



Atributos do solo, foliar e qualidade da bebida de cafeeiros em sistema convencional e orgânico

Jéssica de Melo GONÇALVES ¹, Wagner José Villela dos REIS ², Gilberto Rodrigues LISKI ³,
Anderson de Souza GALLO ³, Anastacia FONTANETTI ³, Alberto Carlos de Campos BERNARDI ⁴,
Marta Regina VERRUMA-BERNARDI ^{*1,3}

¹ Programa de Pós-Graduação em Agroecologia e Desenvolvimento Rural, Universidade Federal de São Carlos, Araras, SP, Brasil.

² Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

³ Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Araras, SP, Brasil.

⁴ Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP, Brasil.

*E-mail: verrumba@ufscar.br

Submetido em: 18/01/2025; Aceito em: 15/09/2025; Publicado em: 22/09/2025.

RESUMO: O objetivo foi avaliar os atributos químicos do solo e da folha, qualidade do grão e da bebida café (*Coffea arabica* L.) cultivados em sistemas convencionais e orgânicos. Amostras de solo e tecido foliar foram avaliadas para teores dos macro- e micronutrientes. A bebida foi analisada quanto aos 11 atributos sensoriais (Specialty Coffee Association). O sistema orgânico apresentou os maiores teores médios de S (70,45 mg dm⁻³) e P (61,30 mg dm⁻³) no solo, enquanto o sistema convencional apresentou maiores teores de Zn (14,50 mg dm⁻³) e K (1,60 mmolc dm⁻³). Os níveis de N, P, Mg e B foram mais altos nas folhas dos cafeeiros cultivados convencionalmente, enquanto as folhas dos cafeeiros cultivados organicamente tinham níveis maiores de K e Zn. O cultivo orgânico resultou em níveis mais altos de sólidos solúveis totais (22,4) e maiores diâmetros de grãos de café. Os atributos sensoriais da bebida de café foram semelhantes nos dois sistemas, com pontuação de 83, o que a classifica como café especial. Os resultados indicaram que foi possível obter cafés de qualidade tanto no sistema orgânico como no convencional.

Palavras-chave: agricultura orgânica; fertilidade do solo; sensorial.

Soil, leaf attributes, and beverage quality of the coffee tree in conventional and organic systems

ABSTRACT: The objective was to evaluate the chemical attributes of the soil and leaves and the quality of the coffee bean and beverage (*Coffea arabica* L.) grown in conventional and organic systems. Soil and leaf tissue samples were evaluated for macro and micronutrient levels. The drink was analyzed for 11 sensory attributes (Specialty Coffee Association). The organic system presented the highest average levels of S (70.45 mg dm⁻³) and P (61.30 mg dm⁻³) in the soil, while the conventional system presented higher levels of Zn (14.50 mg dm⁻³) and K (1.60 mmolc dm⁻³). N, P, Mg, and B levels were higher in leaves from conventionally grown coffee trees, while leaves from organically grown coffee trees had higher levels of K and Zn. Organic cultivation resulted in higher total soluble solids (22.4 °) and larger coffee bean diameters. The sensory attributes of the coffee drink were similar in both systems, with a score of 83, which classifies them as specialty coffees. The results indicated that it was possible to obtain quality coffees in both the organic and conventional systems.

Keywords: organic agriculture; soil fertility; sensorial.

1. INTRODUÇÃO

Uma das questões quanto à produção de café em sistema orgânico é como a fertilidade do solo e o estado nutricional das plantas nesse sistema influenciam a qualidade dos grãos e da bebida. Responder a essa pergunta pode ajudar os cafeicultores a obter cafés de melhor qualidade e alcançar nichos de mercado específicos que pagam prêmio por qualidade, somado à promoção de serviços ecossistêmicos ligados ao aumento da biodiversidade, uma das premissas dos sistemas orgânicos no Brasil (BRASIL 2003a).

Torrez et al. (2023) concluíram que cultivos de café em sistemas com maior biodiversidade, entendida como porcentagem e diversidade de árvores de sombra, proporcionaram melhor uso da água e qualidade do café. Por

outro lado, a menor biodiversidade resultou em perdas de serviços ecológicos como a polinização e reduziu a qualidade dos grãos.

As entradas de nutrientes nos cafezais convencionais e orgânicos variam tanto em quantidade quanto em forma (NESPER et al., 2018). Os fertilizantes minerais são aplicados em proporções e quantidades que atendem à necessidade das plantas, sendo facilmente absorvidos. Já os fertilizantes orgânicos como esterco de animais, composto e vermicomposto precisam passar por transformações microbianas antes de serem absorvidos pelas plantas. Os nutrientes exportados em maiores quantidades são o nitrogênio e o potássio, por concentrarem-se nos grãos (TORRES et al., 2022; SANTOS et al., 2023). As diferenças

na construção da fertilidade dos solos entre os sistemas orgânico e convencional de café não se resumem à forma e proporção de fertilizantes utilizados.

Os atributos químicos do solo e consequentemente o estado nutricional dos cafeeiros resultam de práticas aplicadas ao longo do tempo e variam de acordo com a organização do espaço (MORINIGO et al., 2017). Além disso, outros fatores influenciam a composição química dos grãos e a qualidade da bebida, tais como genéticos (intrínsecos aos genótipos/variedades), edafoclimáticos (altitude, regime hídrico, tipo de solo) e o beneficiamento dos frutos e grãos (SUNAHARUM et al., 2014). Malta et al. (2008) observaram superioridade das bebidas de cafés advindas de lavoura em conversão para o sistema orgânico em relação ao da lavoura desenvolvida no sistema convencional. Contudo, poucos trabalhos abordam as diferenças na construção da fertilidade do solo entre os cultivos convencionais e orgânicos e as implicações no estado nutricional das plantas e na qualidade do café.

Assim, objetivou-se com esse estudo avaliar atributos químicos do solo, estado nutricional das plantas e a qualidade de grãos e bebida de cafeeiros cultivados em sistemas convencionais e orgânicos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no município de Poço Fundo, Minas Gerais, Brasil, durante a safra 2020/21, em dois talhões com 0,20 ha cada, sendo um conduzido em sistema convencional (21° 46.143'S, longitude 46° 1.355'O, e 1.070 de altitude) e outro em sistema orgânico (21° 46.171'S e 46° 1.345'O, e 1.050 de altitude). O clima da região é classificado como Cfa (Köppen-Geiger), caracterizado por clima temperado úmido com verão quente. O solo das áreas foi classificado como Latossolo Vermelho, equivalente a Rhodic Hapludox na classificação do USDA (SOIL SURVEY STAFF, 2014). A classe textural dos solos dos dois talhões está descrita na Tabela 1.

Tabela 1. Teores de argila, silte, areia e classificação textural dos solos das lavouras cafeeiras nos sistemas convencional e orgânico. Table 1. Clay, silt, sand contents and textural classification of soils in coffee crops in conventional and organic systems.

Fração	Sistema		Especificação
	Convencional	Orgânico	
	(g kg ⁻¹)		
Argila	507,50	560,62	Densímetro
Silte	81,25	93,75	Densímetro
Areia	411,25	345,62	Densímetro
Classificação	Argiloso	Argiloso	Triângulo Textural

Os talhões foram implantados no ano de 2000 com a variedade Catuai Vermelho (*Coffea arabica* L.). O espaçamento utilizado para ambos os sistemas foi 2,5 m entre as linhas do cafeeiro e 1 m entre plantas. A área de cultivo orgânico é certificada e desde 2003 segue as diretrizes da legislação brasileira para agricultura orgânica (Brasil, 2003a). A área recebeu fertilização com farinha de osso parcelada em duas aplicações de 500 g por planta, em novembro de 2019 e fevereiro de 2020. Além disso, foi cultivado feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) nas entrelinhas do café, em setembro de 2019. O talhão de café convencional recebeu três adubações minerais na dose de 150 g do formulado NPK (20-00-10), e aplicação foliar dos micronutrientes boro e

zinco em três aplicações nos meses de outubro e dezembro de 2020 e fevereiro de 2021. Os tratamentos culturais relacionados à adubação, capina, arruação e colheita foram realizados manualmente, em ambos os talhões.

2.1. Amostragem do solo e análise dos atributos químicos

As avaliações dos atributos químicos do solo foram realizadas no mês de julho de 2021. Foram coletadas em cada sistema, na projeção da copa dos cafeeiros, quatro amostras compostas de solos, obtidas a partir de dez subamostras simples, na profundidade de 0-0,20 m, advindas de dez pontos, distribuídos aleatoriamente. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e enviadas para análise química em laboratório. Foram analisados pH (CaCl₂), matéria orgânica (MO), alumínio (Al), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), fósforo (P), enxofre (S), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn) (RAIJ et al., 2001).

2.2. Amostragem de folhas e análise química do tecido foliar

As amostras foliares dos cafeeiros para a determinação do estado nutricional das plantas foram obtidas no mês de julho de 2021. Coletaram-se quatro amostras (com 100 folhas cada) nos sistemas convencional e orgânico. As folhas foram colhidas de quatro cafeeiros distribuídos em 10 pontos aleatórios em cada sistema, excluindo as plantas localizadas nas bordas dos talhões. Foram coletados o terceiro e o quarto par de folhas dos ramos produtivos, na porção mediana do cafeeiro, em cada face de exposição ao sol. As folhas verdes foram acondicionadas em sacos de papel e posteriormente encaminhadas ao laboratório para a determinação dos teores totais de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn, conforme metodologia descrita por Sarruge; Haag (1974).

2.3. Análise do teor de sólidos solúveis totais dos frutos

A coleta dos frutos para determinação do teor de sólidos solúveis totais foi realizada de forma manual e seletiva, no estágio de plena maturação fisiológica, conhecido como “cereja maduro”. Foram realizados 10 pontos de amostragem distribuídos aleatoriamente dentro dos talhões, excluindo as bordaduras, por sistema de cultivo, amostrando cinco plantas por ponto. Em cada planta foram colhidos cinco grãos na porção mediana do cafeeiro e nos quatro sentidos de exposição ao sol (norte, sul, leste e oeste). A leitura da concentração de sólidos solúveis totais foi feita com auxílio de refratômetro portátil RT-30ATC. Fez-se a leitura de Brix do suco pela compressão dos grãos, avaliando-se 50 plantas por tratamento e 250 frutos.

2.4. Colheita, secagem dos grãos e teor de umidade

Foram amostrados 10 pontos, distribuídos aleatoriamente, em cada sistema, e cada ponto foi constituído por cinco cafeeiros, totalizando 50 plantas por sistema. Em cada ponto foram colhidos 1,2 L de café, totalizando 6 litros por ponto. A colheita foi realizada manualmente no estágio de maturação “cereja maduro”, no mês de julho de 2021, nos ramos localizados na porção mediana, nos quatro sentidos de exposição ao sol (norte, sul, leste e oeste). Os frutos foram lavados e separados por densidade, utilizando um recipiente com água e uma peneira, onde os frutos “boias” que flutuaram foram retirados e descartados, permanecendo na amostra apenas os frutos “cereja”.

Posteriormente, os frutos foram secos em duas estruturas de terreiro suspenso, cada uma com 10 quadros para secagem individual da amostra, com dimensão de 1 m², contendo 6 litros de fruto. Os frutos foram revolvidos a cada 50 minutos no período das 9:00 às 15:00 horas e cobertos por lona de ráfia e lona preta no período da noite. No período de “meia seca”, quando os frutos atingiram 18% de umidade, passaram a ser amontoados no final da tarde para a homogeneização da secagem. Após 20 dias de secagem, os frutos foram recolhidos e levados para a homogeneização da seca. Após 30 dias os frutos retornaram ao terreiro suspenso, até atingirem 12,5% de umidade (BRASIL, 2003b). Para a determinação da umidade dos frutos foi utilizado o aparelho Gehaka Agri, modelo G600.

2.5. Análise física dos grãos

Os frutos secos foram beneficiados com auxílio de descascador de amostra portátil Carmomac®. Os grãos foram classificados quanto à granulometria. Para isso, pesaram-se 300 g de grãos verdes, que foram passados nas peneiras (BRASIL, 2003b). Os grãos retidos em cada peneira foram retirados, pesados e os dados apresentados em porcentagem.

2.6. Preparo da bebida e análise sensorial

A avaliação dos atributos sensoriais foi realizada por dois avaliadores (Q-grader), conforme a metodologia proposta pela Specialty Coffee Association - SCA (LINGLE; MENON, 2017). Foram utilizadas 20 amostras, sendo 10 amostras contendo 300 gramas de grãos verdes beneficiados, para cada sistema. Os grãos que ficaram retidos nas peneiras 15 e acima foram levados ao torrador Carmomac® (cerca de 120 g de café cru verde). Estes foram torrados de 8 a 10 minutos, até o ponto de torra clara. As torras foram executadas com 24 horas de antecedência. Posteriormente, foram levados ao moedor Jmil, onde se procedeu à moagem com granulometria média/grossa após 8 horas de descanso após a torra, em seguida, as amostras foram lacradas e abertas apenas no momento da prova. Em cada amostra foram degustadas cinco xícaras, sendo adotada a concentração ótima de 8,25 gramas de café moído em 150 mL de água. O ponto de infusão da água deu-se após atingir 92-95 °C. Os avaliadores iniciaram as avaliações quando a temperatura das xícaras atingiu 55 °C, respeitando o tempo de 3 a 5 minutos para a degustação após a infusão (SCAA, 2015). Os atributos sensoriais avaliados foram fragrância/aroma, uniformidade, ausência de defeitos, doçura, sabor, acidez, corpo, finalização,

equilíbrio, defeitos e avaliação global, utilizando dois avaliadores Q-grader. Foram dadas notas baseadas em uma escala com intervalos de 0,25, representando os níveis de qualidade: 6,00 a 6,75 (bom), 7,00 a 7,75 (muito bom), 8,00 a 8,75 (excelente), 9,00 a 9,75 (excepcional).

2.7. Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA) seguindo o delineamento experimental inteiramente casualizado, em nível de 5% de probabilidade. Para as análises sensoriais do café, utilizaram-se as notas médias dos avaliadores para cada atributo e a representação gráfica do perfil sensorial para a visualização do equilíbrio das notas sensoriais. Os dados foram submetidos à análise multivariada para a melhor compreensão do efeito das variáveis estudadas. Para tanto, utilizou-se análise de componentes principais (PCA) para a discriminação das amostras a partir da interação entre os tipos de manejo. As análises estatísticas foram realizadas no programa R (R CORE TEAM, 2023).

3. RESULTADOS

Os resultados obtidos para as análises químicas do solo estão apresentados na Tabela 2. Os valores de pH e os teores de matéria orgânica, Ca, Mg, B, Cu, Fe e Mn no solo não diferiram entre os sistemas convencional e orgânico. Por outro lado, houve efeito dos sistemas de cultivo para os teores de P, K, S e Zn no solo.

O teor de P foi maior no sistema orgânico (Tabela 2), foi classificado como alto (61 mg dm⁻³), enquanto, no sistema convencional (17 mg dm⁻³), foi considerado médio (RAIJ et al., 1997). O teor de K foi significativamente maior no sistema de café convencional (Tabela 2). Apesar dos teores de K no solo dos sistemas convencional e orgânico serem considerados médios (1,6-3,0 mmol_c dm⁻³) (RAIJ et al., 1997), o teor no sistema convencional foi duas vezes superior ao orgânico.

O teor de S no solo sob sistema de café orgânico foi superior ao café em sistema convencional (Tabela 2). Houve diferença entre os sistemas para teor de Zn no solo. O elemento foi maior no café sob manejo convencional (Tabela 2). Nesse sistema ocorreu adubação com Zn, o que pode, ao menos em parte, explicar nossos resultados. No presente estudo, em ambos os sistemas, os teores de Zn no solo foram classificados como altos (>1,2 mg dm⁻³) (RAIJ et al., 1997).

Tabela 2. Atributos químicos do solo de cafeeiros nos sistemas convencional e orgânico na profundidade 0-0,20 m.

Table 2. Chemical attributes of coffee soil in conventional and organic systems at depth 0-0.20 m.

Atributos	Unidade	CONV.	ORG.	p-value
Matéria orgânica	g dm ⁻³	40,65	41,05	0,9435
Fósforo	mg dm ⁻³	17,07	61,30	0,0008*
Potássio	mmol _c dm ⁻³	03,03	1,60	0,0158*
Cálcio	mmol _c dm ⁻³	55,33	34,70	0,0971
Magnésio	mmol _c dm ⁻³	11,57	09,20	0,3720
Enxofre	mg dm ⁻³	31,77	70,45	0,0010*
Boro	mg dm ⁻³	0,69	0,69	0,9812
Cobre	mg dm ⁻³	0,62	0,35	0,1908
Zinco	mg dm ⁻³	14,50	8,00	0,0008*
Manganês	mg dm ⁻³	105,25	109,50	0,4934
Ferro	mg dm ⁻³	105,43	108,62	0,5464

*destaca valor inferior ao nível de significância (p≤0,05). CONV: conventional system; ORG: organic system.

Os teores foliares apresentados nos sistemas convencionais em comparação com o sistema orgânico estão apresentados na Tabela 3. Os teores foliares de N, P, Mg e B foram superiores nos cafeeiros sob sistema convencional em comparação com o sistema orgânico (Tabela 3). Cabe destacar que o sistema orgânico apresentou o maior teor de P no solo (Tabela 2), fato que não se refletiu em maior teor foliar do nutriente. Já os teores de Mg e B no solo foram semelhantes entre os sistemas, porém maiores nas folhas de café sob manejo convencional. A coleta das folhas para a

análise foi realizada no mês de julho, quando os frutos já estavam no final da maturação. Nesse sentido, parte dos nutrientes foliares já havia transcolado para os frutos.

Os maiores teores de N, P, Mg e B nas folhas do café convencional podem indicar uma maior chance de recuperação vegetativa das plantas para a próxima safra. Os teores foliares de K e Zn foram maiores no café orgânico (Tabela 3). Esses resultados diferem do obtido na análise das concentrações no solo, em que o café convencional apresentou maiores quantidades destes nutrientes (Tabela 2).

Tabela 3. Teores de macro- e micronutrientes foliares em cafeeiros nos sistemas convencional e orgânico.
Table 3. Macro and micronutrient contents in leaves of coffee plants in conventional and organic systems.

Nutrientes	Unidade	Convencional	Orgânico	p-value
Nitrogênio	g kg ⁻¹	30	27	0,00440*
Fósforo	g kg ⁻¹	1,16	1,2	0,00003*
Potássio	g kg ⁻¹	13,0	19	0,0050*
Cálcio	g kg ⁻¹	11,0	11,0	1,00000
Magnésio	g kg ⁻¹	6,3	3,5	0,00004*
Enxofre	g kg ⁻¹	1,0	1,0	0,23430
Boro	mg kg ⁻¹	48,0	28,0	0,00480*
Cobre	mg kg ⁻¹	9,25	8,25	0,11350
Ferro	mg kg ⁻¹	118,50	126,75	0,41500
Manganês	mg kg ⁻¹	109,50	105,25	0,49340
Zinco	mg kg ⁻¹	8,0	14,5	0,00010*

*destaca valor inferior ao nível de significância ($p \leq 0,05$).

Tabela 4. Classificação dos grãos de café dos sistemas convencional e orgânico nas peneiras 17/18 a 10 (mocha), umidade após secagem e valores de sólidos solúveis totais no fruto cereja.

Table 4. Classification of coffee beans from conventional and organic systems on sieves 17/18 to 10 (mocha), moisture after drying and total soluble solids values in the cherry fruit.

Peneira (%)	Sistema	
	Orgânico	Convencional
Peneira 17/18	56,01	49,53
Peneira 16	15,75	16,60
Peneira 15	6,070	8,29
Peneira 13/14	1,16	1,85
Peneira mocha 10	13,82	12,27
Fundo	1,37	1,73
Fundo + catação	7,31	12,57
Umidade (%)	12,85	12,77
Sólidos solúveis totais (°Brix)	23,7	22,4

A classificação dos grãos de café dos sistemas convencional e orgânico nas peneiras bem como a umidade e sólidos solúveis totais estão apresentadas na Tabela 4. O teor de umidade dos grãos foi semelhante entre os sistemas convencional e orgânico (Tabela 4). Por outro lado, os grãos de café obtidos no sistema orgânico apresentaram maiores diâmetros em relação aos grãos do sistema convencional, com maior porcentagem retida na peneira 17/18 e menor na peneira de fundo e catação. Já os grãos do sistema convencional concentraram maior porcentagem nas peneiras de fundo e catação (12,57%) (Tabela 4). Houve diferença entre os sistemas para os teores médios de sólidos solúveis totais nos frutos de café. Os valores foram superiores nos grãos produzidos no sistema orgânico.

Quanto aos atributos sensoriais (Tabela 5), em relação às variáveis uniformidade, xícara limpa e doçura, ambos os sistemas receberam notas máximas (10) e os cafés receberam pontuação final de 83, sendo considerados cafés especiais.

Tabela 5. Análise sensorial da bebida de café dos sistemas orgânico e convencional de acordo com a Specialty Coffee Association of America – SCAA.

Table 5. Sensory analysis of coffee beverages from organic and conventional systems according to the Specialty Coffee Association of America (SCAA).

Atributos	Sistema	
	Orgânico	Convencional
	Pontuação	
Aroma	7,6	7,5
Uniformidade	10	10
Xícara limpa	10	10
Doçura	10	10
Sabor	7,6	7,6
Acidez	7,6	7,5
Corpo	7,5	7,6
Sabor residual	7,5	7,6
Balanço	7,5	7,5
Nota Final	7,6	7,6
SCAA	83,07	83,34

Os três primeiros componentes principais explicaram 85,55% da variabilidade das respostas, o que demonstra ótima elucidação da variação ocorrida entre as amostras, em relação aos atributos químicos (Tabela 6). Os escores das componentes principais 1, 2 e 3 para os atributos químicos de solo estão apresentados na Figura 1.

Os três primeiros componentes principais explicaram 82,12% da variabilidade das respostas, o que também demonstra ótima explicação da variação ocorrida entre as amostras, em relação aos nutrientes foliares (Tabela 7). Os escores da PC1 nos dois sistemas evidenciam que todas as amostras do sistema orgânico são positivas, o que indica que o solo tem maiores teores de Fe e menores de K, Ca e Mg (Figura 1). Para a PC2, as amostras do sistema orgânico trouxeram evidências de altos níveis de P, S e matéria

orgânica. A PC3 está dedicada ao teor de SST e a maioria das amostras do sistema convencional apresentaram escores positivos e os maiores níveis dos sólidos solúveis totais. Conjuntamente, as amostras de solo do sistema orgânico apresentaram maiores níveis de Fe, P e S, uma vez que todas estão localizadas no quadrante superior direito (Figura 1).

Entre os teores foliares dos nutrientes dos cafeeiros sob sistema convencional e orgânico, a correlação entre P e Mg é de 0,98 ($p < 0,05$), o que indica que se espera que amostras com altos valores de Mg também tenham P alto. Porém, amostras com altos níveis de K têm baixos níveis de B. Também ocorreram correlações estatisticamente nulas pelo teste *t de Student* considerando-se 5% como nível de significância.

Tabela 6. Correlações entre os parâmetros avaliados (atributos do solo) e os três primeiros componentes principais e as respectivas proporções da variância explicada por cada componente principal. Table 6. Correlations between the evaluated parameters (soil attributes) and the first three principal components, with the respective proportions of variance explained by each principal component.

Atributos	PC1	PC2	PC3
Potássio	-0,7734*	0,4656	-0,0056
Cálcio	-0,9484*	0,1600	0,2030
Magnésio	-0,8563*	0,3834	0,2548
Fosforo	0,5808	0,7403**	0,0479
Enxofre	0,5222	0,8074**	-0,0737
Boro	-0,3482	0,4262	-0,5163
Cobre	-0,6659	-0,0967	-0,6748
Ferro	0,7133**	-0,3813	0,2893
Matéria orgânica	-0,5823	0,6893	0,3704
SST	-0,2302	-0,1123	0,8805**
Proporção da variação (%)	43,06	24,14	18,32
Total (%)	85,5		

*/** indicam grupos de variáveis a serem formados.

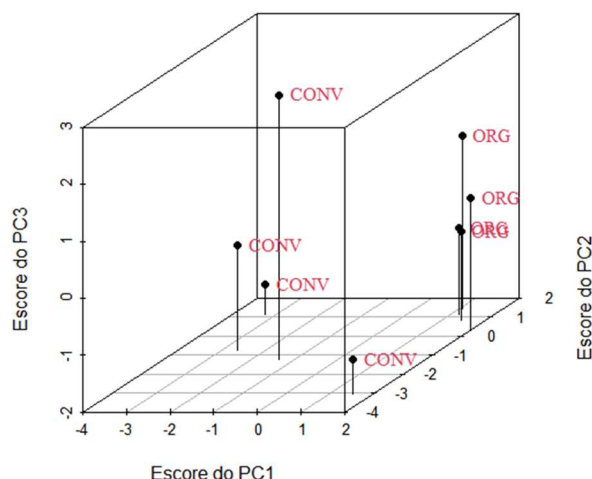


Figura 1. Visualização tridimensional dos componentes principais 1, 2 e 3 para os atributos químicos de solo. CONV: sistema convencional; ORG: sistema orgânico.

Figure 1. Three-dimensional visualization of principal components 1, 2 and 3 for soil chemical attributes. CONV: conventional system; ORG: organic system.

Os escores da PC1, PC2 e PC3 estão apresentados na Figura 2. Os escores da PC1 nos dois sistemas mostram que todas as amostras sob o sistema orgânico foram positivas, o que indica que os nutrientes foliares têm maiores

concentrações para o grupo formado por Mg, N, P, S, B e Cu e menores teores de K e Zn (Figura 2). Para a PC2, as amostras do sistema convencional trouxeram evidências de altos níveis de Ca e Mn. A PC3 está dedicada ao ferro e à SST e há uma equidade entre os sistemas, de modo que ambos apresentam quantidade semelhante de ferro e SST (Figura 2). Conjuntamente, as amostras foliares do sistema orgânico apresentaram os maiores escores para o grupo formado pelos nutrientes Mg, N, P, S, B e Cu, e menores teores de Ca e Mn.

Tabela 7. Correlações entre os parâmetros avaliados (teores foliares de nutrientes) e os três primeiros componentes principais e as respectivas proporções da variância explicada por cada componente principal.

Table 7. Correlations between the evaluated parameters (foliar nutrient contents) and the first three principal components, with the respective proportions of variance explained by each principal component.

Nutrientes	PC1	PC2	PC3
Potássio	-0,9256*	-0,0839	-0,0158
Cálcio	0,1741	-0,8516*	-0,1825
Magnésio	0,9773**	0,1167	0,0179
Nitrogênio	0,8340**	0,2824	-0,1046
Fosforo	0,9772**	0,1744	-0,0309
enxofre	0,7157**	-0,2352	-0,2247
Boro	0,9106**	0,2424	-0,2849
Cobre	0,7572**	-0,1335	-0,0620
Ferro	-0,2691	-0,1937	-0,8462*
Manganês	0,3848	-0,7394*	0,0836
Zinco	-0,9438*	0,0621	-0,0102
SST	-0,3999	0,2762	-0,7876*
Proporção da variação	55,65	13,77	12,71
Total (%)	82,12		

* e ** indicam grupos de variáveis a serem formados.

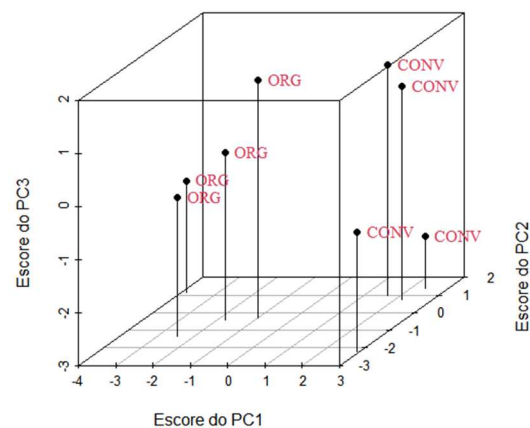


Figura 2. Visualização tridimensional dos componentes principais 1, 2 e 3 para os teores foliares. CONV: sistema convencional; ORG: sistema orgânico.

Figure 2. Three-dimensional visualization of the principal components 1, 2 and 3 for the leaf contents. CONV: conventional system; ORG: organic system.

4. DISCUSSÃO

Os teores mais elevados de P no sistema orgânico (Tabela 2) devem-se à utilização de farinha de ossos, que é uma importante fonte de Ca e P (BISWAS et al., 2022). Além disso, o feijão-guandu cultivado nas linhas do café pode ter favorecido a solubilização do P inorgânico e/ou mineralização do P orgânico, por meio da exsudação de ácidos orgânicos e liberação de enzimas extracelulares

(fosfatase), resultando no aumento da disponibilidade de P no solo (LIU et al., 2022).

Em consonância com os menores resultados de K nos solos do sistema orgânico (Tabela 2), Malta et al. (2008) também verificaram que 57% das lavouras cafeeiras sob sistema orgânico avaliadas apresentaram teor de K no solo classificado como médio. Os resultados confirmam que o fornecimento deste macronutriente em sistemas orgânicos é um desafio (BASAK et al., 2021), uma vez que os adubos orgânicos apresentam menores teores de K quando comparados com os fertilizantes sintéticos. Somam-se a isso a alta solubilidade desse nutriente e a lixiviação no solo, sugerindo a necessidade de parcelamento de adubos orgânicos. O K exerce importante efeito na qualidade da bebida de café (Dias et al., 2018; Santos et al., 2023), pois é um dos principais nutrientes que atuam no metabolismo dos compostos nitrogenados e carboidratos, sendo fundamental na ação de algumas enzimas regulatórias como a fosfofrutocinase e piruvatoquinase (MARTINEZ et al., 2013). A deficiência de K pode resultar no acúmulo de carboidratos e compostos nitrogenados solúveis (Clemente et al., 2013; Martinez et al., 2013), comprometendo a qualidade da bebida.

Sistemas conservacionistas, com menor perturbação do solo e utilização de culturas de cobertura e manutenção dos resíduos culturais sobre o solo, como o sistema orgânico em estudo (Tabela 2), podem aumentar significativamente a concentração de S no solo, quando comparados ao manejo convencional (KUMAR et al., 2022). A importância desse macronutriente para a cultura do café é inequívoca, pois entre os diversos compostos voláteis que participam da formação do aroma do café torrado, cerca de 12% são compostos sulfurados (UEKANE et al., 2013). E ainda segundo Yeretizian et al. (2019), compostos contendo S, como trissulfeto de dimetilo e bis(2-metil-3-furil) dissulfeto, juntamente com fenóis e furanonas, são de grande importância para o aroma do café torrado. Por isso, um suprimento adequado e balanceado de S pode assegurar a qualidade do produto. O mesmo ocorre com o micronutriente Zn, pois Lacerda et al. (2018) observaram sua influência em diversos atributos do café, incluindo a atividade da polifenoloxidase, enzima de grande importância para o paladar da bebida, com menores doses de Zn resultando em bebida dura e maiores doses resultando em bebida mole.

Os teores foliares de K e Zn foram superiores no café sob sistema orgânico (Tabela 3), fato que pode explicar o maior tamanho dos grãos de café neste sistema, uma vez que K e Zn afetam significativamente a qualidade dos grãos de café. Martinez et al. (2013) avaliaram o efeito do Zn na qualidade dos grãos de café e verificaram que Zn influenciou positivamente o tamanho dos grãos, resultando em maior porcentagem de grãos exportáveis, retidos nas peneiras 17 e 18. Clemente et al. (2013), avaliando o efeito do N, do K e da relação N:K no crescimento vegetativo e reprodutivo do cafeeiro, relataram que o K influenciou o crescimento reprodutivo, incluindo o tamanho dos grãos.

Os resultados de teores médios de sólidos solúveis totais (SST) nos frutos de café podem estar relacionados com a maior absorção de K e Zn nos cafeeiros cultivados organicamente. A maior concentração de K favorece o transporte de sacarose no floema, o que resulta em maior teor de sólidos solúveis totais (SILVA et al., 2018). Além disso, o maior teor de Zn pode aumentar o teor de SST pelo seu papel na ativação ou como componente estrutural de enzimas

envolvidas na síntese de açúcares (DHALIWAL et al., 2022). Os atributos sensoriais de aroma e sabor estão associados à composição dos grãos e são atributos que determinam a qualidade da bebida na prova de xícara. Considerando-se que os grãos obtidos em ambos os sistemas em estudo alcançaram adequada qualidade, obteve-se este resultado equivalente.

Altas porcentagens de variação explicada pela PCA também foram encontradas por Fassio et al. (2017) com 76,85% na análise de relações de compostos químicos e sensoriais em grãos de cafés especiais (Tabela 6). Considerando a PC1 (Componente Principal 1), K, Ca, Mg e Fe do solo são altamente correlacionados com essa componente principal, considerando correlações superiores a 70% (-70%). Para essa componente, espera-se que amostras de solo com altos escores tenham altos valores de Fe e baixos valores de K, Ca e Mg. O PC3 está relacionado aos teores de sólidos solúveis totais.

Os três primeiros componentes principais explicaram 82,12% da variabilidade das respostas, o que também demonstra ótima explicação da variação ocorrida entre as amostras, em relação aos nutrientes foliares (Tabela 7). Altas porcentagens de variação explicada pela PCA também foram encontradas por Malta et al. (2021), com 95,88% na análise de relações de atributos sensoriais em grãos de cafés especiais. Considerando a PC1, somente Ca, Fe, Mn não são correlacionados com essa componente principal. Essa componente pode ser vista como um balanço entre os grupos de nutrientes (K e Zn) e (Mg, N, P, S, B e Cu), de modo que altos escores implicam em amostras com baixos valores das variáveis do primeiro grupo e altos valores para o segundo grupo. O PC3 está relacionado aos sólidos solúveis totais e Fe. Amostras com altos sólidos solúveis totais e Fe têm os menores escores.

A análise multivariada realizada permitiu levantar evidências sobre o comportamento das amostras de solo e tecido foliar da variedade Catuaí Vermelho (*Coffea arabica* L.) nos dois sistemas de cultivo. Estudar relações entre processos de cultivo, colheita e pós-colheita tem se constituído em uma estratégia de interesse econômico e sustentável, conforme encontrado em pesquisas realizadas por Borém et al. (2020). As evidências aqui apontadas poderão viabilizar estudos mais aprofundados para aumentar a precisão dos padrões encontrados pelas análises de componentes principais realizadas e outras variáveis poderão ser consideradas, como as sensoriais e físicas. Salientamos que estudos do tipo serão contemplados em pesquisas futuras.

5. CONCLUSÕES

O sistema orgânico resultou em maiores teores de enxofre e fósforo no solo, enquanto o sistema convencional favoreceu as concentrações de zinco e potássio. O café cultivado convencionalmente favoreceu os teores de nitrogênio, fósforo, magnésio e boro foliar. Por outro lado, o cultivo orgânico aumentou o potássio e o zinco nas folhas do cafeeiro.

O cultivo orgânico resultou em frutos de café com maior teor de sólidos solúveis totais e grãos com maiores diâmetros. Independentemente do sistema de cultivo, os grãos de café apresentaram qualidade elevada, com as bebidas recebendo pontuação que as conferiu classificação de cafés especiais, indicando que é possível obter cafés de qualidade tanto no sistema orgânico como no convencional.

6. REFERÊNCIAS

- BASAK, B. B.; SARKAR, B.; NAIDU, R. Environmentally safe release of plant available potassium and micronutrients from organically amended rock mineral powder. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 43, p. 3273-3286, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00677-1>
- BISWAS, P. P.; TURNER-WALKER, G.; RATHOD, J.; LIANG, B.; WANG, C. C.; LEE, Y. C.; SHEU, W. S. Sustainable phosphorus management in soil using bone apatite. *Journal of Environmental Management*, v. 305, e114344, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114344>
- BOREM, F. M.; CIRILLO, M. A.; ALVES, A. P. C.; SANTOS, C. M.; LISKA, G. R.; RAMOS, M. F.; LIMA, R. R. Coffee sensory quality study based on spatial distribution in the Mantiqueira mountain region of Brazil. *Journal of Sensory Studies*, v. 35, e12552, 2020. <https://doi.org/10.1111/joss.12552>
- BRASIL. Lei n. 10.831, de 23 de dezembro de 2003. **Dispõe sobre a agricultura orgânica e dá outras providências**. Diário Oficial (da) República Federativa do Brasil, Brasília-DF, 2003a.
- BRASIL. Instrução Normativa n. 8, de 11 de junho de 2003. **Regulamento técnico de identidade e de qualidade para a classificação do café beneficiado e de café verde**. Diário Oficial (da) República Federativa do Brasil, Brasília-DF, 2003b.
- CLEMENTE, J. M.; MARTINEZ, H. E. P.; ALVES, L. C.; LARA, M. C. R. Effect of N and K doses in nutritive solution on growth, production and coffee bean size. *Revista Ceres*, v. 60, n. 2, p. 279-285, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2013000200018>
- DHALIWAL, S. S.; SHARMA, V.; SHUKLA, A. K.; SINGH, J.; VERMA, V.; KAUR, M.; SINGH, P.; REHAL, J. Assessment of optimum mineral zinc fertilizer rate for quantitative and qualitative production of sugarcane in north-western India. *Journal of Trace Elements and Minerals*, v. 2, e10021, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jtemin.2022.100021>
- DIAS, K. G. L.; GUIMARÃES, P. T. G.; CARMO, D. L.; REIS, T. H. P.; LACERDA, J. J. J. Alternative sources of potassium in coffee plants for better soil fertility, productivity, and beverage quality. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 53, n. 2, p. 1355-1362, 2018. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2018001200008>
- FASSIO, L. O.; MALTA, M. R.; CARVALHO, G. R.; LISKA, G. R.; LIMA, P. M.; NADALETI, D. H. S.; FONSECA, A. J.; PIMENTA, C. J. Fatty acids profile of *Coffea arabica* L. resistant to leaf rust grown in two environments of Minas Gerais, Brazil. *Journal of Agricultural Science*, v. 9, n. 12, p. 88-98, 2017. <https://doi.org/10.5539/jas.v9n12p88>
- KUMAR, U.; CHENG, M.; MANIRUZZAMAN, M.; NASREEN, S. S.; HAQUE, M. E.; RAHMAN, M. T.; JAHIRUDDIN, M.; BELL, R. W.; JAHANGIR, M. M. R. Long-term Conservation Agriculture increases sulfur pools in soils together with increased soil organic carbon compared to conventional practices. *Soil and Tillage Research*, v. 223, e105474, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105474>
- LACERDA, J. S.; MARTINEZ, H. E. P.; PEDROSA, A. W.; CLEMENTE, J. M.; SANTOS, R. H. S.; OLIVEIRA, G. L.; JIFON, J. L. Importance of zinc for arabica coffee and its effects on the chemical composition of raw grain and beverage quality. *Crop Science*, v. 58, p. 1360-1370, 2018. <https://doi.org/10.2135/cropsci2017.06.0373>
- LINGLE, T. R.; MENON, S. N. Cupping and grading: discovering character and quality. In: FOLMER, B. (Ed.). **The craft and science of coffee**. London: Academic Press, 2017. p. 181-203.
- LIU, C.; TAL, Y.; LUO, J.; WU, Y.; ZHAO, X.; DONG, R.; DING, X.; ZHAO, S.; LUO, L.; LIU, P.; LIU, G. Integrated multi-omics analysis provides insights into genome evolution and phosphorus deficiency adaptation in pigeon pea (*Cajanus cajan*). *Horticulture Research*, v. 9, e107, 2022. <https://doi.org/10.1093/hr/uhac107>
- MALTA, M. R.; OLIVEIRA, A. C. B.; LISKA, G. R.; CARVALHO, G. R.; PEREIRA, A. A.; SILVA, A. D.; ALVAR, L. N.; MOTA, D. M. Selection of elite genotypes of *Coffea arabica* L. to produce specialty coffees. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, v. 5, e715385, 2021. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.715385>
- MALTA, M. R.; THEODORO, V. C. A. T.; REZENDE, S. R.; CHAGAS, R.; GUIMARÃES, R. J.; CARVALHO, J. G. Characterization of coffee crops cultivated on organic system in the south of Minas Gerais. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 32, n. 5, p.1402-1407, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000500007>
- MARTINEZ, H. E. P.; POLTRONIERI, Y.; FARAH, A.; PERRONE, D. Zinc supplementation, production and quality of coffee beans. *Revista Ceres*, v. 60, n. 2, p. 293-299, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2013000200020>
- MORINIGO, K. P. G.; GUIMARÃES, N. F.; STOLF, R.; SAIS, A. C.; SOUZA, M. D. B.; GALLO, A. S.; FONTANETTI, A. Effects of trees distribution in soil attributes in shaded coffee. *Coffee Science*, v. 12, n. 4, p. 517-525, 2017. <https://dx.doi.org/10.25186/cs.v12i4.1359>
- NESPER, M.; KUEFFER, C.; KRISHNAN, S.; KUSHALAPPA, C. G.; GHAZOU, J. Simplification of shade tree diversity reduces nutrient cycling resilience in coffee agroforestry. *Journal of Applied Ecology*, v. 56, p. 119-131, 2018. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13176>
- RAIJ, B. Van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- RAIJ, B. Van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1997. 285p.
- R CORE TEAM. R: A **Language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2023. <<https://www.R-project.org/>>.
- SANTOS, C.; MALTA, M. R.; GONÇALVES, M. G. M.; BOREM, F. M.; POZZA, A. A. A.; MARTINEZ, H. E. P.; SOUZA, T. L.; CHAGAS, W. F. T.; MELO, M. E. A.; OLIVEIRA, D. P.; LIMA, A. D. C.; ABREU, L. B.; REIS, T. H. P.; SOUZA, T. R.; BUILES, V. R.; GUELF, D. Chloride applied via fertilizer affects plant nutrition and coffee quality. *Plants*, v. 12, n. 4, e885, 2023. <https://doi.org/10.3390/plants12040885>
- SARRUGE, J. R.; HAAG, H. P. **Análise química de plantas**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1974. 56p.

- SILVA, T. J. A.; PACHECO, A. B.; BONFIM-SILVA, E. M.; DUARTE, T. F. Water availability and potassium doses in cherry tomato quality. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 5, p. 657-664, 2018. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n5p657-664/2018>
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 12 ed. Washington: US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2014. 410p.
- SCAA_Specialty Coffee Association of America. **SCAA protocols: cupping specialty coffee**. <<https://atlanticspecialtycoffee.com/wp-content/uploads/SCAA-Cupping-Protocols-2005.pdf>>. Acesso em 05 mai. 2024.
- SUNAHARUM, W. B.; WILLIAMS, D. J.; SMYTH, H. E. Complexity of coffee flavor: a compositional and sensory perspective. **Food Research International**, v. 62, p. 315-325, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.02.030>
- TORRES, J. D.; ARAÚJO, L. F. B.; ESPINDULA, M. C.; CAMPANHARO, M.; ROCHA, R. B. Export of macronutrients for coffee fruits submitted to different doses of formulation 20-00-20. **Journal of Plant Nutrition**, v. 45, n. 18, p. 2737-2747, 2022. <https://doi.org/10.1080/01904167.2022.2027975>
- TORREZ, V.; BENAVIDES-FRIAS, C.; JACOBI, J.; SPERANZA, C. I. Ecological quality as a coffee quality enhancer. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 43, e19, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13593-023-00874-z>
- UEKANE, T. M. Compostos sulfurados no aroma do café: origem e degradação. **Revista Virtual de Química**, v. 5, n. 5, p. 891-911, 2013. <https://doi.org/10.5935/1984-6835.20130064>
- YERETZIAN, C.; OPITZ, S.; SMRKE, S.; WELLINGER, M. Coffee volatile and aroma compounds – From the green bean to the cup. In: FARAH, A.; FARAH, A. (Eds.). **Coffee: production, quality and chemistry**. London: The Royal Society of Chemistry, 2019. p.726-770.

Agradecimentos: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001. FINEP/CT- AGRO/FNDCT (Nº. 01.22.0080.00, ref 1219/21).

Contribuições dos autores: J.M.G.–conceitualização, metodologia, investigação, coleta de dados, redação (original), redação (revisão e edição); W.J.V.R. – coleta de dados, investigação, redação (original), redação (revisão e edição); G.R.L.–metodologia, investigação, redação (original), redação (revisão e edição); A.S.G.– investigação, redação (original), redação (revisão e edição); A.F.– conceitualização, metodologia, redação (original), redação (revisão e edição); A.C.C.B.– investigação, redação (original), redação (revisão e edição); M.R.V.B.–conceitualização, metodologia, investigação ou coleta de dados, administração ou supervisão, redação (original), redação (revisão e edição). Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos via e-mail, mediante solicitação ao autor correspondente ou ao primeiro autor.

Conflito de interesses: Os autores declaram não haver conflitos de interesses.



Copyright: © 2025 by the authors. This article is an Open-Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons **Attribution-NonCommercial (CC BY-NC)** license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).