



Eficiência do fertilizante nitrogenado de acordo com o espaçamento de plantio do café arábica, doses e fontes de N

Nitrogen fertilizer efficiency according to arabica coffee planting spacing, doses and sources of N

A. Guarçoni^{1*}; F. T. Alixandre²; D. G. Sousa³; C. S. D. Zanúncio⁴

¹CPDI-Sul, Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), 29306-350, Cachoeiro de Itapemirim-ES, Brasil

²ELDR-Brejetuba, Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), 29630-000, Brejetuba-ES, Brasil

³CPDI-Serrano, Centro de Cafés Especiais do Espírito Santo (CECAFES), FEVNI, 29378-990, Venda Nova do Imigrante-ES, Brasil

⁴CPDI-Serrano, Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (INCAPER), 29260-000, Domingos Martins-ES, Brasil

*guarconi@incaper.es.gov.br

(Recebido em 11 de setembro de 2023; aceito em 30 de outubro de 2024)

O aumento na produção de alimentos de forma sustentável é fundamental para o contínuo desenvolvimento da humanidade. Para que isso ocorra, processos que contribuam para uma maior eficiência no uso da água e de fertilizantes devem ser aprimorados. O objetivo do presente estudo foi determinar a produtividade, índices de aproveitamento de N e o retorno econômico da adubação nitrogenada para o café arábica de montanha, na fase inicial de produção, bem como as modificações nas características químicas do solo decorrentes da aplicação de doses crescentes de N, na forma de ureia comum ou protegida, em plantio convencional, adensado ou superadensado. Foram montados dois experimentos variando o espaçamento de plantio do café arábica e as doses de N aplicadas como ureia comum ou protegida. Foram determinados a produtividade de café beneficiado, características e propriedades químicas do solo e índices de aproveitamento de N, sendo calculados ainda a renda bruta por hectare e o retorno econômico da adubação nitrogenada. Foi possível concluir que o adensamento de plantio do café aumenta, de forma acentuada, a produtividade e o aproveitamento do fertilizante nitrogenado na primeira colheita consistente, sem reduzir a produção por planta. A ureia com inibidor de urease é mais eficiente do que a comum em espaçamentos de plantio mais abertos. Elevada renda bruta nas primeiras colheitas é obtida no plantio mais adensado e com maior dose de N, mas o maior retorno econômico por unidade investida em fertilizante nitrogenado ocorre em plantio mais adensado ao se aplicar menores doses de N.

Palavras-Chave: inibidor de urease, renda, sustentabilidade.

The continued development of humanity only is possible by sustainable food production. Thus, processes by which can contribute to improving the efficiency of the water and fertilizers use must be applied. The aim of the present work was to determine the productivity, N utilization indexes and the economic return of nitrogen fertilization for mountain Arabica coffee, in the initial production phase. Furthermore, changes in the soil chemical characteristics from the application of the N increasing doses, using common or protected urea, in conventional system planting, dense or super dense were evaluated. Two experiments were carried out varying the coffee Arabica planting spacing and the N doses applied as common or protected urea. They were determined the processed coffee productivity, the characteristics and chemical properties of the soil and N utilization rates. In addition, they were calculated the gross income per hectare and the economic return of nitrogen fertilization. It was possible to conclude that the denser coffee planting increases productivity and the use of the nitrogen fertilizer in the first harvests, without reducing production per plant. The urea with urease inhibitor is more efficient than the common urea on larger planting spacing. High gross income in the first harvests was obtained in denser planting and with a higher N dose, but the highest economic return per unit invested in nitrogen fertilizer occurs in denser planting when lower N doses are applied.

Keywords: urease inhibitor, income, sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Elevar a eficiência no uso de fertilizantes e de água é preponderante para garantir maior disponibilidade de alimentos e reduzir a degradação dos solos. Plantios mais adensados podem aumentar essa eficiência, uma vez que modificam características edáficas, incrementando o teor de nutrientes, a CTC e a retenção de água, além de ampliar o volume radicular por área, o que facilita a absorção pelas plantas [1]. Por isso, há uma tendência, que não é tão recente, de reduzir o espaçamento da maioria das culturas, sejam elas perenes [2] ou anuais [3]. Contudo, a mudança nos espaçamentos de plantio requer pesquisas que respondam questões relativas à produtividade e também ao manejo de cultivo, de forma que a produção seja mais sustentável.

Para a cultura do café, modificar os espaçamentos de plantio provoca relevantes impactos econômicos, pois afeta a produtividade e o manejo da lavoura, tanto do arábica [4] quanto do robusta [5]. Dessa forma, a redução nos espaçamentos de plantio do café proporciona vantagens produtivas, econômicas e ambientais em diferentes condições de cultivo e em distintos ambientes [6-8].

Considerando que o manejo da população de cafeeiros influi em propriedades e características químicas, físicas e biológicas do solo [1], espera-se que a eficiência das adubações, sobretudo a nitrogenada, seja também alterada conforme o arranjo populacional. Nesse contexto, Figueiredo et al. (2006) [9], avaliando a eficiência da adubação com N, P e K, em lavoura de café no sistema de cultivo adensado (2,0 x 0,75 m = 6.667 plantas/ha), relataram reduções de 57%, 90% e 44% nas doses desses nutrientes, para uma mesma produtividade.

A identificação dos arranjos populacionais para o cafeeiro (relação entre espaçamentos e densidades de plantio) que permitam o aumento de produtividade e eficiência de uso de fertilizantes, concomitantemente ao da água, merece especial atenção, uma vez que representa múltiplos benefícios à sociedade, oriundos da interação positiva entre ganhos econômicos e ambientais.

Estudando os efeitos do adensamento de plantio do cafeeiro conilon (*Coffea canephora*) sobre características do solo, Guarçoni (2011) [1] relatou, para a camada superficial e subsuperficial, aumento considerável nos teores de P e K, e no valor da CTC pH 7,0. Nesse sentido, de acordo com o seminal trabalho de Pavan et al. (1994) [6], quando se realiza o plantio adensado do café, pode-se atribuir a melhoria na fertilidade do solo ao adequado controle da erosão, ao maior conteúdo de água no solo e à baixa lixiviação dos cátions, provocada pelo aumento da CTC.

É plausível considerar, a partir disso, que a eficiência das adubações seja também alterada conforme o arranjo populacional, pois o maior conteúdo de água no solo, o aumento da fertilidade e a elevada recuperação de nutrientes proporcionam maior eficiência de aproveitamento dos fertilizantes em plantios mais adensados, mantendo ou até melhorando as características químicas do solo [10].

O nitrogênio (N) é o nutriente absorvido em maior quantidade pela planta de café [11]. Mas é, também, um dos mais perdidos do sistema solo-planta, seja por volatilização [12], seja por lixiviação [13], especialmente quando este nutriente é aplicado na forma de ureia comum [12]. Mesmo assim, o fertilizante nitrogenado mais utilizado no país é a ureia [14], pois apresenta vantagens em relação aos demais, como a elevada concentração de N, a grande solubilidade em água, a baixa corrosividade de equipamentos e o reduzido custo, além de ser um insumo de fácil manipulação e aplicação [15].

Um dos inúmeros desafios da pesquisa com fertilizantes nitrogenados é o desenvolvimento de tecnologias que minimizem as perdas e aumentem o aproveitamento desse importante insumo. Nesse sentido, o adensamento de plantio, que é uma tecnologia extremamente simples e de baixo custo, pode gerar condições propícias para uma menor perda de N, devido ao maior aproveitamento do fertilizante nitrogenado. Outra tecnologia viável é a aplicação de ureia com inibidor de urease, visando reduzir a volatilização da amônia e, como consequência, diminuir as perdas de N, o que em última instância aumenta a eficiência de utilização desse nutriente [16].

O objetivo deste trabalho foi determinar a produtividade, os índices de aproveitamento de N e o retorno econômico da adubação nitrogenada para o café arábica de montanha, na fase inicial de produção, bem como as modificações nas características químicas do solo, decorrentes da

aplicação de doses crescentes de N, na forma de ureia comum ou com inibidor de urease, em plantio convencional, adensado e superadensado.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em área pertencente a cafeicultor inserido no sistema de cafeicultura de montanha, em Latossolo Vermelho-Amarelo textura média (Tabela 1), no município de Brejetuba-ES (20°09'17.5"S e 41°17'28.3"W). Foram realizados dois experimentos concomitantemente, em área contígua, cultivando-se o café arábica cultivar Catuaí Vermelho IAC 144, por ser o padrão representativo da cafeicultura de montanha.

Tabela 1 – Características e propriedades químicas^{1/} do solo onde foram implantados os experimentos.

pH	P	K	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	CTCe	CTC	pH 7,0	V	m	MO
	mg/dm ³		----- cmol _c /dm ³				-----		----	%	----	dag/kg
5,5	4,2	76,8	1,1	0,4	0,0	3,6	1,7	5,3	32,0	0,0	2,7	

^{1/} De acordo com Teixeira et al. (2017) [17].

Os tratamentos nos dois experimentos foram originados do fatorial (2 x 5 + 2), perfazendo um total de 12 tratamentos por experimento. Em cada experimento foram testados dois espaçamentos nas linhas de plantio (0,5 e 1,0 m) e cinco doses anuais de N no estágio de produção: 140; 220; 300; 380 e 460 kg ha⁻¹ de N, aplicadas a lanço na forma de ureia comum. Os tratamentos adicionais consistiram das duas doses de N mais próximas do ponto central do espaço experimental (220 e 380 kg ha⁻¹ de N), na forma de ureia protegida com inibidor de urease (Cu + B), aplicadas apenas no espaçamento de 1 m na linha de plantio, por ser este o espaçamento tradicional para o café arábica [18]. Os dois experimentos foram diferentes, pois apresentavam distintos espaçamentos nas entrelinhas de plantio. No primeiro experimento (Exp.1) o espaçamento foi de 2,0 m e no segundo (Exp.2) foi de 2,5 m entrelinhas.

Os tratamentos foram distribuídos em blocos casualizados com três repetições, gerando 36 parcelas experimentais para cada experimento. As parcelas foram constituídas por sete plantas de café numa mesma linha de plantio, sendo consideradas úteis as cinco centrais.

Antes do plantio, as covas receberam calagem e adubação de acordo com Guimarães et al. (1999) [19]. As doses de nitrogênio foram parceladas em três aplicações anuais, sendo diferenciadas apenas no estágio de produção. Os tratos culturais e os demais nutrientes, foram aplicados, anualmente, como fatores mantidos constantes, seguindo as recomendações de Mesquita et al. (2016) [18] e Guimarães et al. (1999) [19], respectivamente.

Na primeira produção consistente das plantas (segunda colheita), que ocorreu em 2021, foram determinadas as produtividades de café maduro e de café beneficiado por parcela (fator de conversão de 6:1), sendo esta última transformada em produtividade por hectare (sacas 60 kg ha⁻¹). Foi realizada análise de solo após a colheita do experimento, sendo determinadas características e propriedades químicas do solo, conforme Teixeira et al. (2017) [17]. Foram determinados, também, os índices de aproveitamento de N (kg café beneficiado/kg de N aplicado) para cada tratamento. Além disso, foram calculados a renda bruta do café arábica por hectare e o retorno econômico da adubação nitrogenada (R\$ recebido/R\$ investido em N), utilizando-se a cotação de R\$ 940,00 por saca de café beneficiado (60 kg) e R\$ 180,00 por saca de ureia comum com 45% de N (50 kg), sendo os valores apurados em abril de 2023.

Foi realizada análise de variância individual de cada experimento, sendo os dados qualitativos comparados por contrastes ortogonais (até $p \leq 0,10$) e os quantitativos por análise de regressão, definindo os modelos com base no comportamento esperado, na significância dos coeficientes (até $p \leq 0,10$) e no valor do R², de acordo com Alvarez e Alvarez (2003) [20]. Os dados foram analisados estatisticamente utilizando o programa SAEG-UFV (2007) [21].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos dois experimentos, a maior densidade de plantio proporcionou aumento na produtividade de café (Tabelas 2 e 3). O incremento na produtividade, oriundo de um maior adensamento de plantio, é consistente e de grande reprodutibilidade, como relatado em trabalhos publicados sobre o tema, a exemplo Bragança et al. (2009) [8], Silveira et al. (2018) [22] e Tran et al. (2021) [4].

No experimento 1 (Exp.1), o adensamento do plantio, ao se passar de 5.000 para 10.000 pl/ha, promoveu, em média, aumento produtivo de 29 sc ha⁻¹, ou 102% de incremento. Já no experimento 2 (Exp.2), ao se passar de 4.000 para 8.000 pl/ha, houve aumento médio de 24 sc ha⁻¹, com os mesmos 102% de incremento produtivo. Nos dois casos, o incremento no número de plantas foi de 100%. Esse fato é revelador, pois define um aumento proporcional na produtividade de acordo com o número de plantas cultivadas por hectare, na primeira produção consistente após o plantio.

Tabela 2 – Contrastes médios da produtividade de café arábica beneficiado (sc ha⁻¹) de acordo com o espaçamento de plantio na linha e com a proteção ou não da ureia (Experimento 1 – 2,0 m na entrelinha).

Contrastes ^{1/}	Valor do Contraste
0,5 vs 1,0 m d/Uc	28,8981**
Uc vs Ui d/1,0 m	-1,5046 ^{ns}
220 vs 380 kg ha ⁻¹ d/Ui	-1,2731 ^{ns}

^{1/} 0,5 e 1,0 m = espaçamentos na linha de plantio x 2,0 m entrelinhas; Uc = Ureia comum; Ui = Ureia protegida com inibidor da urease; 220 e 380 doses de N em kg ha⁻¹. ** significativo ao nível de 1% de probabilidade, ^{ns} não significativo ao nível de 10% de probabilidade.

Tabela 3 – Contrastes médios da produtividade de café arábica beneficiado (sc ha⁻¹) de acordo com o espaçamento de plantio na linha e com a proteção ou não da ureia (Experimento 2 – 2,5 m na entrelinha).

Contrastes ^{1/}	Valor do Contraste
0,5 vs 1,0 m d/Uc	23,55**
Uc vs Ui d/1,0 m	-1,71 ^o
220 vs 380 kg ha ⁻¹ d/Ui	-0,46 ^{ns}

^{1/} 0,5 e 1,0 m = espaçamentos na linha de plantio x 2,5 m entrelinhas; Uc = Ureia comum; Ui = Ureia protegida com inibidor da urease; 220 e 380 doses de N em kg ha⁻¹. ** e ^o significativo aos níveis de 1 e 10% de probabilidade, respectivamente; ^{ns} não significativo ao nível de 10% de probabilidade.

O efeito do tipo de ureia, por outro lado, foi diferente entre os experimentos. No Exp.1, onde o espaçamento na entrelinha foi menor (2,0 m), a produtividade não foi influenciada pelo tipo de ureia utilizada ou pela dose de ureia com inibidor de urease (Tabela 2). Já no Exp.2, onde o espaçamento na entrelinha foi maior (2,5 m), a utilização da ureia com inibidor promoveu maior produtividade de café do que a comum, mas sem efeito de dose (Tabela 3). Dessa forma, fica evidente que o inibidor de urease aumenta a eficiência da ureia em espaçamentos mais largos, uma vez que nessa condição o N é perdido por volatilização a maiores taxas, como reportado por Abalos et al. (2014) [23], considerando as perdas de N, por lixiviação, equivalentes entre os dois tipos de ureia, quando aplicadas em doses usuais [12].

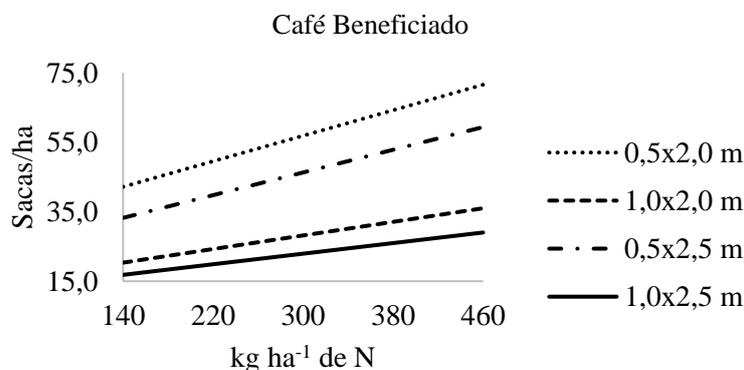
Cultivando o café Catuaí Vermelho, num espaçamento de plantio considerado mais aberto para o café arábica (4.902 pl/ha), no Sul de Minas Gerais, Sarkis et al. (2023) [24] relataram perdas por volatilização na ordem de 22,8% para a ureia comum e de 19,8% para a ureia com inibidor de urease (NBPT), aplicando-se 400 kg ha⁻¹ de N. Para os mesmos autores, quando se reduziu a dose de N para 150 kg ha⁻¹, as perdas foram de 22 e 16,9% para a ureia comum e a ureia com NBPT, respectivamente, demonstrando maior eficiência do inibidor em menores doses de N, fato não comprovado no presente trabalho (Tabelas 2 e 3). As perdas de N por volatilização de

amônia, contudo, podem alcançar 30% do que foi aplicado na forma de ureia, com picos de volatilização entre 6 e 12 dias, dependendo do inibidor utilizado [25, 26]. Por outro lado, Abranches et al. (2019) [27], cultivando café arábica em baixíssima densidade de plantas (3.125 pl/ha), não observaram diferença na produtividade alcançada com ureia comum ou com ureia revestida, em solo arenoso sem irrigação, ou seja, condições aparentemente favoráveis à volatilização de amônia.

Mesmo em estágio inicial de crescimento, o volume total de raízes gerado por plantas cultivadas em espaçamento reduzido tende a ser mais elevado, acarretando melhor aproveitamento do nitrogênio aplicado na forma de ureia comum [28]. Outros fatores como menor temperatura superficial, maior teor de umidade na superfície do solo e menor exposição a ventos, em plantios mais adensados, podem também explicar o adequado aproveitamento do N fornecido pela ureia comum, como relatado por Pavan et al. (1994) [6] e por Abalos et al. (2014) [23], gerando a equivalência produtiva entre a ureia comum e a ureia protegida no Exp.1 (Tabela 2). Já no Exp.2, onde a entrelinha era mais aberta e a densidade de plantas menor, o aproveitamento do N oriundo da ureia comum foi reduzido, pois é muito provável que tenha ocorrido maior perda de N por volatilização, explicando a superioridade produtiva proporcionada pela ureia com inibidor (Tabela 3). O incremento produtivo da ureia com inibidor comparada à ureia comum foi, nesse caso, de 7,4% em sacas por hectare. Para Souza et al. (2018) [12], a perda de N por volatilização de ureia foi da ordem de 11,21 e 3,51% para a ureia comum e a ureia com inibidor, respectivamente. Essa diferença foi de 7,7%, ou seja, praticamente igual ao incremento produtivo gerado pela ureia com inibidor no presente estudo.

Em termos práticos, o incremento produtivo, apesar de significativo, deve ser considerado no momento de escolher o fertilizante nitrogenado, tomando a decisão com base no balanço entre renda presumível e custo do produto.

A produtividade de café beneficiado por hectare aumentou linearmente de acordo com incremento nas doses de N, como observado por Abranches et al. (2019) [27], mas com maiores produtividades e coeficientes de declividade para o menor espaçamento na linha de plantio, e consequente maior densidade de plantas (Figura 1).



Espaçamento	Equação	R ²
0,5 x 2,0 m	$\hat{Y} = 30,9 + 0,0877^{**}N$	0,99
1,0 x 2,0 m	$\hat{Y} = 14,3 + 0,0470^{**}N$	0,96
0,5 x 2,5 m	$\hat{Y} = 23,3 + 0,0780^{**}N$	0,99
1,0 x 2,5 m	$\hat{Y} = 12,1 + 0,0367^{**}N$	0,95

Figura 1 – Produtividade estimada de café arábica beneficiado de acordo com doses crescentes de N (ureia comum), em quatro espaçamentos de plantio.

A maior dose de N testada é compatível com as doses recomendadas pelos manuais de correção do solo e adubação dos estados de SP, MG e ES [19, 29, 30], para uma produção em torno de 60 sc ha⁻¹ do cafeeiro arábica. Esses manuais, contudo, consideram, para a definição de doses recomendáveis de N, apenas a carga pendente e, no caso do Boletim 100 de SP e da

5ª aproximação de MG, o teor foliar de N. Por outro lado, os manuais de recomendação deveriam levar em consideração também, além dessas condições destacadas, a densidade de plantas, uma vez que para uma mesma dose de N são alcançadas diferentes produtividades, de acordo com o espaçamento de plantio, como observado no presente estudo (Figura 1). As doses podem ser menores, para uma mesma produtividade, caso a densidade de plantas seja maior. Isso não significa que menores quantidades de nutrientes serão extraídas. Pelo contrário, uma maior produção de tecido vegetal, quando há incremento na população de plantas, certamente irá demandar maior quantidade de nutrientes, e isso é inegável. Contudo, o elevado aproveitamento dos fertilizantes, gerado pelo adensamento, irá compensar essa maior demanda, proporcionando a maior produtividade para uma mesma dose de N, o que é discutido pormenorizadamente por Guarçoni (2011) [1] e Ronchi et al. (2015) [28].

O aumento de produtividade em relação ao adensamento foi consistente e proporcional para todas as doses do espaço experimental testado (Figura 1). Alguns cenários podem ser estabelecidos a partir dos modelos de resposta selecionados. Utilizando-se como dose básica 460 kg ha^{-1} de N, seriam alcançadas produtividades de café beneficiado na ordem de 70,6; 58,7; 35,3 e $28,7 \text{ sc ha}^{-1}$, utilizando-se, respectivamente, 10.000, 8.000, 5.000 e 4.000 plantas/ha. Comparando a produtividade estimada com 4.000 e 10.000 pl/ha, foi observado incremento produtivo de $41,9 \text{ sc ha}^{-1}$ de café beneficiado, ou 146% de aumento, o que é bem próximo do incremento no número de plantas, que foi de 150% (4.000 para 10.000). Os incrementos produtivos obtidos são proporcionais e praticamente idênticos ao incremento no número de plantas cultivadas por hectare, fato extremamente revelador e já demonstrado anteriormente no presente estudo.

No cafeeiro conilon, Bragança et al. (2009) [8] relataram efeito linear do adensamento de plantio em relação à produtividade, passando de 43,8 para $57,2 \text{ sc ha}^{-1}$ de café beneficiado ao cultivar 2.222 ou 5.000 plantas/ha, respectivamente, ou seja, 30,6% de incremento produtivo para 125% de aumento no número de plantas. Este é um incremento produtivo, em relação ao aumento no número de plantas, bem menor do que o encontrado no estudo atual. Contudo, deve-se destacar que, neste, foi avaliado o primeiro ano estável de produção (2º ano de produção), enquanto no trabalho de Bragança et al. (2009) [8] foi avaliada a produtividade correspondente a uma média de sete colheitas consecutivas. Portanto, é possível inferir que, à medida que as plantas se desenvolvam em lavouras adensadas, há tendência de incremento produtivo decrescente, haja vista que pode ocorrer autossombreamento, reduzindo a produção de grãos de café por planta, como observado por Ronchi et al. (2016) [31] e comprovado por Tamirat et al. (2021) [32] que relatam menor eficiência de parâmetros fisiológicos em plantios mais adensados de café. Esse fato é reforçado por Postma et al. (2021) [33] que sustentam haver maior influência do autossombreamento na redução da produtividade em plantios adensados, em relação à competição por nutrientes.

Importante ressaltar que, no estudo de Bragança et al. (2009) [8], a produção por planta diminuiu quando se aumentou a densidade de plantas, mesmo que tenha ocorrido incremento produtivo por hectare, enquanto no presente estudo, a produção por planta não sofreu impacto do adensamento de plantio. Dessa forma, o adensamento de plantio se mostra prática altamente benéfica nos primeiros estádios de produção, mas com o desenvolvimento das plantas, a supressão de algumas delas na linha pode ser realizada, de forma a alcançar um arranjo adequado para cada fase fenológica e produtividade máxima.

As características químicas do solo avaliadas não foram influenciadas pelos espaçamentos na linha de plantio, pela utilização de ureia comum em relação à protegida, ou pela dose de ureia protegida aplicada, em nenhum dos dois experimentos, fato este revelado pela análise de contrastes (resultados não apresentados). Guarçoni (2011) [1], contudo, observou diferenças marcantes nas concentrações de P e K do solo, de acordo com o espaçamento de plantio do café conilon, mas isso só correu quando foram aplicadas elevadas doses dos nutrientes.

Ao se aumentar as doses de N, na forma de ureia comum, foram observados, contudo, efeitos marcantes sobre as características químicas do solo, de forma mais consistente para o aumento linear da acidez do solo provocado pela aplicação de ureia (Tabela 4).

A acidificação do solo a partir da aplicação de fertilizantes nitrogenados é bem conhecida, sendo expressiva no processo de nitrificação, onde são gerados dois íons H^+ para cada amônio

(NH_4^+) convertido em nitrato (NO_3^-) [34]. Como na hidrólise da ureia, promovida pela urease, são formados íons OH^- , a acidificação gerada por este fertilizante, apesar de significativa, é menor do que a provocada por sulfato de amônio ou nitrato de amônio, por exemplo [35, 36].

As demais características e propriedade avaliadas não foram afetadas de forma clara, uma vez que a relação causa:efeito não foi consistente entre os espaçamentos de plantio estudados (Tabela 4).

Tabela 4 – Equações de regressão^{1/} de características químicas do solo de acordo com a aplicação de doses crescentes N na forma de ureia comum em plantio de café arábica nos espaçamentos de 0,5 x 2,0 m; 1,0 x 2,0 m e 0,5 x 2,5 m.

Espaçamento de 0,5 x 2,0 m		
Característica	Equação	R ²
pH	$\hat{Y} = 6,32 - 0,0019^{**}N$	0,97
Al ³⁺	$\hat{Y} = -0,043 + 0,00047^{*}N$	0,68
H+Al	$\hat{Y} = 2,19 + 31,99^{**}N$	0,90
t	$\hat{Y} = 11,8 - 1,22N^{0,5} + 0,37^{*}N$	0,92
V	$\hat{Y} = 150,9 - 13,00N^{0,5} + 0,36^{*}N$	0,89
Espaçamento de 1,0 x 2,0 m		
Característica	Equação	R ²
pH	$\hat{Y} = 5,82 - 0,0005^{*}N$	0,60
Ca ²⁺	$\hat{Y} = 1,84 - 0,0021^{*}N$	0,78
Mg ²⁺	$\hat{Y} = 0,57 - 0,00055^{*}N$	0,69
SB	$\hat{Y} = 2,64 - 0,027^{*}N$	0,80
t	$\hat{Y} = 2,76 - 0,026^{*}N$	0,78
MO	$\hat{Y} = 4,61 - 0,0059^{*}N$	0,94
Mn	$\hat{Y} = 9,74 - 0,15^{**}N$	0,96
Espaçamento de 0,5 x 2,5 m		
Característica	Equação	R ²
pH	$\hat{Y} = 6,76 - 0,0099N + 0,00002^{o}N^2$	0,78
Al ³⁺	$\hat{Y} = -0,21 + 0,0029N - 0,000005^{*}N^2$	0,92
H+Al	$\hat{Y} = 1,55 + 1,88N - 0,000034^{*}N^2$	0,95
V	$\hat{Y} = 45,4 - 0,122N + 0,00022^{*}N^2$	0,87

^{1/} Apresentadas apenas as equações significativas; **, * e ° significativo aos níveis de 1, 5 e 10% de probabilidade, respectivamente.

O Índice de aproveitamento de N seguiu a mesma tendência nos experimentos 1 e 2 (Tabelas 5 e 6). Este índice foi mais elevado na maior densidade de plantas e na menor dose de ureia protegida utilizada. A ureia protegida proporcionou maior aproveitamento do N, independentemente se o espaçamento nas entrelinhas era de 2,0 ou 2,5 m (Tabelas 5 e 6).

Tabela 5 – Contrastes médios de índice de aproveitamento de N (kg café beneficiado/kg de N) pelo café arábica de acordo com o espaçamento de plantio na linha e com a proteção ou não da ureia (Exp.1).

Contrastes ^{1/}	Valor do Contraste
0,5 vs 1,0 m d/Uc	6,42 ^{**}
Uc vs Ui d/1,0 m	-0,46 ^o
220 vs 380 kg ha ⁻¹ d/Ui	3,17 ^{**}

^{1/} 0,5 e 1,0 m = espaçamentos na linha de plantio x 2,0 m entrelinhas; Uc = Ureia comum; Ui = Ureia protegida com inibidor da urease; 220 e 380 doses de N em kg ha⁻¹. ** e ° significativo aos níveis de 1 e 10% de probabilidade, respectivamente.

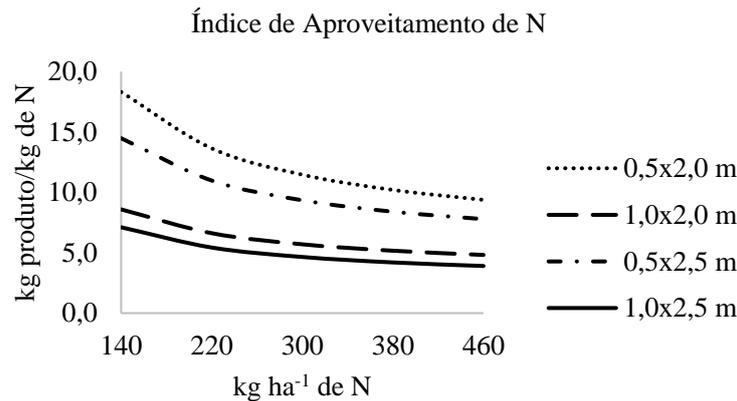
Tabela 6 – Contrastes médios de índice de aproveitamento de N (kg café beneficiado/kg de N) pelo café arábica de acordo com o espaçamento de plantio na linha e com a proteção ou não da ureia (Exp.2).

Contrastes ^{1/}	Valor do Contraste
0,5 vs 1,0 m d/Uc	5,14**
Uc vs Ui d/1,0 m	-0,48°
220 vs 380 kg ha ⁻¹ d/Ui	2,76**

^{1/} 0,5 e 1,0 m = espaçamentos na linha de plantio x 2,5 m entrelinhas; Uc = Ureia comum; Ui = Ureia protegida com inibidos da urease; 220 e 380 doses de N em kg ha⁻¹. ** e ° significativo aos níveis de 1 e 10% de probabilidade, respectivamente.

Menores doses de N tendem a ser mais bem aproveitadas, uma vez que as perdas são reduzidas, em relação a doses mais elevadas [13, 37]. O maior aproveitamento de N oriundo da ureia com inibidor se deve à mais intensa perda de N por volatilização a partir da ureia comum, como relatado por Abalos et al. (2014) [23]. A maior presença de efeitos significativos no aproveitamento de N (Tabelas 5 e 6), quando comparada à produtividade (Tabelas 2 e 3), se deve à relação “kg café beneficiado/kg de N”. Se uma mesma produtividade é obtida com uma dose menor, obviamente o aproveitamento de N será positivo e altamente significativo, como ficou demonstrado.

Considerando a ureia comum, o índice de aproveitamento do N foi também maior nos espaçamentos mais adensados e nas menores doses, reduzindo-se de forma assintótica quando se elevaram as doses de N (Figura 2).



Espaçamento	Equação	R ²
0,5 x 2,0 m	$\hat{Y} = 5,47 + 1797,90^{**}(1/N)$	0,99
1,0 x 2,0 m	$\hat{Y} = 3,17 + 757,59^{**}(1/N)$	0,97
0,5 x 2,5 m	$\hat{Y} = 4,85 + 1348,55^{**}(1/N)$	0,99
1,0 x 2,5 m	$\hat{Y} = 2,50 + 645,11^{**}(1/N)$	0,96

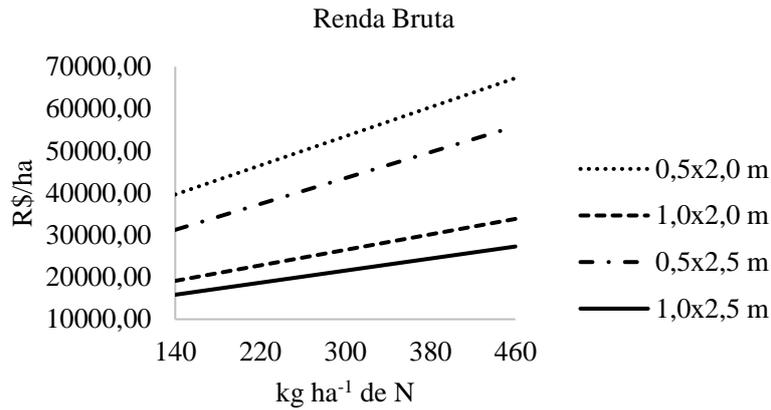
Figura 2 – Índices de aproveitamento de N do café arábica (kg produto/kg de N) de acordo com doses crescentes de N, na forma de ureia comum, em quatro espaçamentos de plantio.

Isso demonstra maior efetividade e recuperação do N fornecido pela ureia, protegida ou não, quando é aplicada em lavouras mais adensadas e em menores doses. Nos menores espaçamentos, ou seja, maior densidade de plantas, o aproveitamento dos fertilizantes é maior, como observado por Figueiredo et al. (2006) [9], devido ao maior acúmulo de nutrientes no solo [1], ao incremento no volume radicular total [28] e ao maior conteúdo de água no solo [7], especialmente quando são aplicadas doses mais baixas de N [13, 37].

A renda bruta por hectare apresentou incremento linear em decorrência do aumento das doses de N. Como seria de esperar, o maior adensamento de plantas proporcionou maior renda bruta do que os demais, representando em torno de 150% de aumento na renda bruta para uma mesma dose de N, ao se passar de 4.000 pl/ha para 10.000 pl/ha (Figura 3). Nesse sentido, de acordo Suryadi

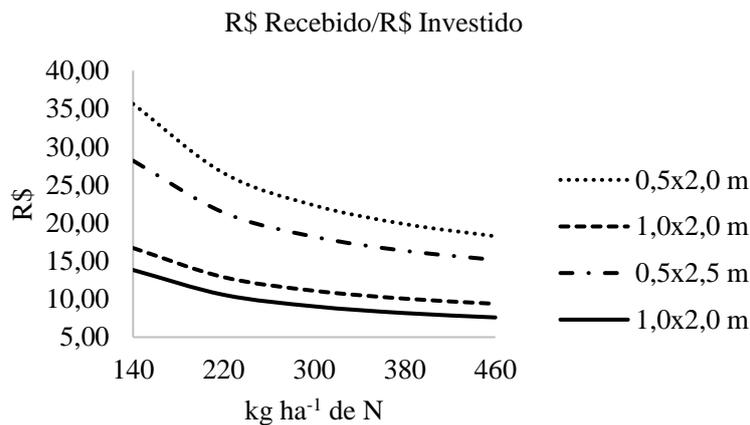
et al. (2021) [38], maior lucratividade é alcançada em lavouras de café mais adensadas, quando comparadas a lavouras plantadas em espaçamento mais aberto.

O retorno econômico por real investido em adubo nitrogenado seguiu a mesma dinâmica do índice de aproveitamento (Figuras 2 e 4). Vale ressaltar que, no plantio mais adensado (10.000 pl/ha), utilizando-se a menor dose de N (140 kg ha⁻¹ de N), o retorno econômico foi de R\$ 35,86 para cada R\$ 1,00 investido em adubo nitrogenado. Nessa mesma dose de N, o retorno econômico para cada R\$ 1,00 investido em adubo nitrogenado caiu para R\$ 13,91; ao se utilizar o menor adensamento de plantio (4.000 pl/ha) (Figura 4).



Espaçamento	Equação	R ²
0,5 x 2,0 m	$\hat{Y} = 29087,2 + 82,4404^{**}N$	0,99
1,0 x 2,0 m	$\hat{Y} = 13395,5 + 44,1985^{**}N$	0,96
0,5 x 2,5 m	$\hat{Y} = 21868,1 + 73,3287^{**}N$	0,99
1,0 x 2,5 m	$\hat{Y} = 11386,6 + 34,4884^{**}N$	0,95

Figura 3 – Renda bruta do café arábica beneficiado de acordo com doses crescentes de N, na forma de ureia comum, em quatro espaçamentos de plantio.



Espaçamento	Equação	R ²
0,5 x 2,0 m	$\hat{Y} = 10,71 + 3520,89^{**}(1/N)$	0,99
1,0 x 2,0 m	$\hat{Y} = 6,22 + 1483,61^{**}(1/N)$	0,97
0,5 x 2,5 m	$\hat{Y} = 9,50 + 2640,92^{**}(1/N)$	0,99
1,0 x 2,5 m	$\hat{Y} = 4,89 + 1263,33^{**}(1/N)$	0,96

Figura 4 – Retorno econômico para cada real investido em N, na forma de ureia comum, para o café arábica, de acordo com doses crescentes de N em quatro espaçamentos de plantio.

À medida que as doses de N foram aumentadas em todos os espaçamentos de plantio, o retorno econômico caiu paulatinamente, passando para R\$ 18,36 e R\$ 7,64 na maior dose de N, aplicada no plantio mais adensado e no menos adensado, respectivamente (Figura 4).

Em termos práticos, é possível inferir que o cafeicultor com menor capacidade de investimento deva priorizar plantios mais adensados e a utilização de menores doses de fertilizantes nitrogenados, uma vez que o maior retorno econômico ocorreria nessa situação. Contudo, para obter a maior renda bruta nas primeiras produções estáveis de uma lavoura, o cafeicultor deve realizar o plantio adensado, utilizando elevadas doses de N. À medida que o plantio se desenvolva, outros arranjos espaciais de plantas devem ser utilizados, de forma a reduzir o possível autossombreamento e a consequente queda na produtividade.

4. CONCLUSÃO

O adensamento de plantio do café aumenta, de forma acentuada, a produtividade e o aproveitamento do fertilizante nitrogenado na primeira colheita consistente, sem reduzir a produção por planta. A ureia com inibidor de urease é mais eficiente do que a comum em espaçamentos de plantio mais abertos. Elevada renda bruta na primeira colheita consistente é obtida no plantio mais adensado e com maior dose de N, mas o maior retorno econômico por unidade investida em fertilizante nitrogenado ocorre em plantio mais adensado ao se aplicar menores doses de N. A única característica do solo influenciada de forma consistente pela adubação nitrogenada foi a acidez, sendo que o pH diminuiu com o incremento das doses de N na forma de ureia comum.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa do Café pelo financiamento do trabalho e à FAPES pela concessão da bolsa de Iniciação Científica.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Guarçoni A. Características da fertilidade do solo influenciadas pelo plantio adensado de café conilon. *Semin Ciênc Agrar*. 2011 ago;32(3):949-58. doi: 10.5433/1679-0359.2011v32n3p949
2. Souza CAS, Dias LAD, Aguilar MAG, Sonegheti S, Oliveira J, Costa JLA. Cacao yield in different planting densities. *Braz Arch Biol Technol*. 2009 Dec;52(6):1313-20. doi: 10.1590/S1516-89132009000600001
3. Bruin JL, Pedersen P. New and old soybean cultivar responses to plant density and intercepted light. *Crop Sci*. 2009 Nov;49(6):2225-32. doi: 10.2135/cropsci2009.02.0063
4. Tran HTM, Nathan S, Ilmma A, Burkiewicz M, Wisana IDGK. Identifying limiting factors for feasible productivity improvement for smallholder farmers in coffee sector in Indonesia. *Asian J Agric*. 2021 Dec;5(2):53-60. doi: 10.13057/asianjagric/g050202
5. Seremba G, Kagezi GH, Kobusinge J, Musoli P, Akodi D, Olango N, et al. High Robusta coffee plant density is associated with better yield potential at mixed responses for growth robustness, pests and diseases: which way for a farmer? *Aust J Crop Sci*. 2021 May;15(4):494-504. doi: 10.21475/ajcs.21.15.04.p2676
6. Pavan MA, Chaves JCD, Androcioli Filho A. Produção de café em função da densidade de plantio, adubação e tratamento fitossanitário. *Turrialba*. 1994;44(4):227-31.
7. Pavan MA, Chaves JCD, Siqueira R, Androcioli Filho A, Colozzi Filho A, Balota EL. High coffee population density to improve fertility of an oxisol. *Pesq Agropec Bras*. 1999;34(3):459-65. doi: 10.1590/S0100-204X1999000300018
8. Bragança SM, Silva EB, Guarçoni A, Santos LP, Lani JA, Volpi PS. Resposta do cafeeiro conilon à adubação de NPK em sistema de plantio adensado. *Coffee Sci*. 2009 jun; 4(1):67-75.
9. Figueiredo FC, Furtini Neto AE, Guimarães PTG, Silva EB, Botrel PP. Eficiência da adubação com NPK na produção de cafezais adensados na região Sul de Minas Gerais. *Coffee Sci*. 2006 jul;1(2):135-42.
10. Guarçoni A. Reflexões sobre nutrição e adubação do cafeeiro. Curitiba (PR): Editora PRISMAS; 2016.

11. Lima LC, Gonçalves AC, Fernandes ALT, Silva RO, Lana RMQ. Crescimento e produtividade do cafeeiro irrigado, em função de diferentes fontes de nitrogênio. *Coffee Sci.* 2016 jan;11(1):97-107.
12. Souza JA, Rocha GC, Gomes MP, Rezende CHS. Nitrogen dynamics in a Latosol cultivated with Coffee. *Rev Bras Eng Agric Ambient.* 2018 Jun;22(6):390-5. doi: 10.1590/1807-1929/agriambi.v22n6p390-395
13. Bortolotto RP, Bruno IP, Dourado-Neto D, Timm LC, Silva NA, Reichardt K. Nitrate leaching through climatologic water balance in a fertigated coffee plantation. *Rev Ceres.* 2013 Nov;60(6):785-92. doi: 10.1590/S0034-737X2013000600006
14. Longhini VZ, Ítavo LCV, Gurgel ALC, Cardoso AS, Boddey RM, Difante GS, et al. Mathematical models for adjustments in the quantification of ammonia volatilization from urea fertilizer applied on tropical pastures. *Cienc Rural.* 2024 May;54(5):1-10. doi: 10.1590/0103-8478cr20230230
15. Ruark MD, Soratto RP, Rosen CJ. Merits and limitations of enhanced efficiency fertilizers. In: Lal R, Stewart BA, editors. *Soil nitrogen uses and environmental impacts.* Boca Raton (US): CRC Press; 2018. p. 289-311. doi: 10.1201/b22044
16. Guelfi DR. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. *Inf Agron.* 2017 mar;157:1-14.
17. Teixeira PC, Donagemma GK, Fontana A, Teixeira WG. *Manual de métodos de análise de solo.* 3. ed. Brasília (DF): EMBRAPA; 2017.
18. Mesquita CM, Melo EM, Rezende JE, Carvalho JS, Fabri Júnior MA, Moraes NC, et al. *Manual do café: implantação de cafezais Coffea arabica L.* Belo Horizonte (MG): EMATER-MG; 2016.
19. Guimarães PTG, Garcia AWR, Alvarez V VH, Prezotti LC, Viana AS, et al. Cafeeiro. In: Ribeiro AC, Guimarães PTG, Alvarez V VH, editores. *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (5ª Aproximação).* Viçosa (MG): Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais; 1999. p. 289-302.
20. Alvarez VVH, Alvarez GAM. Apresentação de equações de regressão e suas interpretações. *Bol Inf SBCS.* 2003;28(3):28-32.
21. Saeg. *Sistema para Análises Estatísticas: Versão 9.1.* Viçosa (MG): Fundação Arthur Bernardes-UFV; 2007.
22. Silveira JMC, Nasser MD, Mariano-Nasser FAC, Pagliarini MK, Giomo GS. Population density of Arabica coffee cultivars for bean quality and yield. *Pesq Agropec Trop.* 2018 Oct-Dec;48(4):358-63. doi: 10.1590/1983-40632018v48i4p358-363
23. Abalos D, Jeffery S, Sanz-Cobena A, Guardia G, Vallejo A. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agric Ecosyst Environ.* 2014 May;189:136-44. doi: 10.1016/j.agee.2014.03.036
24. Sarkis LF, Mateus Portes Dutra MP, Oliveira DP, Fernandes TJ, Souza TR, Builes VR, et al. Ammonia volatilization from conventional and stabilized fertilizers, agronomic aspects and microbiological attributes in a Brazilian coffee crop system. *Front Plant Sci.* 2023 Dec;8(14):1-16. doi: 10.3389/fpls.2023.1291662
25. Dominghetti AW, Guelfi DR, Guimarães RJ, Caputo ALC, Spehar CR, Faquin V. Nitrogen loss by volatilization of nitrogen fertilizers applied to coffee orchard. *Cien Agrotec.* 2016 Apr;40(2):173-83. doi: 10.1590/1413-70542016402029615
26. Barberena IM, Espíndula MC, Araújo LFB, Marcolan AL. Use of urease inhibitors to reduce ammonia volatilization in Amazonian soils. *Pesq Agropec Bras.* 2019;54:e00253. doi: 10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00253
27. Abranches JL, Soratto RP, Perdoná MJ, Parecido RJ. Arabica coffee response to rates of coated and conventional urea in sandy soil. *Pesq Agropec Bras.* 2019;54:e00767. doi: 10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00767
28. Ronchi CP, Sousa Júnior JM, Almeida WL, Souza DS, Silva NO, Oliveira LB, et al. Morfologia radicular de cultivares de café arábica submetidas a diferentes arranjos espaciais. *Pesq Agropec Bras.* 2015;50(3):187-95. doi: 10.1590/S0100-204X2015000300001
29. Rajj B, Cantarella H, Quaggio JA, Furlani AMC, editores. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo.* 2. ed. rev. e atual. Campinas (SP): Instituto Agrônomo/Fundação IAC; 1997. (Boletim Técnico, 100).
30. Lani JA, Prezotti LC, Bragança SM. Cafeeiro. In: Prezotti LC, Gomes JA, Dadalto GG, Oliveira JA, editores. *Manual de recomendação de calagem e adubação para o estado do Espírito Santo.* Vitória (ES): SEEA/INCAPER/CEDAGRO; 2007. p. 111-8.
31. Ronchi CP, Almeida WL, Souza DS, Sousa Júnior JM, Guerra AMNM, Pimenta PHC. Morphophysiological plasticity of plagiotropic branches in response to change in the coffee plant spacing within rows. *Semin Cienc Agrar.* 2016 Jul;37(6):3819-34. doi: 10.5433/1679-0359.2016v37n6p3819

32. Tamirat W, Gobena A, Kufa T. Effect of planting density and fertilizer rate on some physiological parameters of arabica coffee seedlings. *Int J Technol Sci Soc.* 2021 Oct;9(5):222-7. doi: 10.11648/j.ijsts.20210905.13
33. Postma JA, Hecht VL, Hikosaka K, Nord EA, Pons TL, Poorter H. Dividing the pie: a quantitative review on plant density responses. *Plant Cell Environ.* 2021 Apr;44(4):1072-94. doi: 10.1111/pce.13968
34. Guarçoni A, Esposti MDD, Caetano LCS. Doses de nitrogênio e potássio para fertirrigação do morangueiro e sua influência em características químicas do solo. *Sci Plena.* 2023 ago;19(8):1-11. doi: 10.14808/sci.plena.2023.080201
35. Rosado TL, Gontijo I, Almeida MS, Andrade FV. Fontes e doses de nitrogênio e alterações nos atributos químicos de um latossolo cultivado com capim-mombaça. *Rev Bras Ci Solo.* 2014 jun;38(3):840-9. doi: 10.1590/S0100-06832014000300015
36. Caires EF, Milla R. Adubação nitrogenada em cobertura para o cultivo de milho com alto potencial produtivo em sistema de plantio direto de longa duração. *Bragantia.* 2016 mar;75(1):87-95. doi: 10.1590/1678-4499.160
37. Tasca FA, Ernani PR, Rogeri DA, Gatiboni LC, Cassol PC. Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. *Rev Bras Ci Solo.* 2011 abr;35(2):493-502. doi: 10.1590/S0100-06832011000200018
38. Suryadi S, Fadli F, Sinta I. Comparative analysis of advantages of coffee farming with different cultivation systems and planting distances. *Morfai Journ.* 2021 Nov;1(2):199-204. doi: 10.54443/morfai.v1i2.69