Levene e Shapiro-Wilk, respectivamente. Quando necessário foi realizada a transformação Box-Cox para cumprir os pré-requisitos da análise de variância (ANOVA). Em seguida, os dados de crescimento das plantas, eficiência de recuperação de Ca, quantidade de massa seca acumulada e extração de macronutrientes e micronutrientes foram submetidos à ANOVA, e para determinar as correlações entre as variáveis utilizou a correlação de Pearson. Posteriormente, quando pertinente as médias dos tratamentos foram analisadas por regressão, e escolhido o modelo de equação gerado que melhor se ajustou, visto que o mesmo respeitou a ANOVA da regressão e o comportamento dos fenômenos avaliados. Para todos os parâmetros estatísticos foi utilizado 5% de significância ($P < 0,05$).

RESULTADOS

O NC aplicado a relação entre doses de Ca e produção relativa permitiu o estabelecimento do modelo curvilíneo quadrático significativo, com um bom ajuste e alto coeficiente de correlação (Figura 3a). Com isto, observa-se que para obter produção relativa superior à 90% é necessário que se tenha pelo menos $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca no solo.

A ERCa forneceu resposta linear positiva em relação ao maior fornecimento de Ca, para parte aérea, raiz e total (Figura 3b). Este fator, associado ao acúmulo contínuo de Ca em função do aumento das doses, demonstra a existência do “consumo de luxo” do nutriente em mudas de café arábica, mesmo com a necessidade ideal atingida (NC proposto).

Figura 3. Produção relativa de massa seca de café arábica (a) e eficiência de recuperação (b) em função do teor de Ca trocável no substrato. Piracicaba, SP, Brasil.

Os resultados das avaliações biométricas foram obtidos pela relação entre o período de realização do experimento e as variáveis analisadas. No comparativo dos tratamentos, a altura, diâmetro e número de folhas das plantas (Figura 4), apresentaram regressões lineares significativas, com ajustes e coeficientes de correlação elevados (Tabela 1). Os dados obtidos nas avaliações do número de nós, não apresentaram diferença significativa entre os tratamentos, o que não resultou em variações lineares.

Figura 4. Altura de plantas (a, mm), diâmetro de caule (b, mm) e número de folhas (c) de mudas de café em função do teor de Ca trocável, nas várias épocas de avaliação. Piracicaba, SP, Brasil.

As equações de regressão linear e o coeficiente de correlação (r) das figuras 1 e 2, foram listados na Tabela 1. O termo item foi utilizado para referenciar as letras mencionadas nas figuras e, o termo subitem quando se referia à variável correspondente da presente pesquisa.

Tabela 1. Equações de regressão e coeficiente de correlação das figuras 1 e 2. Piracicaba, SP, Brasil

Figura	Item	Subitem	Equação de regressão	Coeficiente de correlação (r)
1	(a)	NC	$y = (-71.282 / x) + 104.1$	0.82
		PA reg	$y = 4.97x - 8.7381$	0.91
	(b)	R reg	$y = 4.9519x - 2.9845$	0.85
		T reg	$y = 4.853x - 5.9165$	0.96
2	(a)	----- mmol _c dm ⁻³ -----		
		1.0	$y = 0.3334x + 64.444$	0.98
		3.0	$y = 0.83x + 37.821$	0.94
		5.0	$y = 0.9056x + 42.141$	0.94
		7.0	$y = 0.9015x + 35.715$	0.95
		9.0	$y = 0.9459x + 41.544$	0.96
		11.0	$y = 1.0023x + 35.432$	0.95
		22.0	$y = 0.9939x + 30.587$	0.93
		----- mmol _c dm ⁻³ -----		
		1.0	$y = 0.0779x + 19.37$	0.96
		3.0	$y = 0.1244x + 16.256$	0.87
		5.0	$y = 0.1812x + 13.897$	0.96
	(b)	7.0	$y = 0.1875x + 13.156$	0.94
		9.0	$y = 0.2039x + 15.577$	0.95
		11.0	$y = 0.1891x + 15.185$	0.94
		22.0	$y = 0.1584x + 16.218$	0.92
		----- mmol _c dm ⁻³ -----		
		1.0	$y = 0.0404x + 8.54$	0.95
		3.0	$y = 0.0723x + 7.1025$	0.99
	(c)	5.0	$y = 0.0698x + 7.1096$	0.98
		7.0	$y = 0.0824x + 7.1279$	0.99
		9.0	$y = 0.1057x + 6.3525$	0.96
		11.0	$y = 0.1001x + 7.2336$	0.99
		22.0	$y = 0.0793x + 6.6707$	0.96

Na figura 5, observa-se os teores de macronutrientes primários e secundários na parte aérea, raiz e total. A coluna da esquerda faz referência aos macronutrientes primários (N, P e K), e a coluna da direita aos macronutrientes secundários (Ca, Mg e S). Os gráficos estão

ordenados em linhas, com relação a parte aérea, raiz e total, respectivamente. A figura 6 retrata os teores de micronutrientes na parte aérea, raiz e total, nos itens (a), (b) e (c).

Figura 5. Teores dos macronutrientes primários na parte aérea (a), raiz (b), total (c) e secundários na parte aérea (d), raiz (e), total (f) nas mudas de café arábica, em função do teor de Ca trocável do substrato. Piracicaba, SP, Brasil.

Figura 6. Teores de micronutrientes na parte aérea (a), raiz (b), total (c) nas mudas de café arábica, em função do teor de Ca trocável no substrato. Piracicaba, SP, Brasil.

As equações de regressão linear e o coeficiente de correlação (r) das figuras 3 e 4, foram listados na Tabela 2. Os termos “item” e “subitem” seguem as mesmas atribuições da Tabela 1.

Tabela 2. Equações de regressão e coeficiente de correlação das figuras 3 e 4. Piracicaba, SP, Brasil

Figura	Item	Subitem	Equação de regressão	Coeficiente de correlação (r)
3	(a)	N reg	$y = 0.672x + 24.815$	0.70
		P reg	$y = 0.0646x + 3.7225$	0.44
		K reg	$y = 0.1196x + 25.127$	0.58
	(b)	N reg	$y = 0.1306x + 22.98$	0.80
		P reg	$y = -0.0031x + 5.315$	0.04
		K reg	$y = 0.0902x + 30.893$	0.52
	(c)	N reg	$y = 0.7165x + 47.197$	0.72
		P reg	$y = 0.0533x + 8.981$	0.23
		K reg	$y = 0.2099x + 56.02$	0.66
	(d)	Ca reg	$y = 0.0549x + 2.3884$	0.48
		Mg reg	$y = 0.0114x + 1.2744$	0.53
		S reg	$y = -0.0059x + 1.8886$	0.26
	(e)	Ca reg	$y = 0.0241x + 1.7303$	0.48
		Mg reg	$y = 0.0195x + 2.2695$	0.60
		S reg	$y = 0.0363x + 4.3638$	0.73
	(f)	Ca reg	$y = 0.0791x + 4.1187$	0.49
		Mg reg	$y = 0.0365x + 3.6886$	0.32
		S reg	$y = 0.0304x + 6.2524$	0.59
4	(a)	Cu reg	$y = -0.0194x + 11.622$	0.08
		Fe reg	$y = -0.4381x + 304.4$	0.06
		Zn reg	$y = 0.0498x + 20.005$	0.14
		Mn reg	$y = 5.2978x + 243.84$	0.46
		B reg	$y = 0.1971x + 58.112$	0.13
	(b)	Cu reg	$y = -3.3351x + 202.32$	0.46
		Fe reg	$y = -0.7127x + 397.05$	0.10
		Zn reg	$y = 0.6689x + 156.78$	0.19
		Mn reg	$y = 1.3438x + 237.4$	0.24
		B reg	$y = -0.1925x + 27.94$	0.31
	(c)	Cu reg	$y = -3.3532x + 213.94$	0.46
		Fe reg	$y = -1.1519x + 701.44$	0.17
		Zn reg	$y = 0.7184x + 176.79$	0.21
		Mn reg	$y = 6.6443x + 481.22$	0.40
		B reg	$y = 0.0038x + 86.069$	-

As correlações podem ser classificadas como fracas (0 a 0,3), regulares (0,3 a 0,6) e fortes (0,6 a 0,9) de acordo com Callegari-Jacques (2007). Na Tabela 3, é possível observar as correlações positivas fortes entre os nutrientes: N (Ca e S), P (Cu) e K (Mg e B), Ca (Mg, Fe e Mn), Mg (Fe e Mn), S (Cu, Mn e B), Fe (Zn e Mn) e Zn (Mn), e as correlações negativas fortes: Ca (Cu) e Zn (B).

Tabela 3. Correlações (coeficiente de correlação de Pearson) entre os nutrientes nas mudas de café arábica. Piracicaba, SP, Brasil

Nutriente	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn
P	0.517 ⁽¹⁾ 0.005 ⁽²⁾									
K	0.546 0.003	0.490 0.008								
Ca	-0.097 0.622	-0.158 0.421	0.202 0.303							
Mg	-0.077 0.695	-0.237 0.224	0.096 0.627	0.882 0.000						
S	0.077 0.699	0.131 0.507	0.443 0.018	0.211 0.282	0.166 0.398					
Cu	-0.212 0.279	0.090 0.647	-0.261 0.179	-0.615 0.001	-0.470 0.012	-0.007 0.972				
Fe	-0.122 0.537	0.131 0.507	-0.247 0.206	-0.077 0.696	-0.004 0.985	-0.298 0.123	0.344 0.073			
Zn	-0.549 0.003	-0.306 0.113	-0.154 0.435	0.492 0.008	0.454 0.015	0.180 0.359	-0.127 0.518	-0.016 0.936		
Mn	-0.266 0.171	-0.367 0.055	0.122 0.535	0.600 0.001	0.650 0.000	-0.061 0.759	-0.518 0.005	-0.059 0.767	0.623 0.000	
B	0.341 0.075	0.259 0.184	-0.074 0.710	-0.367 0.055	-0.188 0.337	0.058 0.768	0.361 0.059	0.290 0.135	-0.608 0.001	-0.659 0.000

Conteúdo da Célula: Correlação de Pearson ⁽¹⁾; Valor-*p* ⁽²⁾.

DISCUSSÃO

O NC para mudas de café arábica demonstra que para se obter produção relativa superior à 90%, o teor trocável deve ser superior a $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca. Este valor, é inferior aos limites mínimos encontrados na literatura de 12,1 a $24,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e entre 20,1 e $31,3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca (Mesquita et al., 2016; Sousa et al., 2018), respectivamente. Porém, sempre que for indicado níveis de Ca considerando estudos oriundos em que foi feita a correção da acidez com materiais que possuem Ca em sua composição (Laviola et al., 2007), estes valores estarão superestimados.

A quantidade disponível de um determinado nutriente no solo, pode refletir na eficiência de recuperação na planta, logo, os trabalhos supracitados levaram em consideração a correção com a utilização do calcário, com elevados índices de Ca na sua composição. Na Figura 3b, foi observado que mesmo com valores superiores ao NC proposto, a planta continuou acumulando Ca. Isto ocorreu devido ao “consumo de luxo”, observado também na cultura do milho por Vargas (1982), com o fluxo de massa responsável pelo maior acúmulo do elemento na planta, o qual pode chegar a 300%. Galindo et al. (2018) também observaram tal fenômeno para o K em estudo com forrageiras, com quantidade acima da sua necessidade metabólica, acumulada em organelas da célula vegetal, como nos cloroplastos, nas mitocôndrias e, especialmente, nos vacúolos.

Como no presente estudo foi utilizado semanalmente solução de Hoagland & Arnon para fornecimento dos nutrientes, exceto o Ca, não houve limitação no fornecimento dos demais nutrientes para o café arábica. Nas plantas e nas algas, os recursos tendem a ser consumidos em excesso quando os suprimentos de N ou P não limitam o crescimento (Riley et al., 2019). Neste estudo, os autores observaram que os fungos micorrízicos arbusculares, obtidos em campo de trigo na Austrália e, inoculados e cultivados com milho, apresentaram interação positiva com a disponibilidade de nutriente para as plantas e isto afetou diretamente o “consumo de luxo”.

Os dados das avaliações biométricas mostraram que independente da variável analisada, altura, diâmetro do caule e número de folhas, aos 15 dias de experimento, o tratamento controle apresentou os maiores resultados. Isso pode ter ocorrido pelo efeito de salinização das adubações, visto que para os outros tratamentos, além da solução de Hoagland & Arnon aplicada, também houve aplicação de Ca e, estas mudas jovens podem ter sentido este efeito. O mesmo foi observado nos trabalhos de Oliveira Filho et al. (2018) para o crescimento de cultivares de pimentão em função da adubação potássica, e Gomes et al.

(2019) no estudo com pau-brasil em viveiro florestal. Porém, o inverso ocorreu ao final do experimento, visto que o nível de Ca disponível para as plantas, no tratamento controle, foi insuficiente para o pleno desenvolvimento.

Por fim, observou-se que com $3 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca, aos 120 dias, não houve diferença significativa em relação ao tratamento controle para o diâmetro de caule. Se mostrando também, insuficiente em comparação aos demais tratamentos. Porém, observa-se que os demais tratamentos não apresentaram diferença entre si, ou seja, a dose de $5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca é suficiente para o pleno desenvolvimento nestas condições analisadas, conforme já havia sido sugerido por Raij (2011).

Na figura 5, nota-se forte interação do N em relação ao aumento do teor de Ca no solo para parte aérea, raiz e total (Tabela 2). Para o K, houve interação positiva, porém, o coeficiente angular da reta foi menor. Lana et al. (2010) também observaram essa interação do K em seu trabalho com 59 lavouras comerciais de café arábica na região do Alto Paranaíba/MG. Para o P, houve relação positiva para parte aérea e negativa para a raiz, podendo ser explicado pelo balanço nutricional ocorrido na planta, como reflexo da correlação negativa (Tabela 3). Por fim, observa-se que os macronutrientes primários apresentaram interação positiva em função do teor de Ca disponível no solo.

Na figura 5, para os macronutrientes secundários, observou-se que o coeficiente angular da reta foi acentuado para o Ca em relação ao aumento do teor de Ca no solo para todas as variáveis analisadas, parte aérea, raiz e total. Isso reforça novamente a ideia de que o Ca, mesmo em níveis satisfatórios, continua sendo absorvido e acumulado pela planta. Para o Mg, houve interação positiva, porém, o coeficiente angular da reta foi menor. Ai et al. (2017) também observaram este comportamento do Mg (relação positiva) em seu trabalho com seis variedades de aveia em quatro estágios de crescimento.

Para o S, houve relação negativa para parte aérea e positiva para a raiz, podendo também ser explicado pelo balanço nutricional ocorrido na planta. Starling et al. (2018) em estudo sobre a variabilidade e equilíbrio nutricional de genótipos de café canéfora também observaram este balanço nutricional do S. Contudo, a correlação de Pearson para o S indicou efeito positivo para Zn e B e negativo para Cu, Fe e Mn (Tabela 3). Por fim, observa-se que assim como os macronutrientes primários, os secundários também apresentaram interação positiva em função do teor de Ca disponível no solo.

Na figura 6, observou-se elevado coeficiente angular da reta de Mn em relação ao aumento do teor de Ca no solo para todas as variáveis analisadas, parte aérea, raiz e total (Tabela 2). Para o Zn, houve interação positiva, porém, com coeficiente angular inferior. O

Boro apresentou interação neutra. Houve forte interação negativa do Cu. Para o Fe, também houve interação negativa, porém, não tão acentuada. Na tabela 3, também é possível observar que, na planta, o Ca apresentou correlação negativa com o Cu, Fe e B. Esses fatores podem ter ocorrido devido a competição por cargas positivas no solo, conforme foi observado por Alfaia & Muraoka (1997) em estudo com aplicações de até 5 t ha⁻¹ de calcário em rotação de culturas (soja, arroz e feijão caupi). Njoroge et al. (2018) observaram que a deficiência dos micronutrientes são as principais causas de baixos rendimentos de milho em solos pouco responsivos, pois este fenômeno minimiza a eficiência agronômica dos fertilizantes N, P e K e, consequentemente, resulta em um benefício cada vez menor pelo seu uso.

CONCLUSÕES

A partir da determinação do nível crítico de Ca, pode-se estabelecer três classes de teores trocáveis, com base na produção relativa de massa seca: teor baixo ($< 5,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$), teor médio ($5,0 \text{ a } 17,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e teor alto ($> 17,5 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

Por meio da associação do nível crítico com a eficiência de recuperação de Ca, conclui-se que há consumo de luxo desse nutriente, sem apresentar sintomas visíveis.

Os produtores de café arábica devem ficar atentos com os teores de Ca no solo, visto que mesmo com níveis acima de $5,0 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de Ca, já se é possível atingir o teor médio. Porém, doses elevadas podem apresentar correlações negativas fracas, regulares e fortes com macro e micronutrientes, bem como elevação desnecessária no custo de produção.

REFERÊNCIAS

- Ai Z, Wang G, Liang C, Liu H, Zhang J, Xue S, Liu G. Os efeitos da adição de nitrogênio na absorção e alocação de macro e micronutrientes em *Bothriochloa ischaemum* no platô loess na China. *Front Plant Sci.* 2017;8:1–12.
- Alfaia S, Muraoka T, Amarelo L, Effect R, Rotation C. Efeito residual de calagem e micronutrientes em latossolo amarelo sob rotação de culturas. *Acta Amaz.* 1997;27:153–162.
- Callegari-Jacques, Sidia M. Bioestatística (recurso eletrônico): princípios e aplicações. Porto Alegre-RS; 2007. p. 78-83.
- Coelho FS, Fontes PCR, Cecon PR, Braun H, da Silva IR. Valor e predição do nível crítico de índices para avaliar o estado nitrogenado da batateira. *Rev Cienc Agron.* 2013;44:115–122.
- Costa MS, Da Costa ZVB, Alves SMC, Ferreira Neto M, Marinho MJC. Avaliação Nutricional Do Milho Cultivado Com Diferentes Doses De Efluente Doméstico Tratado. *Irriga.* 2012;1:12–26.
- Fageria NK. Otimizando a eficiência do uso de nutrientes na produção agrícola. *R Bras Eng Agríc Ambient.* 1998;2:6–16.
- Galindo FS, Buzetti S, Teixeira Filho MCM, Dupas E, Ludkiewicz MGZ. Acúmulo De Matéria Seca E Nutrientes No Capim-Mombaça Em Função Do Manejo Da Adubação Nitrogenada. *J Neotrop Agric.* 2018;5:1–9.
- Gomes SHM, Gonçalves FB, Ferreira RA, Pereira FRM, Ribeiro MM de J. Avaliação dos parâmetros morfológicos da qualidade de mudas de *Paubrasilia echinata* (pau-brasil) em viveiro florestal. *Sci Plena.* 2019;15:1–10.
- Hoagland DC, Arnon DI. O método de cultura de água para o cultivo de plantas sem solo. Experiência agrícola da Califórnia. *Circ. 337. Coll. Agric. Univ. California. Berkeley.* 1950.
- Lana RMQ, Oliveira SA de, Lana ÂMQ, Faria MV de. Levantamento do estado nutricional de plantas de *coffea arabica* L. pelo dris, na região do Alto Paranaíba - Minas Gerais. *Rev Bras Ciência do Solo.* 2010;34:1147–1156.
- Laviola BG, Martinez HEP, Salomão LCC, Cruz CD, Mendonça SM. Acúmulo de nutrientes em frutos de cafeeiro em quatro altitudes de cultivo: Cálcio, magnésio e enxofre. *Rev Bras Cienc do Solo.* 2007;31:1451–1462.
- Martinez, H.E.P.; Neves JCL. Café Arábica do plantio à colheita. Nutrição Mineral calagem, gessagem e adubação. Viçosa-MG; 2015. p. 64–103.
- Mesquita CM de, Rezende JE de, Carvalho JS, Junior MAF, Moraes NC, Dias PT, Carvalho RM de, Araújo WG de. Manual do café: manejo de cafezais em produção. Belo Horizonte: EMATER-MG, 2016. 72 p. il.

Njoroge R, Otinga AN, Okalebo JR, Pepela M, Merckx R. Milho (*Zea mays* L.) Resposta a secundários e micronutrientes para o uso rentável de fertilizantes N, P e K em solos pouco responsivos. *Agronomy*. 2018;8:1–20.

Oliveira Filho P, Valnir Júnior M, Almeida CL de, Lima JS, Costa J do N, Rocha JPA da. Crescimento De Cultivares De Pimentão Em Função Da Adubação Potássica. *Rev Bras Agric Irrig*. 2018;12:2814–2822.

Raij, B. Fertilidade Do Solo e Manejo de Nutrientes. International Plant Nutrition Institute. Piracicaba-SP; 2011. 420p.

Rohan C. Riley, Timothy R. Cavagnaro, Chris Brien, F. Andrew Smith, Sally E. Smith, Bettina Berger, Trevor Garnett, Rebecca Stonor, Rhiannon K. Schilling, Zhong-Hua Chen JRP. A alocação de recursos para o crescimento ou o consumo de luxo gera respostas micorrízicas. *Ecol Lett*. 2019;1–10.

Sousa JS, Neves JCL, Martinez HEP, Alvarez VH V. Relação entre análise de folhas de café e análise química do solo. *Rev Bras Cienc do Solo*. 2018;42:1–13.

Starling LCT, Martins LD, Rodrigues WN, Reinicke TM, Do Amaral JFT, Tomaz MA, Espindula MC. Variabilidade e equilíbrio nutricional entre genótipos de *coffea canephora* (Rubiaceae) na seca versus suprimento adequado de água. *Genet Mol Res*. 2018;17:1–13.

Tillmann MAA, Cavariani C, Piana Z, Minami K. Comparação entre diversos substratos no enraizamento de estacas de crotón (*Codiaeum variegatum* L.). *Sci Agric*. 1994;51:17–20. van Raij B. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute; 2011.

Vargas RMB. Mecanismos de suprimento de K, Ca, Mg e P as raízes de milho em solos do Rio Grande do Sul. 1982.

Wadt PGS, da Silva LM, Catani V, Felisberto FA V. Faixas de Suficiência para Interpretação dos Teores de Nutrientes Foliares em Pimenta- longa (*Piper hispidinervum*) – Primeira Aproximação. *Embrapa*. 2012;6.