



TAINAH FREITAS

**FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO CONTROLADA E SEUS
“BLENDS” COM UREIA TRATADA COM INIBIDOR DE
UREASE PARA O CAFEIEIRO**

**LAVRAS - MG
2020**

TAINAH FREITAS

**FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO CONTROLADA E SEUS “BLENDS” COM
UREIA TRATADA COM INIBIDOR DE UREASE PARA O CAFEIEIRO**

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

Prof. Dr. Rubens José Guimarães
Orientador

Prof. Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva
Coorientador

**LAVRAS - MG
2020**

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

Freitas, Tainah.

Fertilizantes de liberação controlada e seus “blends” com ureia
tratada com inibidor de urease para o cafeeiro / Tainah Freitas. -
2020.

126 p. : il.

Orientador(a): Rubens José Guimarães.

Coorientador(a): Douglas Ramos Guelfi Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2020.

Bibliografia.

1. Adubação nitrogenada. 2. Volatilização de amônia. 3.
Estoque de N. I. Guimarães, Rubens José. II. Silva, Douglas Ramos
Guelfi. III. Título.

TAINAH FREITAS

**FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO CONTROLADA E SEUS “BLENDS” COM
UREIA TRATADA COM INIBIDOR DE UREASE PARA O CAFEIEIRO**

**CONTROLLED-RELEASE FERTILIZERS AND THEIR BLENDS WITH UREASE
INHIBITOR-TREATED UREA FOR COFFEE TREES**

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

APROVADA em 19 de maio de 2020.

Dra. Adélia Aziz Alexandre Pozza

UFLA

Dra. Danielle Pereira Baliza

IF SUDESTE MG

Dr. Anderson William Dominghetti

IFES

Prof. Dr. Rubens José Guimarães
Orientador

Prof. Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva
Coorientador

**LAVRAS - MG
2020**

*Aos meus pais, Marcos e Liliane, à minha irmã,
Maeve, e ao meu namorado, Estevam, pelo
amor incondicional, fundamental para concluir
essa importante etapa de minha vida.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida e por mais uma conquista.

À Universidade Federal de Lavras, que me proporcionou um ensino de qualidade para a minha formação.

Ao Departamento de Agricultura (DAG) e ao Departamento de Ciência do Solo da UFLA (DCS), pela estrutura e apoio à concretização deste trabalho.;

À CAPES, pela concessão da bolsa de doutorado (o presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001).

Ao orientador Prof. Dr. Rubens José Guimarães e ao coorientador Prof. Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva, pela oportunidade que me concederam, pelo apoio, pelos ensinamentos que não se encontram em livros e por toda a confiança que depositaram em mim.

Aos meus pais, Marcos e Liliane, e à minha irmã, Maeve, que permitiram tornar esse sonho realidade, sem medir esforços para me ajudar a alcançá-lo.

A todos os meus amigos e familiares, que me fortaleceram, apoiaram e tornaram essa caminhada mais leve, em especial à Paulinha, minha querida prima, pelo amor e amizade que ficaram ainda maiores nesses quase dois anos morando juntas.

Ao meu namorado Estevam, pela cessão da área experimental e todo o apoio na condução deste trabalho, por ser aquele que mais me ajuda e incentiva a seguir meus sonhos, e por todo o amor, carinho e compreensão.

À Poly, por todo o esforço e tempo dedicado a este trabalho, por deixar as análises laboratoriais mais divertidas e, por hoje, ser uma grande amiga que levarei para toda a vida.

À Anny, pela linda amizade e por sempre disponibilizar um tempinho quando mais precisávamos de ajuda.

Aos colegas dos programas de pós-graduação em Fitotecnia e em Ciência do Solo, pelo companheirismo durante essa jornada.

A todos que de alguma forma ajudaram na realização desse trabalho.

MUITO OBRIGADA!

*“O essencial não é o tamanho do bem que se queira, e sim, o tamanho do amor que você coloque no bem que se decida a fazer.”
(Chico Xavier)*

RESUMO

Tecnologias de fertilizantes têm sido desenvolvidas visando minimizar as perdas de nitrogênio e aumentar a eficiência do uso de N na cafeicultura. Diante disso, objetivou-se avaliar a adubação do cafeeiro utilizando fertilizantes nitrogenados convencionais e com diferentes tecnologias – estabilizado, de liberação controlada e ‘blends’ (mistura física) de ambos – aplicados em diferentes doses, e suas implicações diretas no estoque de N do solo e na produtividade após duas safras, por meio da avaliação de diversas características dos fertilizantes, do solo e do cafeeiro. O experimento foi realizado em uma fazenda em Carmo da Cachoeira-MG, Brasil, entre 09/11/2017 e 30/06/2019, com a cultivar Mundo Novo IAC-379/19 (*Coffea arabica* L.). Adotou-se delineamento em blocos casualizados, com três repetições e parcelas de 10 plantas, sendo as oito centrais úteis para avaliação. Este trabalho foi dividido em dois experimentos. Em ambos, analisou-se os fertilizantes Ureia convencional, Ureia + NBPT (fertilizante estabilizado), Ureia Emax 41% e Ureia Emax 43% (liberação controlada) e dois ‘blends’ de fertilizantes estabilizado e de liberação controlada: Blend 1 (40% Ureia NBPT + 60% Ureia Emax 41%) e Blend 2 (40% Ureia NBPT + 60% Ureia Emax 43%). No primeiro experimento, avaliou-se sete tratamentos, sendo os seis fertilizantes, aplicados em dose 300 kg de N ha⁻¹, e uma testemunha sem adubação. Já no segundo experimento, avaliou-se os seis fertilizantes em quatro doses: 0, 150, 300 e 450 kg de N ha⁻¹, constituindo fatorial 6x4, totalizando 24 tratamentos. A adubação nos tratamentos com Ureia convencional e Ureia + NBPT foi parcelada em três vezes, enquanto nos demais foram aplicados em dose única. As características avaliadas no primeiro experimento foram: curva de liberação de N pelos fertilizantes de liberação controlada e ‘blends’, em campo e em laboratório; volatilização de amônia; produtividade e índices de eficiência de uso de N. Já no segundo, avaliou-se os estoques de N_{TOTAL}, N_{MINERAL}, N-NO₃⁻ e N-NH₄⁺ do solo, produtividade e índices de eficiência. A Ureia convencional é o fertilizante que promove as maiores perdas de nitrogênio por volatilização. Não há relação entre as maiores perdas por volatilização com a produtividade. A produtividade do cafeeiro aumenta linearmente com o aumento da dose de N aplicada. Mas, a redução da dose de 450 para 300 kg de N ha⁻¹ não prejudica a produtividade, além de não diminuir o estoque de N do solo. A Ureia + NBPT proporciona menor produtividade em relação aos demais fertilizantes e apresenta menores índices de eficiência de uso do nitrogênio. Os teores e estoques de N_{TOTAL}, N_{MINERAL}, N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ aumentam com o aumento da dose de N aplicada, mas o fornecimento insuficiente de N causa redução dos mesmos. Os fertilizantes de liberação controlada, Ureia Emax 41% e Ureia Emax 43%, e seus ‘blends’ com ureia com inibidor da urease, possibilitam realizar a adubação nitrogenada do cafeeiro em única dose, disponibilizando o N de forma gradual para as plantas, sem afetar a produtividade e estoques de N do solo e reduzindo as perdas por volatilização quando comparados à Ureia convencional.

Palavras-chave: Adubação. Nitrogênio. Volatilização de amônia. Estoque de N. *Coffea arabica* L.

ABSTRACT

Fertilizer technologies have been developed to minimize nitrogen losses and increase the efficiency of N use in coffee crop. Therefore, this paper aims to evaluate the fertilization of coffee trees using nitrogen fertilizers, the conventional one and the ones with different technologies – stabilized, controlled-release and blends (physical mixture) of both – applied in different doses, and their direct implications on the soil N stock and on the coffee yield after two harvests, through the evaluation of several characteristics of the fertilizers, the soil and the coffee plants. The experiment was conducted on a farm in Carmo da Cachoeira, Minas Gerais, Brazil, between 11/09/2017 and 6/30/2019, with the Mundo Novo cultivar IAC-379/19 (*Coffea arabica* L.). A randomized block design was adopted, with three replicates, 10 plants per plot, eight of which were used for evaluation. This work was divided into two experiments. Conventional Urea, Urea + NBPT (stabilized fertilizer), Urea Emax 41% (controlled-release) and Urea Emax 43% (controlled-release) and two blends of stabilized and controlled-release fertilizers: Blend 1 (40% Urea NBPT + 60% Urea Emax 41%) and Blend 2 (40% Urea NBPT + 60% Urea Emax 43%) were analyzed in both experiments. In the first experiment, seven treatments were evaluated, the six fertilizers were applied in a dose of 300 kg N ha⁻¹, and a witness without fertilization. In the second experiment, the six fertilizers were evaluated in four application rates: 0, 150, 300 and 450 kg N ha⁻¹, in a 6x4 factorial, totaling 24 treatments. The fertilization in Conventional Urea and Urea + NBPT treatments was divided in three applications, while the others were applied in a single application. The characteristics evaluated in the first experiment were: N release curve from controlled-release fertilizers and blends, in the field and in the laboratory; ammonia volatilization; crop yield and N use efficiency indexes. In the second experiment, the N_{TOTAL} and N_{MINERAL} stocks, N-NO₃⁻ and N-NH₄⁺ of the soil, crop yield and N efficiency indexes were evaluated. Conventional Urea is the fertilizer that promotes the highest nitrogen losses by volatilization. There is no relation between the greatest losses by volatilization and crop yield. Coffee yield increases linearly with the increase of the applied N dose. But, the dose reduction from 450 to 300 kg of N ha⁻¹ does not affect the coffee yield, besides not reducing the soil N stock. Urea + NBPT provides the lowest crop yield compared to other fertilizers and has the lowest rates of nitrogen use efficiency. The levels and stocks of N_{TOTAL}, N_{MINERAL}, N-NH₄⁺ and N-NO₃⁻ increase with the increase of the applied N dose, but the insufficient N supply causes their reduction. Controlled-release fertilizers - Urea Emax 41% and Urea Emax 43% - and their "blends" with urease inhibitor-treated urea make it possible to carry out nitrogen fertilization of the coffee trees in a single application, making N gradually available to the plants, without affecting crop yield and soil N stocks and reducing losses by volatilization when compared to Conventional Urea.

Keywords: Fertilization. Nitrogen. Ammonia volatilization. Soil N stock. *Coffea arabica* L.

LISTA DE FIGURAS

PRIMEIRA PARTE

Figura 1 – Ciclo do nitrogênio. 19

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS*

ARTIGO 1

Figura 1 - Esquema do coletor de amônia. 55

Figura 2 - Porcentagem acumulada de nitrogênio liberado pelos fertilizantes aplicados no cafeeiro no primeiro ano do experimento (2017/2018) entre cada coleta (a) e após cada coleta (b). 59

Figura 3 - Porcentagem acumulada de nitrogênio liberado pelos fertilizantes aplicados no cafeeiro no segundo ano do experimento (2018/2019) entre cada coleta (a) e após cada coleta (b). 60

Figura 4 - Porcentagem acumulada de nitrogênio liberado pelos fertilizantes no experimento realizado em laboratório, onde estavam imersos em água destilada a 25°C, entre cada coleta (a) e após cada coleta (b). 61

Figura 5 - Perdas acumuladas (a) e diárias (b) de amônia por volatilização dos fertilizantes aplicados no cafeeiro no primeiro ano do experimento (2017/2018), juntamente com os dados de precipitação, umidade do solo e temperatura do solo (c). 65

Figura 6 - Perdas acumuladas (a) e diárias (b) de amônia por volatilização dos fertilizantes aplicados no cafeeiro no segundo ano do experimento (2018/2019), juntamente com os dados de precipitação, umidade do solo e temperatura do solo (c). 66

ARTIGO 2

Figura 1 – Teor de nitrogênio total (g dm^{-3}) e estoque de nitrogênio total (Mg ha^{-1}) das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, em junho de 2019, obtido após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro. 92

Figura 2 – Teor de nitrogênio total (g dm^{-3}) e estoque de nitrogênio total (Mg ha^{-1}) das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, antes e após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro. 94

Figura 3 –	Estoque de amônio (mg dm^{-3}) do solo, em junho de 2019, obtido após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.	97
Figura 4 –	Teores de nitrogênio mineral, amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) (mg dm^{-3}) das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, em junho de 2019, obtido após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.	100
Figura 5 –	Teor e estoque de nitrogênio mineral das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, antes da aplicação dos tratamentos e após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.	102
Figura 6 –	Teor e estoque de amônio das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, antes da aplicação dos tratamentos e após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.	103
Figura 7 –	Teor e estoque de nitrato das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, antes da aplicação dos tratamentos e após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.	104
Figura 8 –	Produtividade do cafeeiro ($\text{sacas } 60 \text{ kg ha}^{-1}$) obtida após aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses, no primeiro ano do experimento (2017/2018), no segundo ano (2018/2019) e a média dos dois anos 2018 e 2019.	109

LISTA DE TABELAS

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS*

ARTIGO 1

- Tabela 1 – Caracterização química e física do solo da área experimental antes da aplicação dos tratamentos no ano de 2017..... 51
- Tabela 2 – Equações de regressão, R^2 da porcentagem acumulada de nitrogênio liberado pelos fertilizantes e número de dias necessários para atingir liberação acumulada de 75% aplicados no cafeeiro no segundo ano do experimento (2017/2018)..... 59
- Tabela 3 – Equações de regressão, R^2 da porcentagem acumulada de nitrogênio liberado pelos fertilizantes e número de dias necessários para atingir liberação acumulada de 75% aplicados no cafeeiro no segundo ano do experimento (2018/2019)..... 60
- Tabela 4 – Equações de regressão, R^2 da porcentagem acumulada de nitrogênio liberado pelos fertilizantes e número de dias necessários para atingir liberação acumulada de 75% no experimento realizado em laboratório. 61
- Tabela 5 – Médias das perdas acumuladas de nitrogênio por volatilização de amônia (kg ha^{-1}) dos fertilizantes aplicados no cafeeiro, no primeiro ano (2017/2018), no segundo ano (2018/2019) e a média referentes aos dois anos do experimento..... 64
- Tabela 6 – Produtividade do cafeeiro (sacas 60 kg ha^{-1}) obtida após aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados no primeiro ano do experimento, no segundo ano e a média dos dois anos..... 70
- Tabela 7 – Índices de eficiência de uso do N (EUN) e de eficiência de uso do N não volatilizado (EUN_{NV}) obtidos após aplicação dos fertilizantes nitrogenados no cafeeiro..... 73

ARTIGO 2

- Tabela 1 – Caracterização química e física do solo da área experimental antes da aplicação dos tratamentos no ano de 2017..... 85
- Tabela 2 – Teor de nitrogênio total (g dm^{-3}) e estoque de nitrogênio total do solo (Mg ha^{-1}), até 60 cm de profundidade, após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. ⁽¹⁾ 91

Tabela 3 –	Teor de nitrogênio total (g dm^{-3}) e estoque de nitrogênio total (Mg ha^{-1}) das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, após adubação nitrogenada no cafeeiro. ⁽¹⁾	92
Tabela 4 –	Teores de nitrogênio mineral, amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) do solo (mg.dm^{-3}), até 60 cm de profundidade, após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. ⁽¹⁾	96
Tabela 5 –	Teor de amônio (mg.dm^{-3}) do solo após aplicação dos fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro. ⁽¹⁾	97
Tabela 6 –	Equações de regressão e R^2 do teor de amônio (mg.dm^{-3}) do solo após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.	98
Tabela 7 –	Teores de nitrogênio mineral, amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) (mg dm^{-3}) das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, após aplicação dos fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro. ⁽¹⁾	99
Tabela 8 –	Equações de regressão e R^2 dos teores nitrogênio mineral, amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) (mg dm^{-3}) das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.	101
Tabela 9 –	Produtividade do cafeeiro (sacas 60 kg ha^{-1}) obtida após aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados no primeiro ano do experimento (2017/2018), no segundo ano (2018/2019) e a média dos dois anos 2018 e 2019.....	108
Tabela 10 –	Produtividade média do cafeeiro (sacas 60 kg ha^{-1}) dos anos 2018 e 2019 obtida após aplicação dos fertilizantes nitrogenados com diferentes doses.	111
Tabela 11 –	Índice de eficiência agrônômica relativa à ureia (IEAR - %) obtido após aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.....	115
Tabela 12 –	Índice de eficiência agrônômica do nitrogênio aplicado (EA), obtido pela relação entre a quantidade de café produzida a mais que a dose 0 e a dose de N aplicada.	116
Tabela 13 –	Índice de eficiência do uso do nitrogênio (EUN), obtido pela relação entre a quantidade de café produzida e a dose de N aplicada dos fertilizantes nitrogenados.....	116

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	
1	INTRODUÇÃO..... 16
2	REFERENCIAL TEÓRICO 19
2.1	Dinâmica do nitrogênio no solo 19
2.2	Adubação nitrogenada do cafeeiro..... 23
2.3	Fontes de nitrogênio na adubação..... 25
2.3.1	Fertilizantes nitrogenados convencionais 25
2.3.2	Fertilizantes nitrogenados estabilizados 27
2.3.3	Fertilizantes nitrogenados de liberação lenta..... 30
2.3.4	Fertilizantes nitrogenados de liberação controlada..... 31
2.3.5	‘Blends’ de fertilizantes nitrogenados..... 33
2.4	Eficiência de uso de fertilizantes nitrogenados 34
	REFERÊNCIAS..... 37
	SEGUNDA PARTE – ARTIGOS* 46
	ARTIGO 1 – Curvas de liberação e volatilização de amônia de fertilizantes nitrogenados de liberação controlada e seus “blends” com ureia tratada com inibidor de urease aplicados no cafeeiro 47
1	INTRODUÇÃO..... 49
2	MATERIAL E MÉTODOS 50
2.1	Caracterização da área experimental 50
2.2	Condução do experimento 52
2.3	Tratamentos 52
2.4	Características avaliadas..... 53
2.4.1	Curva de liberação de N pelos fertilizantes 53
2.3.2	Volatilização de amônia 55
2.4.3	Produtividade 56
2.4.4	Índices de eficiência da adubação nitrogenada..... 57
2.5	Análises estatísticas dos dados 58
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 58
3.1	Curva de liberação de N pelos fertilizantes 58
3.2	Volatilização de amônia 64
3.3	Produtividade..... 70

3.4	Índices de eficiência da adubação nitrogenada.....	72
4	CONCLUSÃO.....	75
	REFERÊNCIAS.....	76
	ARTIGO 2 - Eficiência agrônômica de fertilizantes nitrogenados de liberação controlada e seus “blends” com ureia tratada com inibidor de urease aplicados em diferentes doses no cafeeiro	
		81
1	INTRODUÇÃO.....	83
2	MATERIAL E MÉTODOS	84
2.1	Caracterização da área experimental	84
2.2	Condução do experimento	86
2.3	Tratamentos	86
2.4	Características avaliadas.....	87
2.4.1	Teor e estoque de N_{TOTAL} do solo	87
2.4.2	Teor e estoque de $N_{MINERAL}$ do solo.....	88
2.4.3	Produtividade do cafeeiro	89
2.4.4	Índices de eficiência da adubação nitrogenada.....	90
2.5	Análises estatísticas dos dados.....	90
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	91
3.1	Teor e estoque de N_{TOTAL} do solo	91
3.2	Teor e estoque de $N_{MINERAL}$ do solo.....	95
3.3	Produtividade.....	107
3.4	Índices de eficiência da adubação nitrogenada.....	115
4	CONCLUSÃO.....	120
	REFERÊNCIAS.....	121

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios para a agricultura nos próximos anos é atender a demanda da produção de alimentos. Estima-se que no ano de 2050 a população mundial atinja o número de aproximadamente 10 bilhões de pessoas, assim, a produção atual deverá aumentar de 40 a 54% para suprir essa necessidade (FAO, 2018b).

O consumo mundial de café aumentou 23,7% nos últimos 10 anos, chegando a 166,4 milhões de sacas de 60 kg de café beneficiado na safra 2019/2020 (MAPA, 2020). Do mesmo modo, a produção total de café aumentou quase 20% nesse mesmo período, chegando a 169,3 milhões de sacas de 60 kg em 2019/2020, sendo 95,8 milhões de café Arábica (*Coffea arabica* L.) e 73,6 milhões de café Robusta (*Coffea canephora* Pierre) (MAPA, 2020). Segundo estimativa da FAO (2018a), a produção total de café poderá alcançar 273,6 milhões de sacas em 2050.

Aliado a esse incremento de produção, está o de produtividade, que cresceu 43,9% de 2009 a 2019, saindo de 18,9 para 27,2 sacas ha⁻¹ (MAPA, 2016; CONAB, 2020a), esperando-se atingir o patamar de 38,3 sacas.ha⁻¹ em 2050, de acordo com perspectiva da FAO (2018a). Diante deste fato, prediz-se como maior dificuldade a obtenção dessa produtividade de forma sustentável, pois até agora o aumento da produção de alimentos tem agravado a competição pelos recursos naturais, aumentado o desmatamento e a degradação da terra (FAO, 2017).

Sendo assim, ressalta-se a importância de tornar mais eficiente os sistemas alimentares, almejando maior produção por área, aliando o melhor manejo do solo e da adubação, o uso de genótipos melhorados e o controle mais eficiente de pragas e de doenças. Dessa maneira, o uso eficiente de fertilizantes se torna imprescindível, tendo em vista que seu consumo e utilização têm aumentado cada vez mais (CONAB, 2017).

Dentre os insumos mais usados na agricultura, especialmente na cafeicultura, estão os fertilizantes nitrogenados. O nitrogênio (N) é o nutriente de maior demanda pelo cafeeiro e sua recomendação chega a 450 kg ha⁻¹ para lavouras em produção (GUERREIRO FILHO et al., 2014; GUIMARÃES et al., 1999). Porém, os fertilizantes nitrogenados costumam ter baixa eficiência de aproveitamento pelas plantas (KE et al., 2017).

Essa desvantagem está relacionada ao uso frequente da ureia, fertilizante nitrogenado mais utilizado na agricultura a alta concentração e baixo custo por unidade de N, porém, sujeita a perdas de 30% a 70% da quantidade de N aplicada (FAVARIN; TEZOTTO; NETO, 2013).

Essas perdas tornam o aproveitamento e a recuperação do N baixos e podem ser por volatilização (NH_3), desnitrificação (N_2 e N_2O) e lixiviação (NO_3^-).

As perdas por volatilização de N-NH_3 são as mais expressivas para as condições das lavouras cafeeiras no Brasil, pois as perdas por desnitrificação e por lixiviação nos solos brasileiros são baixas (CANTARELLA, 2007). Em cafeeiros, alguns trabalhos relatam perdas de N por volatilização de até 44,7% de N-NH_3 (BARTELEGA, 2018; CHAGAS et al., 2016; DOMINGHETTI et al., 2016; FENILLI et al., 2007; FREITAS, 2017; SOUZA et al., 2018).

Visando minimizar as perdas de N e aumentar a eficiência do uso desse nutriente na agricultura, novas tecnologias em fertilizantes foram desenvolvidas para otimizar seu uso, são eles: estabilizados, de liberação lenta e de liberação controlada, os quais podem ser chamados de 'Fertilizantes de Eficiência Aumentada' (HALL, 2005).

Denomina-se fertilizantes nitrogenados estabilizados quando se adiciona algum aditivo (estabilizador) capaz de inibir a transformação do N em alguma forma não desejável (TRENKEL, 2010). Os fertilizantes de liberação lenta são quimicamente modificados, de modo a estender sua disponibilidade à planta por mais tempo em relação aos fertilizantes convencionais, mas sem controle do tempo de disponibilização do N (TRENKEL, 2010).

Já os de liberação controlada possuem a tecnologia mais avançada dentre os fertilizantes de eficiência aumentada (TRENKEL, 2010; TIMILSENA et al., 2014). Esses são fertilizantes solúveis convencionais rapidamente disponibilizados para o solo, como a ureia, revestida ou encapsulada por materiais orgânicos ou inorgânicos capazes de controlar a liberação do N no tempo, podendo ter a liberação do N ajustada à necessidade da cultura (TRENKEL, 2010).

Esses fertilizantes, no entanto, apresentam alto custo por unidade de N, principalmente os de liberação lenta e os de liberação controlada, inviabilizando a utilização dessas tecnologias em grande escala pelos agricultores (TRENKEL, 2010). Diante desse desafio, uma alternativa para reduzir esse custo é a utilização de 'blends', que consiste na aplicação combinada de fertilizantes de alta solubilidade em água (convencional ou estabilizado) com fertilizantes de liberação mais prolongada (lenta ou controlada) (GUELFY, 2017). Os 'blends' possuem também, a vantagem de poderem ser formulados para liberar o N de forma ajustada à necessidade de cada cultivo (TRENKEL, 2010).

Em função da tecnologia de produção, os preços dos fertilizantes aumentam na seguinte ordem: convencionais < estabilizados < 'blends' < liberação lenta < liberação controlada (GUELFY, 2017). No entanto, os benefícios que podem trazer para a cultura, como aumentar a produtividade devido ao maior aproveitamento de N por minimizar as perdas, e até fornecer o

N de acordo com a necessidade das plantas, podem proporcionar melhor relação custo/benefício. Portanto, deve-se escolher com cuidado os insumos adequados para promover o uso mais eficiente dos fertilizantes, imprescindíveis para garantir em longo prazo a produtividade e a lucratividade da cafeicultura (PINTO et al., 2017).

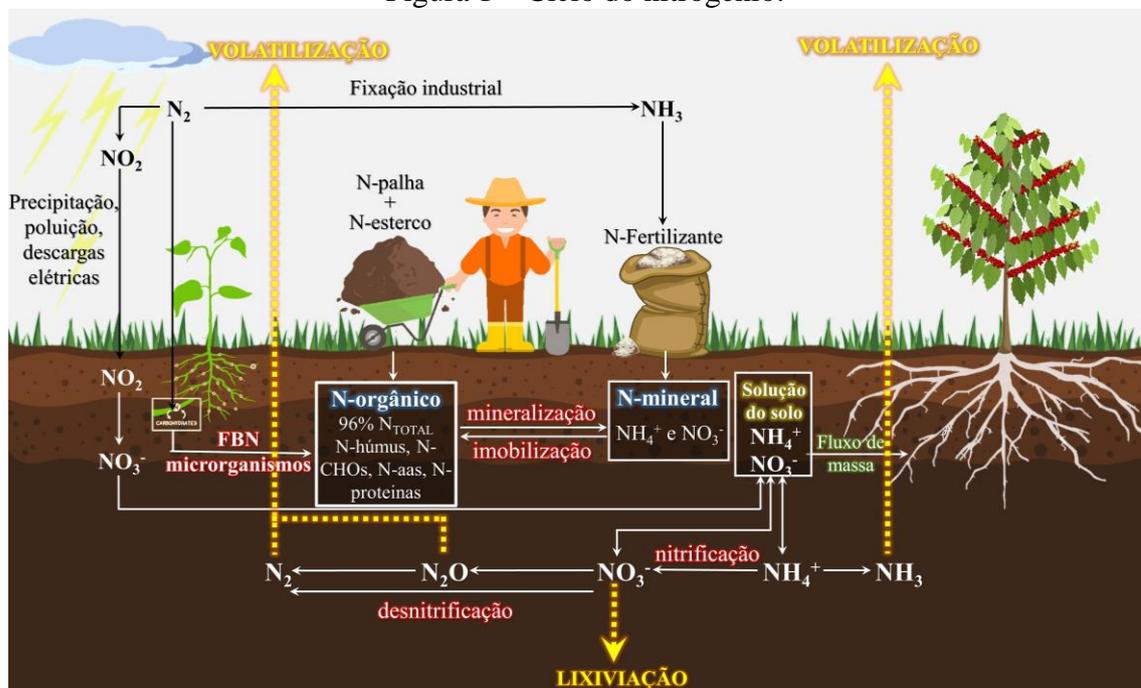
Diante disso, objetivou-se com este trabalho, avaliar a adubação do cafeeiro utilizando-se fertilizantes nitrogenados convencional e com diferentes tecnologias – estabilizado, de liberação controlada e ‘blends’ de ambos – aplicados em diferentes doses, e suas implicações diretas no estoque de N do solo e na produtividade após duas safras, por meio da avaliação de diversas características dos fertilizantes, do solo e do cafeeiro.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Dinâmica do nitrogênio no solo

O ciclo do nitrogênio (N) no sistema solo-planta é complexo. Dentre todos os nutrientes, é o que mais sofre interações com o ambiente, devido às diversas reações no solo, sendo grande parte mediada por microrganismos, cuja atividade é afetada por temperatura, pH, umidade e outros fatores (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010). A Figura 1 ilustra o ciclo do nitrogênio no ambiente, indicando como esse nutriente pode entrar e sair do sistema.

Figura 1 – Ciclo do nitrogênio.



Fonte: Da autora (2020).

O nitrogênio está presente no solo em diversas formas químicas, sendo predominante o N orgânico, presente na matéria-orgânica (M.O.), que representa mais de 95% do N total do solo. Entretanto, o N-orgânico não é diretamente aproveitado pelas plantas, pois, a maioria destas absorve N nas formas de nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) (FURLANI, 2004). Para disponibilizar o N-orgânico, ele deve ser mineralizado para produzir $N-NH_4^+$, que em condições aeróbias específicas é nitrificado por um grupo de bactérias, formando $N-NO_2^-$ (nitrito) e, posteriormente, $N-NO_3^-$, sendo esta reação afetada pela atividade microbiana, pH, temperatura, umidade, dentre outros fatores (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

O N pode entrar nesse sistema solo-planta por meio de deposições atmosféricas (precipitação, poluição, descargas elétricas), fixação biológica por microrganismos, adubações orgânicas ou químicas. Em contrapartida, pode sair por meio da extração pelas culturas e pelos diversos tipos de perdas, como volatilização (NH_3), desnitrificação (N_2 e N_2O) e lixiviação (NO_3^-) (CANTARELLA, 2007).

Os fertilizantes nitrogenados mais comuns presentes no mercado possuem N solúvel nas formas amídica (ureia), amoniacal ou nítrica. A ureia ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), quando aplicada ao solo, passa por hidrólise enzimática liberando N-NH_4^+ . Em solos tropicais, as altas temperaturas e o solo mais arejado favorecem a rápida oxidação do N-NH_4^+ para N-NO_3^- , tornando o N-NO_3^- a forma mais disponível no solo e, conseqüentemente, a mais absorvida pelas plantas, independentemente da fonte aplicada (CANTARELLA, 2007).

O N-NO_3^- disponibilizado pela M.O. e os fertilizantes de fontes nítricas, como o nitrato de amônio, estão sujeitos a perdas por lixiviação e por desnitrificação. Já o N-NH_4^+ oriundo da M.O. e as fontes amídicas (ureia) e amoniacais (como o sulfato de amônio e nitrato de amônio) estão sujeitos a perda por volatilização de amônia.

A adsorção de N-NO_3^- no solo é apenas eletrostática, dependendo exclusivamente do balanço de cargas do solo (POZZA et al., 2009). Como sua carga é negativa, ele é pouco retido em solos com predominância de cargas negativas, pelo menos nas camadas superficiais do solo, estando sujeito à lixiviação para camadas mais profundas. A lixiviação representa em média 10 a 30% das perdas do nitrogênio adicionado ao solo (MEISINGER; CALDERÓN; JENKINSON, 2008).

No entanto, muitos solos tropicais têm horizontes subsuperficiais com cargas positivas, diminuindo as perdas por lixiviação. Em solos de regiões tropicais úmidas, com menores teores de M.O. e estágio de intemperismo-lixiviação mais avançado, comparados aos solos de regiões temperadas, a presença de cargas positivas tende a ser maior, devido aos altos teores de óxidos de ferro e gibbsita, portanto, a lixiviação de nitrato é dificultada, embora não totalmente impedida (ARAÚJO et al., 2004; DYNIA, 2000; POZZA et al., 2009; REIS; BARROS, 1990).

A análise de diversos experimentos com avaliação da lixiviação de N-NO_3^- no Brasil foi feita por Cantarella (2007). O autor encontrou baixo risco de acontecerem perdas por este processo e conseqüente contaminação do lençol freático, provavelmente pelas doses de N usadas no Brasil serem relativamente baixas e o manejo tradicional da adubação nitrogenada envolver parcelamento dos fertilizantes.

O processo de desnitrificação ocorre em solos em condições de anaerobiose (inundados ou com acúmulo de água), ou seja, na ausência de O₂. Nessa circunstância, o N-NO₃⁻ funciona como receptor de elétrons na respiração de microrganismos do solo, sendo convertido pelo processo de desnitrificação a N₂, principalmente, ou N₂O, que são voláteis e se perdem na atmosfera (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010). As perdas por esse processo quantificam 5 a 25% do N adicionado ao solo (MEISINGER; CALDERÓN; JENKINSON, 2008).

As perdas de N-NH₃ por volatilização na agricultura são influenciadas por diversos fatores, sendo os principais: pH do solo, volume de chuvas após adubação, umidade do solo no momento da adubação, temperatura ambiente, atividade da urease (enzima responsável pela hidrólise da molécula de ureia), matéria orgânica do solo, cobertura do solo e capacidade de troca catiônica (CTC) (CORSI, 1994; DENMEAD; FRENEY; DUNIN, 2008; NÓMMIK, 1973; SANGOI et al., 2003; TASCA et al., 2011; TISDALE; NELSON; BEATON, 1985). Em cafeeiro, alguns trabalhos relatam perdas de até 44,7% de N-NH₃ por volatilização (BARTELEGA, 2018; CHAGAS et al., 2016; DOMINGHETTI et al., 2016; FENILLI et al., 2007; FREITAS, 2017; SOUZA et al., 2018).

O pH afeta o equilíbrio entre o íon amônio (NH₄⁺) e a forma gasosa amônia (NH₃) na solução do solo, conforme a reação a seguir (CANTARELLA, 2007):



Desse modo, condições com pH mais elevado aumentam a concentração relativa de amônia e seu potencial de volatilização (TRIVELIN; CABEZAS; BOARETTO, 1994). Sendo assim, adubos contendo nitrogênio amoniacal não devem ser aplicados em superfície de solos com pH em torno ou acima de 7, uma vez que ele se transformará em N-NH₃ na presença de hidroxilas, estando sujeita a perdas por volatilização.

A ureia é o fertilizante que mais sofre perdas por volatilização, pois após a sua aplicação no solo, sofre hidrólise e eleva o pH ao redor do grânulo, criando condição favorável à volatilização de N-NH₃, como será explicado a seguir.

Após a aplicação da ureia ao solo, ocorrem as seguintes reações:





Na reação 1, a ureia [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] é hidrolisada pela enzima urease, formando carbamato de amônio [$\text{NH}_2\text{COONH}_4$]. Em seguida, em meio aquoso, ocorre a reação 2, na qual o carbamato de amônio se transforma em carbonato de amônio [$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$], instável em meio ácido. Portanto, na presença de prótons (H^+) livres, ele se decompõe rapidamente, produzindo amônio (NH_4^+), dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O) (reação 3), elevando o pH ao redor dos grânulos do fertilizante (ERNANI; BAYER; STECKLING, 2001; LADHA et al., 2005; MIKKELSEN, 2009; ROCHETTE et al., 2009; TASCA et al., 2011, TRENKEL, 2010).

Na reação 4, uma molécula de amônio reage com uma hidroxila (OH^-), formando amônia (NH_3), que é volátil, sendo facilmente perdida para a atmosfera. Em pH de 9,3, metade das moléculas se transformam em N- NH_3 , estando sujeitas a perdas por volatilização (STEVENSON, 2008).

Já na reação 5, o CO_2 formado como produto da reação 3 estará dissolvido em solução, elevando a pressão parcial desse gás, fazendo com que parte do CO_2 se transforme ácido carbônico (H_2CO_3). Esse ácido carbônico é dissociado, liberando um próton (reação 6), reduzindo o pH até os processos se equilibrarem.

Com relação às condições climáticas, a temperatura e a precipitação (quantidade e momento em que ocorrem após a aplicação do fertilizante) são os principais fatores que influenciam as perdas de N- NH_3 (LIGTHNER; MENGEL; RHYKERD, 1990). Temperaturas mais elevadas aceleram o processo de hidrólise da ureia, necessitando valores menores de pH para formação de N- NH_3 durante as reações (CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT, 2010; TISDALE; NELSON; BEATON, 1985).

Já as chuvas, quando ocorrem em quantidades satisfatórias, promovem o movimento do adubo para camadas mais profundas do solo, diminuindo a volatilização de N- NH_3 . Porém, se não chover o suficiente, pode ocorrer hidrólise e dissolução do adubo sem ele descer no perfil do solo, por não haver água suficiente para isso, aumentando as perdas de N- NH_3 (FRENEY et al., 1991).

Além disso, se o solo estiver úmido no momento da aplicação e não ocorrerem precipitações subsequentes, as perdas por volatilização podem ser potencializadas. Sendo assim, precipitações ocorridas somente antes da adubação nitrogenada podem intensificar as

perdas de N-NH₃, pois a superfície do solo fica úmida no momento da aplicação e não há posterior incorporação do adubo (COSTA; VITTI; CANTARELLA, 2003). A ureia aplicada em solo úmido, solo saturado ou sobre lâmina de água sofre perdas maiores do que a ureia aplicada em solo seco (DUARTE et al., 2007).

2.2 Adubação nitrogenada do cafeeiro

O cafeeiro é uma das culturas mais exigentes em nitrogênio (MALAVOLTA, 1993; RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVARES, 1999). A recomendação deste nutriente para plantas de café em produção é feita de acordo com a produtividade esperada da lavoura, podendo variar de 50 a 450 kg ha⁻¹ (GUERREIRO FILHO et al., 2014; GUIMARÃES et al., 1999). De acordo com Guimarães et al. (1999), as recomendações de N para as culturas, incluindo o café, já são feitas considerando perdas em torno de 50% de N, ocasionadas pela ureia, por ser o fertilizante mais utilizado na agricultura.

O ciclo fenológico dos cafeeiros da espécie *Coffea arabica* L. apresenta sucessão de fases vegetativas e reprodutivas, aproximadamente em dois anos (bienal) (CAMARGO; CAMARGO, 2001). Porém, dois ciclos fenológicos se combinam num mesmo ano, ou seja, o processo de produção do ano ocorre simultaneamente à fase de vegetação que proporcionará a produção do ano seguinte.

Desse modo, a fertilização do cafeeiro precisa considerar esses dois drenos nutricionais: o primeiro, que consiste na frutificação; e o segundo, representado pelo novo ciclo de crescimento vegetativo, onde se dará a carga de frutos da próxima safra (FAVARIN; TEZOTTO; NETO, 2013). O consumo médio de N por cada saca de 60 kg de café produzida pode variar em função de fatores edafoclimáticos de cultivo, mas é estimado em 6,2 kg de N, dos quais 3,6 kg atendem à necessidade para a vegetação e 2,6 kg para a produção dos grãos (MATIELLO et al., 2010).

As adubações do cafeeiro devem ser feitas no período chuvoso, nos meses de setembro a março, correspondentes às fases de floração, frutificação e desenvolvimento vegetativo (RENA; MAESTRI, 1987). A aplicação dos fertilizantes nitrogenados de alta solubilidade deve ser realizada no momento de necessidade da planta.

No caso específico do cafeeiro, a demanda de N durante seu ciclo é contínua, alterando apenas em quantidade para cada estágio (FULLIN et al., 2007), sendo imobilizado em ritmo diferente na floração e nas fases do chumbinho, de granação e de maturação (MALAVOLTA,

1986). Segundo Quintela et al. (2011), há diferença entre as faixas críticas do N das fases de granação e de maturação, que correspondem a 25,72-27,19 g kg⁻¹ e 29,24-29,60 g kg⁻¹, respectivamente. Como a capacidade de absorção e de assimilação do N pelo cafeeiro varia muito, é válido ressaltar que a demanda aumenta na fase de expansão, no entanto, a maior necessidade ocorre no estágio de granação dos frutos (PEZZOPANE et al., 2003).

O N é constituinte de muitos componentes da célula vegetal, como aminoácidos e ácidos nucleicos. Então, quando a demanda de N é maior do que a quantidade disponível para a planta, ou seja, quando há deficiência de N, o crescimento vegetativo cessa e ocorre clorose nas folhas mais velhas, podendo estas, posteriormente, entrarem em senescência (TAIZ; ZAIGER, 2004).

O fornecimento adequado de N para o cafeeiro deve ser capaz de suprir as demandas dos frutos e dos órgãos vegetativos, antecedendo os picos de acúmulo de nutrientes pelos frutos (LAVIOLA et al., 2008). Desse modo, a adubação nitrogenada deve ser dividida em alguns parcelamentos, visando fornecer o nutriente de maneira adequada durante todo o período vegetativo e de frutificação, tomando cuidado para não ter excesso, nem falta de N nessas fases.

A aplicação correta de N proporciona aumento do número de pares de folhas, de ramos por planta, de nós por ramos e de flores por nós, características diretamente relacionadas com a produtividade (NAZARENO et al., 2003). Ademais, estimula a formação e o desenvolvimento de gemas floríferas e frutíferas, além de ser componente estrutural de aminoácidos, proteínas, enzimas, pigmentos, vitaminas, dentre outros (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Também pode proporcionar maior produção de amido e outros carboidratos indispensáveis para formação e crescimento dos frutos (GUIMARÃES; MENDES, 1997).

Após a aplicação do fertilizante nitrogenado no solo, parte do N é recuperado pelo sistema radicular e parte aérea, uma porção permanece no solo, enquanto outra fração pode ficar imobilizada no 'litter' (serrapilheira) ou pode se perder do sistema solo-planta (FENILLI et al, 2007). De acordo com a International Atomic Energy Agency (IAEA, 1976), baseada em diversos trabalhos realizados sob os mais variados sistemas agrícolas, dificilmente uma cultura aproveita mais de 60% do nitrogênio aplicado como fertilizante. O restante pode permanecer no solo, disponível para as próximas culturas, ou pode perder-se por diversos mecanismos, tais como a volatilização, desnitrificação e lixiviação (REICHARDT et al., 2009).

Alguns estudos sobre a taxa de recuperação de N do fertilizante no cafeeiro, com utilização do isótopo ¹⁵N como traçador, mostraram que essa recuperação varia de 28,6 a 78,6% do total aplicado (BORTOLOTTI, 2010; FENILLI et al., 2008; PEDROSA, 2013).

Segundo Quintela et al. (2011), em experimento com cafeeiro irrigado, a produtividade máxima e a produtividade máxima econômica, quando aplicados até 500 kg ha⁻¹ de N, foram iguais a 60 e 54 sacas ha⁻¹, correspondendo ao fornecimento de 337,8 e 196,4 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Além disso, os autores verificaram que a aplicação da dose de 328,6 kg ha⁻¹ de nitrogênio proporciona a maior remoção desse nutriente para produção de frutos, os quais exportaram 204,3 kg ha⁻¹ de N.

2.3 Fontes de nitrogênio na adubação

Existem diversas opções de fertilizantes como fontes de N disponíveis no mercado. Dentre os fertilizantes químicos, pode-se classificá-los em alguns grupos principais: fertilizantes convencionais, estabilizados, de liberação lenta, de liberação controlada e ‘blends’ de fertilizantes.

As classes de fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta e de liberação controlada são também chamadas de ‘Fertilizantes de Eficiência Aumentada’ (HALL, 2005), pois visam aumentar a eficiência do uso de N na agricultura, com relação aos fertilizantes convencionais, incrementando novas tecnologias nos fertilizantes para tal fim. No entanto, alguns fertilizantes de ‘eficiência aumentada’ apresentam perdas superiores e menores índices de eficiência em relação aos fertilizantes convencionais (BARTELEGA, 2018; DOMINGHETTI et al., 2016; FREITAS, 2017), não fazendo jus a essa nomenclatura.

A escolha adequada do fertilizante deve levar em consideração alguns pontos principais, como o custo da unidade de N, a disponibilidade e a eficiência do mesmo, além da necessidade, ou não, da liberação desse fertilizante de maneira mais ajustada à demanda da planta, de acordo com a realidade de cada produtor.

2.3.1 Fertilizantes nitrogenados convencionais

No Brasil, os fertilizantes nitrogenados convencionais mais utilizados são: ureia (45% de N), sulfato de amônio (20% de N) e nitrato de amônio (32% de N), com consumo aparente de 5,44, 2,10 e 1,67 milhões de toneladas, respectivamente (IEA, 2020).

Dentre os fertilizantes nitrogenados simples, o consumo de N na forma de ureia, em 2017, representou 65,5% do consumo mundial e 68,4% do consumo no Brasil (IEA, 2020). Esse fertilizante possui elevada concentração e baixo custo por unidade de N

(DOMINGHETTI, 2016; FREITAS, 2017), implicando na redução de custos, principalmente com o frete. Todavia, a aplicação de ureia na superfície do solo resulta em perdas de nitrogênio por volatilização, que podem ser bastante elevadas, tornando baixa sua eficiência (CABEZAS; SOUZA, 2008; ROCHETTE et al., 2013a; TASCA et al., 2011). Com base em diversos artigos científicos de trabalhos realizados em vários lugares do mundo, Rochette et al. (2013b) encontraram perdas de N na forma de NH_3 entre 8% e 68% do total aplicado, diferindo de acordo com as condições de manejo e experimentação.

A aplicação de ureia sobre o solo causa elevação do pH na região do grânulo do fertilizante no momento da hidrólise, favorecendo a ocorrência de elevadas perdas de N- NH_3 por volatilização (ROCHETTE et al., 2009; SOMMER; SCHJOERRING; DENMEAD, 2004). Como a conversão de amônia (NH_3) em amônio (NH_4^+) ocorre em função da concentração de prótons (íons H^+), esse ambiente criado pela hidrólise da ureia, de pH alcalino com baixa concentração de H^+ , dificulta essa reação, fazendo com que N- NH_3 se concentre nessa região, aumentando as chances de ocorrerem perdas para a atmosfera (TRIVELIN; CABEZAS; BOARETTO, 1994).

Em cafeeiros, alguns trabalhos utilizando ureia relatam perdas de N- NH_3 por volatilização de até 44,7% (BARTELEGA, 2018; CHAGAS et al., 2016; DOMINGHETTI et al., 2016; FENILLI et al., 2007; FREITAS, 2017; SOUZA et al., 2018). No entanto, parte desse N volatilizado pode ser recuperado pela planta. Segundo Fenilli et al. (2007), dos 70 kg ha^{-1} de ureia aplicados no cafeeiro, 58 kg ha^{-1} foram volatilizados, representando uma perda de 83% do total aplicado, porém 43% (25 kg ha^{-1}) do N perdido foram reabsorvidos pela planta por difusão da NH_3 na atmosfera para o tecido vegetal.

As perdas por volatilização de N- NH_3 variam no cafeeiro, mesmo utilizando a mesma dose de N, como foi observado por Chagas et al. (2016) e Dominghetti et al. (2016). Ambos aplicaram 450 kg ha^{-1} de N no cafeeiro, parcelados em três aplicações de 150 kg ha^{-1} , mas Chagas et al. (2016) relataram perdas de 83 kg ha^{-1} de N pela ureia, ou seja, 18,3% do total aplicado, enquanto Dominghetti et al. (2016) encontraram perdas de 140,4 kg ha^{-1} de N pela ureia, 31,2% do total aplicado após todas as adubações. É válido ressaltar que, em um dos parcelamentos da adubação, por Dominghetti et al. (2016), as perdas atingiram 43,2% do aplicado.

Ainda sobre adubação do cafeeiro com ureia, Fenilli et al. (2007) encontraram perdas por volatilização de 58,8 kg ha^{-1} de N, que representou 21% dos 280 kg ha^{-1} de N aplicados em quatro adubações de 70 kg de N cada. Outros experimentos no cafeeiro, realizados por Freitas

(2017) e Bartelega (2018), também verificaram perdas próximas a esta, em porcentagem, equivalentes a 23,0 e 25,5% do total aplicado, 300 kg ha⁻¹ de N, fracionados em três adubações de 100 kg ha⁻¹ de N, correspondendo a perdas de 68,9 e 76,5 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Já Souza et al. (2018) encontraram a menor perda de N-NH₃ pela ureia no cafeeiro, em decorrência da precipitação (1172 mm) e da distribuição das chuvas, equivalente a 11,2% do total aplicado, independente da dose utilizada (200, 400 e 600 kg ha⁻¹).

Com relação ao sulfato de amônio e nitrato de amônio, quando aplicados em solos com pH menores do que 7,0, caso da maioria dos solos brasileiros, não se observa perdas significativas de N-NH₃ por volatilização, pois o N-NH₄⁺ de sua composição terá menores chances de se transformar em N-NH₃, devido a quantidade de prótons H⁺ se manter mais alta por não ocorrer aumento do pH ao redor do grânulo, como é o caso da ureia (CABEZAS; SOUZA, 2008; CONTIN, 2007; CHAGAS et al., 2016; COSTA; VITTI; CANTARELLA, 2003; DOMINGHETTI et al., 2016; FARIA et al., 2014; FENILLI et al., 2007; FREITAS, 2017; FONTOURA; BAYER, 2010; NASCIMENTO et al., 2013; SOUZA, 2015; VIERO et al., 2014). Porém, a utilização desses fertilizantes também indica maior custo por unidade de N quando comparados à ureia (DOMINGHETTI, 2016; FREITAS, 2017).

2.3.2 Fertilizantes nitrogenados estabilizados

A Association of American Plant Food Control Officials (AAPFCO, 1997) define fertilizantes nitrogenados estabilizados como aqueles em que se adiciona algum aditivo capaz de inibir a transformação do N em alguma forma não desejável. Estes aditivos, também conhecidos por estabilizantes, são capazes de aumentar o tempo de permanência do N em uma determinada forma, seja ela ureia ou amônio (TRENKEL, 2010).

Os fertilizantes estabilizados são divididos em duas classes (TRENKEL, 2010): inibidores da nitrificação e inibidores da urease. Os inibidores da nitrificação evitam a oxidação biológica do N-NH₄⁺ a N-NO₃⁻. Já os inibidores da urease, como o próprio nome diz, são substâncias que inibem a atividade da enzima urease, retardando o processo de hidrólise da ureia em condições adversas de clima, reduzindo a volatilização de amônia.

Dentre os inibidores da nitrificação, alguns exemplos são: nitrapirina, dicianodiamida (DCD) e fosfato de 3,4-dimetilpirazol (DMPP) (FRYE, 2005; RUSER; SCHULZ, 2015; SUBBARAO et al., 2006). Eles bloqueiam a ação de bactérias do gênero *Nitrosomonas* no processo de oxidação do N-NH₄⁺ a N-NO₃⁻, de modo a manter o N na forma amoniacal por

mais tempo e, assim, diminuir as perdas por desnitrificação e por lixiviação de $N-NO_3^-$ (ABALOS et al., 2014; CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

Com relação aos inibidores da urease, Upadhyay (2012), classificou-os em duas grandes categorias: estruturas análogas de substrato (hidroxiureia e ácido hidroxâmico) e; inibidores que afetam o mecanismo de reação da urease (fosfodiamidatos). Além dessa classificação, a autora ainda os dividiu em quatro grupos principais de acordo com suas estruturas químicas: compostos tiólicos, ácido hidroxâmico e seus derivados, fosforodiamidatos (organofosforados) e, por último, moléculas que reagem com o átomo de níquel.

O primeiro grupo, dos compostos tiólicos, apresenta ânions tiolato que reagem diretamente com o metalocentro da urease. O segundo grupo inclui ácido hidroxâmico e seus derivados, que competem com a ureia pela ligação com o sítio ativo da urease. O terceiro é dos fosforodiamidatos (organofosforados), inibidores mais eficazes capazes de bloquear o local ativo da enzima (WATSON, 2005). Já o quarto grupo é composto por moléculas capazes de inativar o sítio ativo da urease e adicionar moléculas que reagem com o níquel presente na urease, inativando-a (KRAJEWSKA; ZABORSKA; CHUDY, 2004).

Nos últimos anos, o uso desses fertilizantes nitrogenados estabilizados com inibidores da urease aumentaram, devido a ureia, fertilizante nitrogenado sólido mais importante no mercado mundial, estar sujeita a grandes perdas de $N-NH_3$ quando aplicada na superfície dos solos (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

Os inibidores da urease mais estudados são: triamida N- (n-butil) tiosfórica (NBPT), o fenilfosforodiamidato (PPD / PPDA) e a hidroquinona (KISS; SIMIHAIAN, 2002). O NBPT tem se mostrado o mais eficiente inibidor da urease (CHIEN; PROCHNOW; CANTARELLA, 2009). O NBPT decompõe rapidamente a NBPTO (N-(n-butil) fosfórico triamida) quando entra em contato com o solo, sendo então, capaz de inativar a urease pela substituição das moléculas da água próximas ao seu sítio ativo, ligando-se aos átomos de níquel (KRAJEWSKA, 2009).

O NBPT pode inibir a hidrólise da ureia por períodos de 7 a 14 dias, dependendo das condições ambientais e dos atributos do solo, tais como pH, umidade inicial, temperatura (DAWAR et al., 2011; HENDRICKSON; DOUGLASS, 1993; SANZ-COBENA et al., 2008). Todavia, quando se tem condições de alta temperatura e umidade, adequadas para rápida hidrólise da ureia, a duração da atividade do NBPT é menor (DAWAR et al., 2011). Para Tasca et al. (2011), esse período foi de dois dias apenas, em condições laboratoriais, podendo inviabilizar sua utilização como protetivo.

Em lavoura comercial de café em condição de sequeiro, a ureia com NBPT minimizou 61,9%, em um ano, e 32,3%, no outro ano, das perdas por volatilização de N-NH₃ em relação à ureia convencional (DOMINGHETTI, 2016). Segundo o autor, tal diferença pode ter ocorrido devido a questões climáticas diferenciadas, como chuvas e temperaturas, reduzindo o efeito do NBPT, ou até mesmo por problemas industriais na produção do fertilizante, como diferenças nas doses de NBPT adicionados à ureia, já que se tratava de outro lote de fertilizantes.

Em estudo feito também com cafeeiro em condição de sequeiro, Souza et al. (2018) observaram que a ureia tratada com NBPT foi capaz de reduzir 68,7% das perdas por volatilização de N-NH₃ em relação à ureia convencional. Os autores verificaram volatilização de 3,51 e 11,21% do total aplicado, respectivamente, independente da dose utilizada.

Em experimento realizado por Freitas (2017) em lavoura cafeeira adulta, adubada com 300 kg.ha⁻¹ de N, parcelados em três aplicações de 100 kg.ha⁻¹ de N, contabilizou-se perdas pela ureia tratada com NBPT de 9,6, 6,2 e 20,5% de N-NH₃ em cada aplicação, representando 12,1% do total aplicado, reduzindo as perdas em 52,7% em relação à ureia. Segundo a autora, essa maior perda no último parcelamento da adubação ocorreu devido ao menor volume de precipitação nos seis primeiros dias após a adubação, que aumentou a taxa de hidrólise do fertilizante, mas não foi suficiente para incorporá-lo no solo, intensificando as perdas por volatilização.

Na mesma dose e parcelamento anterior, Bartelega (2018) identificou perdas pela ureia tratada com NBPT em cada aplicação de 21,0, 11,9 e 17,2%, correspondendo a média de 16,7%, reduzindo as perdas em relação à ureia em 34,5%, um pouco menos do que observado por Freitas (2017).

O uso de ureia com NBPT em mudas de cafeeiros conduzidas em vasos promoveu maior acúmulo de matéria seca comparada a ureia convencional, permitindo maior aproveitamento do N, com ganho de 18% na produção de matéria seca das plantas e de 32% no N absorvido por elas (GARCIA et al., 2011).

No entanto, um fator limitante para a utilização desses fertilizantes nitrogenados estabilizados é seu maior custo comparado aos fertilizantes nitrogenados convencionais (GUELF, 2017). Porém, eles apresentam características especiais a serem levadas em consideração no momento da escolha do fertilizante utilizado, como: não ter efeitos colaterais desfavoráveis na fertilidade do solo; não serem tóxicos para o solo, plantas, animais e seres humanos; se enquadrarem nos sistemas de produção dos produtores por serem ambientalmente

corretos e; podem até ser economicamente viáveis por diminuírem as perdas (TRENKEL, 2010).

2.3.3 Fertilizantes nitrogenados de liberação lenta

A Association of American Plant Food Control Officials (AAPFCO, 1997) fez uma única definição para os fertilizantes de liberação lenta ou controlada: são fertilizantes capazes de retardar ou prolongar sua disponibilidade para a planta após a aplicação no solo quando comparados ao fertilizante de referência, como a ureia, nitrato de amônio, dentre outros, cuja disponibilidade de nutrientes é imediata. Esse atraso na disponibilidade inicial ou a disponibilidade contínua pode ocorrer por diversos mecanismos como: revestimentos semipermeáveis, materiais proteicos ou outras formas químicas que controlam a solubilidade do material em água; por hidrólise lenta de compostos de baixo peso molecular solúveis em água; dentre outros (AAPFCO, 1997).

Todavia, os fertilizantes de liberação lenta e controlada podem ser divididos em dois grupos mais importantes disponíveis no mercado, de acordo com o seu processo de produção: produtos de condensação de ureia-aldeídos (fertilizantes de liberação lenta), e fertilizantes revestidos ou encapsulados (fertilizantes de liberação controlada) (TRENKEL, 2010).

O termo ‘fertilizante de liberação controlada’ deve ser usado quando se conhece o padrão, a taxa e a duração da liberação do nutriente, sendo possível controlar essas variáveis durante a fabricação do fertilizante (SHAVIV, 2000). Já para os ‘fertilizantes de liberação lenta’, não há conhecimento desses parâmetros, eles são influenciados pelas condições climáticas e pelo solo, não sendo possível prever sua disponibilidade no tempo, eles apenas liberam o nutriente em um ritmo mais lento do que um fertilizante de referência de liberação imediata, como a ureia (SHAVIV, 2000).

Fertilizantes nitrogenados de liberação lenta, ou quimicamente modificados, são produtos de condensação da ureia com aldeídos. Entre os fertilizantes de liberação lenta, os mais utilizados são: ureia-formaldeído (UF), ureia-isobutiraldeído/isobutilideno-diureia (IBDU®), ureia-alcetaldeído/ciclo-diureia (CDU®) e ureia metileno (UM) (GUELFY, 2017).

Dentre as fontes de N de liberação lenta, a principal utilizada na cafeicultura é a ureia formaldeído. Esse fertilizante é capaz de reduzir mais de 97% das perdas de amônia por volatilização em relação à ureia comum em lavoura cafeeira adulta (BARTELEGA, 2018; DOMINGHETTI, 2016; FREITAS, 2017).

A fabricação da ureia formaldeído é feita a partir da reação de condensação de ureia e formaldeídos (H_2CO) em condições controladas, resultando em uma mistura de polímeros de ureia metileno com diferentes tamanhos de cadeia, grau de polimerização e solubilidade do N (CANTARELLA, 2007; TRENKEL, 2010; YAMAMOTO et al., 2016). O tempo de liberação do N se dá em função peso molecular e grau de polimerização dessas moléculas. Esse processo depende da ação de microrganismos do solo, que decompõem a cadeia lentamente em pequenas frações absorvidas pelas plantas (CANTARELLA, 2007; GUELF, 2017). Desse modo, as características do solo e os fatores ambientais, tais como teor de argila, pH, temperatura e umidade, influenciam a decomposição e a taxa de liberação de N desses fertilizantes (TIMILSENA et al., 2014).

2.3.4 Fertilizantes nitrogenados de liberação controlada

Os fertilizantes nitrogenados de liberação controlada são fertilizantes solúveis convencionais rapidamente disponíveis para as plantas, como a ureia, os quais após a granulação ou perolamento, são revestidos ou encapsulados por materiais orgânicos ou inorgânicos capazes de controlar a liberação do N para o solo (CAHILL et al., 2010; GUELF, 2017; NASH; MOTAVALLI; NELSON, 2012; TRENKEL, 2010).

O revestimento utilizado nesses fertilizantes é insolúvel em água, para controlar a penetração da mesma e, assim, a taxa de dissolução, liberação de nutrientes e duração dessa liberação, pois protege o grânulo do fertilizante da ação da água e do ar, reduzindo sua dissolução imediata (TRENKEL, 2010). Esse processo permite maior sincronia entre quantidade liberada e quantidade requerida pela cultura, atendendo à demanda das plantas, de forma a aumentar a eficiência de uso (TRENKEL, 2010).

Normalmente, a liberação do nutriente acontece quando um ou mais fatores de intemperismo, como variações de temperatura, forças mecânicas, agentes químicos, dentre outros, agem sobre o revestimento, rompendo-o, permitindo a entrada de água e dissolução do fertilizante no interior do grânulo, disponibilizando-o para o solo (CANCELLIER, 2013).

A liberação também está diretamente relacionada com a espessura do revestimento e da qualidade do processo de revestimento por parte da indústria de fertilizantes (TRENKEL, 2010). Se houver imperfeições no revestimento dos grânulos de ureia, que permitam a entrada de água, o N pode ser liberado quase instantaneamente, perdendo seu objetivo (CANCELLIER, 2013).

Dependendo do material utilizado no revestimento, também ocorrem melhorias nas suas características físicas e físico-químicas quando comparados aos fertilizantes convencionais, como: diminuição de empedramento, higroscopicidade, formação de pó, adequação do ângulo de repouso e fluidez, aumento na dureza e maior uniformidade dos grânulos (GUELFY, 2017).

Alguns dos principais compostos utilizados no revestimento da ureia para fabricação desses fertilizantes são: enxofre, polímeros, poliestireno, poliésteres, poliuretano, ácidos graxos, látex, produtos à base de petróleo (resinas), magnésio e fosfato de cálcio, gesso e cera (TIMILSENA et al., 2014). Trenkel (2010) os classifica em três grupos, com base nos materiais de revestimento: enxofre; enxofre mais polímeros, incluindo materiais poliméricos de cera e; materiais poliméricos/poliolefínicos.

Em trabalho com cafeeiros adultos adubados com 450 kg ha^{-1} de N, parcelados em três aplicações de 150 kg ha^{-1} , Dominghetti et al. (2016) observaram que a ureia revestida com resina plástica volatilizou menos, comparada à ureia convencional, sendo as perdas de 8,6 e 31,2% do total aplicado, respectivamente.

Outros estudos realizados em lavoura de café adulta, cuja adubação foi feita com 300 kg ha^{-1} de N parcelados em três aplicações de 100 kg ha^{-1} , constataram volatilização de fertilizantes de liberação controlada menor quando comparada a da ureia convencional (FREITAS, 2017; BARTELEGA, 2018). A ureia revestida com resina plástica perdeu 19,6 e 17,7 kg ha^{-1} de N-NH_3 (6,5% e 5,6% do aplicado), no primeiro e no segundo trabalho, respectivamente, a ureia revestida com polímero insolúvel em água perdeu 18,4 e 13,8 kg ha^{-1} (6,1 e 5,9%) e a ureia convencional, 69,0 e 76,5 kg ha^{-1} (23,0 e 25,5%). No entanto, os autores não encontraram diferenças significativas entre as produtividades oriundas dos tratamentos com esses fertilizantes.

Em experimento em casa de vegetação com mudas de cafeeiro plantadas em vasos, Chagas et al. (2019) utilizaram diferentes fertilizantes nitrogenados, dentre eles, a ureia convencional e dois fertilizantes de liberação controlada, Ureia + Resina plástica e Ureia + Poliuretano. De acordo com os autores, esses fertilizantes de liberação controlada apresentaram maior eficiência agronômica (g massa seca/g N aplicado) do que ureia, porém, não diferiram no índice de eficiência agronômica relativa, calculado com base no acúmulo de massa seca total com relação à ureia.

De modo geral, as principais vantagens dos fertilizantes de liberação controlada em relação aos demais são porque eles apresentam potencial de aumentar a eficiência da adubação nitrogenada, reduzir as perdas de N no sistema solo-planta-atmosfera, resultando em menor

impacto ambiental (SHAVIV, 2000; TRENKEL, 2010), além de melhorar a disponibilidade de N, ajustando à demanda do mesmo pelas plantas.

Porém, o custo da maioria desses fertilizantes é consideravelmente maior para fabricação comparado aos fertilizantes convencionais, sendo seu preço final 1,5 a 10 vezes maior do que o da ureia convencional, aumentando o custo de produção (DOMINGHETTI, 2016; FREITAS, 2017; GUELFY, 2017).

2.3.5 ‘Blends’ de fertilizantes nitrogenados

Como o uso exclusivo de fertilizantes de liberação lenta ou de liberação controlada apresenta elevado custo, dificultando sua aplicação na cafeicultura convencional, os ‘blends’ se tornam alternativa interessante para contornar essa situação, pois apresentam menores custos, e, ainda assim, permitem utilizar essas tecnologias para aumentar a eficiência de uso de N.

Os ‘blends’ de fertilizantes nitrogenados consistem em mistura física de fertilizantes de diferentes classes. Segundo Noellsch et al. (2009), na maioria das vezes, essa mistura é feita com fertilizantes convencionais (com alta solubilidade em água) e fertilizantes de liberação controlada. Assim, o fertilizante convencional fornece N para atender a demanda inicial pela cultura e o fertilizante de liberação controlada por um período mais longo.

A mistura física de grânulos de ureia tratada com NBPT e de ureia revestida com S^0 + polímeros é outro tipo de ‘blend’, no qual a fração de ureia tratada com NBPT é solúvel. Porém, é menos suscetível às perdas em relação à ureia convencional e atende a demanda imediata de N pela cultura, enquanto a outra fração, de ureia + S^0 + polímeros, libera o N gradualmente em médio e longo prazo (CHAGAS et al., 2016; GUELFY, 2017).

O uso dos ‘blends’ de fertilizantes nitrogenados visa: reduzir o custo de mão de obra e máquinas, uma vez que se torna possível fazer uma única adubação; aumentar a eficiência do uso de N, por reduzir as perdas de N por volatilização, lixiviação e desnitrificação e; fornecer a liberação de N em maior sincronia com a curva de absorção da cultura ao longo do ciclo (AZEEM et al., 2014; CHAGAS et al., 2016; CREW; PEOPLES, 2005; FUNJINUMA; BALSTER; NORMAM, 2009; JIN et al., 2013).

Em lavoura cafeeira adulta, Chagas et al. (2016) avaliaram diferentes doses de N - 450 kg ha⁻¹ (100% da dose) e 315 kg ha⁻¹ (70% da dose) - e fontes de N - ureia granulada (100% da dose), nitrato de amônio (100%), Polyblen Montanha[®] (70 e 100%) e Polyblen Extend[®] (70 e 100%). Essas duas últimas fontes são ‘blends’ de ureia estabilizada com NBPT e ureia

revestida com S⁰ e polímeros, diferenciados pela espessura do revestimento desta, mais espesso no Polyblen Montanha[®]. Os autores observaram perdas por volatilização de N-NH₃ nos ‘blends’ menores do que na ureia, porém, maiores que no nitrato de amônio. O Polyblen Montanha[®] foi mais eficiente que o Polyblen Extend[®]. Além disso, a adubação com Polyblen Montanha[®] pode ser feita em dose única, reduzindo dois parcelamentos em comparação às fontes convencionais (ureia e nitrato de amônio), aplicando-se apenas 70% da dose recomendada, sem alterar a produtividade e a nutrição do cafeeiro.

Diferentes fertilizantes nitrogenados: convencionais - Ureia Convencional, Nitrato de Amônio e Sulfato de Amônio + CaCO₃; de liberação lenta - Ureia + formaldeído; de liberação controlada - Ureia + poliuretano e Ureia + resina plástica; ‘blends’ (estabilizado + liberação controlada) - Polyblen Extend[®] e Polyblen Montanha[®]; e o controle, sem aplicação de N, foram avaliados por Chagas et al. (2019) em casa de vegetação utilizando mudas de café. Os autores relatam que o Polyblen Extend[®] apresentou os maiores valores de altura de plantas, massa seca total de plantas, área foliar, acúmulo de N na folha e na planta inteira, maior taxa fotossintética e maior eficiência agrônômica.

Um ‘blend’ de ureia estabilizada com NBPT e ureia revestida com S⁰ e polímeros também foi testado por Dominghetti et al. (2016), Freitas (2017) e Bartelega (2018), em lavoura cafeeira. Nesses trabalhos, o ‘blend’ proporcionou perdas por volatilização de N-NH₃ menores as da ureia convencional. Além disso, segundo Freitas (2017), o ‘blend’ obteve maior produtividade e lucro bruto, quando comparado a 10 outros fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta e de liberação controlada.

2.4 Eficiência de uso de fertilizantes nitrogenados

Visando aumentar a sustentabilidade da cafeicultura brasileira, um dos principais fatores a ser melhorado é a eficiência de uso do nitrogênio (EUN), geralmente baixa devido ao aproveitamento desse nutriente ser pequeno. Esse fato é atribuído ao uso da ureia, principal fertilizante nitrogenado utilizado na agricultura, que pode perder entre 30% e 70% da quantidade de N aplicada (FAVARIN; TEZOTTO; NETO, 2013).

O uso eficiente dos fertilizantes tem se tornado cada vez mais importante no cenário da cafeicultura em decorrência da elevação dos custos de produção, incluindo os de fertilizantes (CONAB, 2020b), do aumento de produtividade e da produção das culturas (CONAB, 2020a),

bem como da possibilidade de ocorrer contaminação ambiental em função do mau uso de insumos.

A eficiência da adubação nitrogenada pode ser obtida indiretamente pela análise da produção da cultura em resposta à adubação, buscando produtividades compatíveis com os investimentos realizados, visando alcançar a máxima produtividade econômica e menores perdas de N. Cantarella e Montezano (2010) sugerem que a EUN seja medida pela quantidade de produto agrícola produzido por unidade de fertilizante aplicado (kg de produto/kg de N), sendo essa inversamente proporcional às doses utilizadas.

Favarin, Tezotto e Neto (2013) associam essa relação negativa entre a EUN e a dose de N utilizada ao metabolismo do carbono. Com aumento da dose de N há maior necessidade de carboidratos para a sua assimilação, ou seja, o metabolismo do carbono e do N são processos ‘competitivos’. Para os autores, essa afirmação pode ser comprovada por diversas pesquisas sobre curva de resposta decrescente à dose de N. Eles ainda ressaltam que esse fato pode estar acontecendo em lavouras cafeeiras de várias regiões, sobretudo, naquelas com aplicações de doses superiores a 450 kg ha^{-1} de N.

No entanto, por mais que o uso de doses baixas de N geralmente proporcione índices de eficiência maiores, ele pode resultar na utilização indesejável do estoque de N e matéria orgânica do solo, comprometendo a fertilidade do solo em médio prazo (DOBERMANN, 2007). Portanto, quando a remoção dos nutrientes por meio dos grãos colhidos for superior à quantidade fornecida, a produtividade será prejudicada em curto prazo, enquanto no médio prazo diminuirá a fertilidade do solo (FAVARIN; TEZOTTO; NETO, 2013).

A relação entre a dose aplicada e a exportação de N pode ser um bom indicador de problemas que subdosagens podem causar com o tempo (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010). Sendo assim, há necessidade de se encontrar a dose ideal de N para o cafeeiro, capaz de proporcionar produtividades com maior retorno econômico, aliadas a melhor EUN, sem reduzir os estoques de N e, conseqüentemente, prejudicar a fertilidade do solo, de acordo com cada realidade.

De modo geral, as doses econômicas ótimas estão próximas daquelas necessárias para suprir a quantidade de N exportada pelos grãos em decorrência da colheita. Doses muito maiores do que as exportadas pela colheita podem provocar excesso de N livre no solo, baixa EUN e, conseqüentemente, maiores riscos de perdas (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

Sendo assim, torna-se necessário conhecer melhor os diversos fatores que afetam o uso eficiente dos fertilizantes, tanto de manejo quanto das características dos próprios fertilizantes,

sendo a última mais expressiva em decorrência da maior facilidade e rapidez para obtenção de resultados em um primeiro momento (CRUSCIOL; SORATTO, 2014).

Diante desse panorama, algumas medidas podem ser tomadas para aumentar a EUN, como evitar a aplicação de ureia em superfície, parcelar os fertilizantes com alta solubilidade em água (principalmente em solos arenosos) e fazer uso, quando possível, das tecnologias que envolvem os ‘Fertilizantes de Eficiência Aumentada’ (VITTI; DOMENICONI, 2014).

A utilização desses fertilizantes, como os fertilizantes nitrogenados de baixa solubilidade (de liberação lenta e de liberação controlada), os estabilizados com inibidores da urease e até mesmo os ‘blends’, se torna uma importante ferramenta para aumentar a EUN na agricultura, pois são capazes de minimizar as perdas de N para o ambiente, além de poder disponibilizá-lo de forma ajustada às necessidades das plantas (SHAVIV, 2005; TRENKEL, 2010). O uso eficiente dos fertilizantes é imprescindível para garantir em longo prazo a produtividade e a lucratividade da cafeicultura (PINTO et al., 2017).

REFERÊNCIAS

- AAPFCO. Association of American Plant Food Control Officials. **Official documents 57**. West Lafayette: AAPFCO, 1997.
- ABALOS, D. et al. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 189, p. 136-144, May. 2014.
- ARAÚJO, A. R. et al. Movimentação de nitrato e amônio em colunas de solo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 3, p. 537-541, maio/jun. 2004.
- AZEEM, B. et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. **Journal of Controlled Release**, Minnesota, v. 181, n. 1, p. 11-21, May. 2014.
- BARTELEGA, L. **Fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta, controlada e blends para o cafeeiro**. 2018. 68 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.
- BORTOLOTTI, R. P. **Perdas de nitrogênio por lixiviação em café fertirrigado no oeste baiano**. 2011. 105 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- CABEZAS, W. A. R. L.; SOUZA, M. A. Volatilização de amônia, lixiviação de nitrogênio e produtividade de milho em resposta à aplicação de misturas de ureia com sulfato de amônio ou com gesso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 6, p. 2331-2342, nov./dez. 2008.
- CAHILL, S. et al. Evaluation of alternative nitrogen fertilizers for corn and winter wheat production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 102, n. 4, p. 1226-1236, July. 2010.
- CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, jan./abr. 2001.
- CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT. **Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: AMMONIA**. Winnipeg: Canadian Environmental Quality Guidelines, 2010. 8 p.
- CANCELLIER, E. **Eficiência da ureia estabilizada e de liberação controlada no milho cultivado em solo de fertilidade construída**. 2013. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.
- CANTARELLA, H.; MONTEZANO, Z. F. Nitrogênio e enxofre. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes: volume 2**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. p. 15-65.

CHAGAS, W. F. T. et al. Ammonia volatilization from blends with stabilized and controlled-released urea in the coffee system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 5, p. 497-509, Sept./Oct. 2016.

_____. Nitrogen fertilizers technologies for coffee plants. **Coffee Science**, Lavras, v. 14, n. 1, p. 55-66, jan./mar. 2019.

CHIEN, S. H.; PROCHNOW, L. I.; CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to increase nutrient efficiency and minimize environmental impacts. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 102, n. 1, p. 261-316, Apr. 2009.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de café: Primeiro levantamento Safra 2020**, v. 6, n. 1, Brasília: CONAB, 2020a. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/30380_d1e1f36c2356b81e8a385cd24f05993b>. Acesso em: 17 mar. 2020.

_____. **Custo de produção, índices, insumos e receita bruta: insumos: fertilizantes entregues**. Brasília: CONAB, 2017. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1536&t=2>>. Acesso em: 08 fev. 2017.

_____. **Preços agropecuários – Preços de insumos – Insumos agropecuários: fertilizante, químico, MG, 2010-2020**. Brasília: CONAB, 2020b. Disponível em: <<https://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultaInsumo.do?method=acaoCarregarConsulta>>. Acesso em: 17 mar. 2020.

CONTIN, T. L. M. **Ureia tratada com o inibidor da urease NBPT na adubação de cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo**. 2007. 69 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical e Subtropical) - Instituto Agrônomo de Campinas, Campinas, 2007.

CORSI, M. Ureia como fertilizante na produção de forragem. In: PEIXOTO, A. M.; MOURA, J. C. de; FARIA, V. P. de (Ed.). **Ureia fertilizante**. 2. ed. Piracicaba: FEALQ, 1994. p. 239-267.

COSTA, M. C. G.; VITTI, G. C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH₃ de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 4, p. 631-637, jul./ago. 2003.

CREW, T. E.; PEOPLES, M. B. Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer base agroecosystems? A review. **Nutrient Cycling in Agroecosystem**, Amsterdam, v. 72, n. 2, p. 101-120, June. 2005.

CRUSCIOL, C. A. C.; SORATTO, R. P. Sistemas de produção e eficiência agrônômica de fertilizantes. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: contexto mundial e técnicas de suporte: volume 1**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2014. p. 229-275.

DAWAR, K. et al. Urea hydrolysis and lateral and vertical movement in the soil: effects of urease inhibitor and irrigation. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 47, n. 2, p. 139-146, Feb. 2011.

DENMEAD, O. T.; FRENEY, J. R.; DUNIN, F. X. Gas exchange between plant canopies and the atmosphere: case studies for ammonia. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 42, n. 14, p. 3394-3406, May. 2008.

DOBERMANN, A. Nutrient use efficiency: measurement and management. In: International Fertilizer Industry Association. **Fertilizer best management practices**. Paris: IFA, 2007. p. 1-28.

DOMINGHETTI, A. W. **Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e convencionais na cultura do cafeeiro**. 2016. 144 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

DOMINGHETTI, A. W. et al. Nitrogen loss by volatilization of nitrogen fertilizers applied to coffee orchard. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 2, p. 173-183, mar./abr. 2016.

DUARTE, F. M. et al. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia com aplicação de uréia em solo de várzea com diferentes níveis de umidade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 3, p. 705-711, maio/jun. 2007.

DYNIA, J. F. Nitrate retention and leaching in variable charge soils of a watershed in São Paulo State, Brazil. **Communications Soil Science in Plant Analysis**, New York, v. 31, n. 5/6, p. 777-791, 2000.

ERNANI, P. R.; BAYER, C.; STECKLING, C. Características químicas de solo e rendimento de matéria seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 4, p. 939-946, out./dez. 2001.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global Perspectives Studies**. Food and agriculture projections to 2050. 2018a. Disponível em: <<http://www.fao.org/global-perspectives-studies/food-agriculture-projections-to-2050/en/>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

_____. **The future of food and agriculture – Alternative pathways to 2050**. Summary version. Rome. 2018b. 60 p. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/I8429EN/i8429en.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

_____. **The future of food and agriculture – Trends and challenges**. Rome, 2017. 163 p. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

FARIA, L. A. et al. Hygroscopicity and ammonia volatilization losses from nitrogen sources in coated urea. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 3, p. 942-948, maio/jun. 2014.

FAVARIN, J. L.; TEZOTTO, T.; NETO, A. P. Balanço nutricional em café: estudo de caso. **Visão Agrícola**, Piracicaba, n. 12, p. 79-81, jan./jul. 2013.

FENILLI, T. A. B. et al. Fertilizer 15N balance in a coffee cropping system: a case study in Brazil. In: **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1459-1469, July./Aug. 2008.

FENILLI, T. A. B. et al. Volatilization of ammonia derived from fertilizer and its reabsorption by coffee plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 38, n. 13/14, p. 1741-1751, July. 2007.

FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. Ammonia volatilization in no-till system in the south-central region of the State of Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 5, p. 1677-1684, Sept./Oct. 2010.

FREITAS, T. **Fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta ou controlada na cultura do cafeeiro**: eficiência e custos. 2017. 96 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

FRENEY, J. R. et al. Factors controlling ammonia loss from trash covered sugarcane fields fertilized with urea. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 31, n. 3, p. 341-349, July. 1991.

FRYE, W. W. Nitrification inhibition for nitrogen efficiency and environment protection. In: IFA INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, 2005, Frankfurt. **Proceedings...** Paris: International Fertilizer Industry Association, 2005. p. 1-8.

FULLIN, E.A. et al. Adubos e Eficiência das Adubações. In: PREZOTTI, L. C. et al. **Manual de Recomendação de Calagem e Adubação para o Estado do Espírito Santo: 5ª Aproximação**. Vitória, ES: SEEA/INCAPER/CEDAGRO, 2007. p. 49-80.

FUNJINUMA, R.; BALSTER, N. J.; NORMAN, J. M. An improved model of nitrogen release for surface-applied controlled-release fertilizer. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 73, n. 6, p. 2043-2050, Nov. 2009.

FURLANI, A. M. C. Nutrição mineral. In: KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. São Paulo: Guanabara Koogan, 2004. p. 40-75.

GARCIA, A. L. A. et al. Efeito da ureia com inibidor de urease do crescimento de mudas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.). **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 1-7, jan./mar. 2011.

GUELFY, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. **Informações Agronômicas**, Belo Horizonte, n. 157, p. 1-14, mar. 2017.

GUERREIRO FILHO, O. et al. Café Arábica. In: AGUIAR, A. T. E. et al. (Ed.). **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**: boletim 200. Campinas: Instituto Agronômico, 2014. p. 90-104.

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

GUIMARÃES, R. J.; MENDES, A. N. G. **Nutrição mineral do cafeeiro**. Lavras: UFLA, 1997. 70 p.

- HALL, W. Benefits of enhanced-efficiency fertilizers for the environment. In: IFA INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, 2005, Frankfurt. **Proceedings...** Frankfurt: International Fertilizer Industry Association, 2005. p. 1-9. 1 CD-ROM.
- HENDRICKSON, L. L.; DOUGLASS, E. A. Metabolism of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 25, n. 11, p. 1613-1618, Nov. 1993.
- IAEA. International Atomic Energy Agency. **Tracer manual on crops and soils**. FAO/IAEA Technical Reports Series No. 171. 1976. 278 p. Disponível em: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/07/237/7237035.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2020.
- IFA. International Fertilizer Association. **IFADATA. IFASTAT – Databases and Charts - Consumption**. Paris, 2020. Disponível em: <<https://www.ifastat.org/databases/plant-nutrition>>. Acesso em: 11 mar. 2020.
- JIN, S. et al. Preparation and properties of a degradable interpenetrating polymer networks based on starch with water retention, amelioration of soil, and slow release of nitrogen and phosphorus fertilizer. **Journal of applied Polymer Science**, New York, v. 128, n. 1, p. 407-415, Apr. 2013.
- KE, J. et al. Effects of different controlled-release nitrogen fertilizers on ammonia volatilization, nitrogen use efficiency and yield of blanket-seedling machine-transplanted rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 205, p. 147-156, Apr. 2017.
- KISS, S.; SIMIHAIAN, M. **Improving efficiency of urea fertilizers by inhibition of soil urease activity**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002. 417 p.
- KRAJEWSKA, B. Ureases I. functional, catalytic and kinetic properties: a review. **Journal of Molecular Catalysis**, Amsterdam, v. 59, n. 1/3, p. 9-21, July. 2009.
- KRAJEWSKA, B.; ZABORSKA, W.; CHUDY, M. Multi-step analysis of Hg²⁺ ion inhibition of jack bean urease. **Journal of Inorganic Biochemistry**, New York, v. 98, n. 6, p. 1160-1168, June. 2004.
- LADHA, J. K. et al. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 87, n. 5, p. 85-156, Oct. 2005.
- LAVIOLA, B. G. et al. Acúmulo em frutos e variação na concentração foliar de NPK em cafeeiro cultivado em quatro altitudes. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 1, p. 19-31, jan./mar. 2008.
- LIGHTNER, J. W.; MENGEL, D. B.; RHYKERD, C. L. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizer surface applied to orchardgrass sod. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 5, p. 1478-1482, Sept./Oct. 1990.
- MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação do cafeeiro: colheitas econômicas e máximas**. São Paulo: Agronômica CERES, 1993. 210 p.

MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro. In: RENA, A. B. et al. (Ed.). **Cultura do cafeeiro**: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1986. p. 165-274.

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

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Informe Estatístico do Café - 2009-2010**. Brasília: Ministério da Agricultura, 2016. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/agroestatisticas/cafe/informe-estatistico-do-cafe-2009-2010.xls/view>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

_____. **Sumário executivo – Café**: março-2020. Brasília: MAPA. 2020. 12 p. Disponível em: <<https://www.abic.com.br/wp-content/uploads/2018/04/2020.03.SumarioCafe.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

MATIELLO, J. B. et al. **Cultura de café no Brasil**: novo manual de recomendações. Varginha: MAPA, 2010. 546 p.

MEISINGER, J. J.; CALDERÓN, F. J.; JENKINSON, D. S. Soil nitrogen budgets. In: SCHEPERS, J. S.; RAUN, W. R. (Ed.). **Nitrogen in agricultural systems**. Madison: American Society of Agronomy, 2008. p. 205-562.

MIKKELSEN, R. Ammonia emissions from agricultural operations: fertilizer. **Better Crops**, Atlanta, v. 93, n. 4, p. 9-11, Oct. 2009.

NASCIMENTO, C. A. C. et al. Ammonia volatilization from coated urea forms. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 37, n. 4, p. 1057-1063, July./Aug. 2013.

NASH, P. R.; MOTAVALLI, P. P.; NELSON, K. A. Nitrous oxide emissions from claypan soils due to nitrogen fertilizer source and tillage/fertilizer placement practices. **Soil Science Society of America Journal**, Amsterdam, v. 76, n. 3, p. 983-993, May. 2012.

NAZARENO, R. B. et al. Crescimento inicial do cafeeiro Rubi em resposta a doses de nitrogênio, fósforo e potássio e a regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 8, p. 903-910, ago. 2003.

NOELLSCH, A. J. et al. Corn response to conventional and slowrelease nitrogen fertilizers across a clay plan landscape. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, n. 3, p. 607-614, May. 2009.

NÔMMIK, H. The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 39, n. 2, p. 309-318, Oct. 1973.

PEDROSA, A. W. **Eficiência da adubação nitrogenada no consórcio entre cafeeiro**. 2013. 73 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2013.

PEZZOPANE, J. R. M. et al. Escala para avaliação de estádios fenológicos do cafeeiro arábica. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 3, p. 499-505, jul./set. 2003.

PINTO, V. M. et al. Uso excessivo de nitrogênio gera perda monetária para cafeicultores do cerrado baiano. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 176-186, abr./jun. 2017.

POZZA, A. A. A. et al. Adsorção e dessorção aniônicas individuais por gibbsita pedogenética. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 99-105, jan. 2009.

QUINTELA et al. Parâmetros produtivos e nutricionais do cafeeiro submetido adubação nitrogenada na região de Garanhuns. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 4, p. 74-79, out./dez. 2011.

REICHARDT, K. et al. Relação entre a adubação nitrogenada e as condições hídricas do solo para um cafezal de Piracicaba, SP. **Coffee Science**, Lavras, v. 4, n. 1, p. 41-55, jan./mar. 2009.

REIS, M. G. F.; BARROS, N. F. Ciclagem de nutrientes em plantios de eucalipto. In: BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F. **Relação solo-eucalipto**. Viçosa, MG: Folha de Viçosa, 1990. p. 265-301.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Ecofisiologia do cafeeiro. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. (Ed.). **Ecofisiologia do cafeeiro**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p. 119-147.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVARES, V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 359 p.

ROCHETTE, P. et al. Ammonia volatilization and nitrogen retention: how deep to incorporate urea? **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 42, n. 6, p. 1635-1642, nov./dec. 2013a.

_____. NH₃ volatilization, soil NH₄⁺ concentration and soil pH following subsurface banding of urea at increasing rates. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 93, n. 2, p. 261-268, May. 2013b.

_____. Banding urea increased ammonia volatilization in a dry acidic soil. **Journal of Environmental Quality**, Madson, v. 38, n. 4, p. 1383-1390, July. 2009.

RUSER, R.; SCHULZ, R. The effect of nitrification inhibitors on the nitrous oxide (N₂O) release from agricultural soils: a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 178, n. 2, p. 171-188, Feb. 2015.

SANGOI, L. et al. Volatilização de N-NH₃ em decorrência da forma de aplicação de uréia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 4, p. 687-692, jul./ago. 2003.

SANZ-COBENA, A. et al. An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 126, n. 3/4, p. 243-249, July. 2008.

SHAVIV, A. Controlled release fertilizers. In: IFA INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, 2005, Frankfurt. **Proceedings...** Frankfurt: IFA, 2005. Disponível em: <<http://www.fertilizer.org/ItemDetail?iProductCode=7968Pdf&Category=AGRI&WebsiteKey=411e9724-4bda-422f-abfc-8152ed74f306>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

SHAVIV, A. Advances in controlled-release fertilizers. **Advances in agronomy**, San Diego, v. 71, n. 1, p. 1-49, 2000.

SOMMER, S. G.; SCHJOERRING, J. K.; DENMEAD, O. T. Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops. **Advances in agronomy**, San Diego v. 82, p. 557-622, Dec. 2004.

SOUZA, J. A. et al. Nitrogen dynamics in a Latosol cultivated with coffee. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 6, p. 390-395, June. 2018.

SOUZA, T. L. **Eficiência agrônômica de fertilizantes nitrogenados, emissão de CO₂ e volatilização de nh₃ na cultura do milho**. 2015. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

STEVENSON, F. J. Origin and distribution of nitrogen in soil. In: SCHEPERS, J. S.; RAUN, W. R. (Ed.). **Nitrogen in agricultural systems**. Madison: American Society of Agronomy, 2008. p. 1-39.

SUBBARAO, G. V. et al. Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems: challenges and opportunities. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Boca Raton, v. 25, n. 4, p. 303-335, July./Aug. 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TASCA, F. A. et al. Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 493-502, mar./abr. 2011.

TIMILSENA, Y. P. et al. Enhanced efficiency fertilizers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 95, n. 6, p. 1131-1142, Apr. 2014.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. **Soil fertility and fertilizers**. 4th ed. New York: Macmillan, 1985. 754 p.

TRENKEL, M. **Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient efficiency in agriculture**. 2nd ed. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010. 163 p.

TRIVELIN, P. C. O.; CABEZAS, W. A. R. L.; BOARETTO, A. E. Dinâmica do nitrogênio de fertilizantes fluidos no sistema solo-planta. In: VITTI, G. C.; BOARETTO, A. E. (Coord.). **Fertilizantes fluidos**. Piracicaba: POTAFÓS, 1994. p. 314-330.

UPADHYAY, L. S. B. Urease inhibitors: a review. **Indian Journal of Biotechnology**, Raipur, v. 11, n. 4, p. 381-388, Oct. 2012.

VIERO, F. et al. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers in no-till wheat and maize in southern brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 38, n. 5, p. 1515-1525, Sept./Oct. 2014.

VITTI, G. C.; DOMENICONI, C. F. Dinâmica de nutrientes no sistema solo-planta visando boas práticas para uso eficiente de fertilizantes. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: contexto mundial e técnicas de suporte: volume 1**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2014. p. 143-200.

WATSON, C. J. Urease inhibitors. In: IFA INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, 2005, Frankfurt. **Proceedings...** Paris: International Fertilizer Industry Association, 2005. p. 1-20.

YAMAMOTO, C.F. et al. Slow release fertilizer based on urea/urea-formaldehyde polymer nanocomposites. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam v. 287, n. 10, p. 390-397, Mar. 2016.

SEGUNDA PARTE – ARTIGOS*

ARTIGO 1 – Curvas de liberação e volatilização de amônia de fertilizantes nitrogenados de liberação controlada e seus “blends” com ureia tratada com inibidor de urease aplicados no cafeeiro

RESUMO

Visando minimizar as perdas e aumentar a eficiência do uso de N na cafeicultura, novas tecnologias de fertilizantes têm sido desenvolvidas, a exemplo dos estabilizados, de liberação controlada e ‘blends’ (mistura física) de ambos. Diante disso, objetivou-se avaliar a volatilização de N-NH₃, curva de liberação, produtividade e eficiência de uso do nitrogênio de fertilizantes nitrogenados com diferentes tecnologias - convencional, estabilizado, de liberação controlada e ‘blends’ - aplicados no cafeeiro. O experimento foi realizado em fazenda em Carmo da Cachoeira, MG, Brasil, entre 09/11/2017 e 30/06/2019, utilizando-se a cultivar Mundo Novo IAC 379/19, *Coffea arabica* L., com espaçamento de 3,85m x 0,85m. Adotou-se o delineamento em blocos casualizados, com três repetições. Foram avaliados sete tratamentos, sendo quatro fertilizantes nitrogenados comerciais: Ureia convencional, Ureia + NBPT (fertilizante estabilizado), Ureia Emax 41% (liberação controlada) e Ureia Emax 43% (liberação controlada); dois ‘blends’ de fertilizantes estabilizado e de liberação controlada: Blend 1 (40% Ureia NBPT + 60% Ureia Emax 41%) e Blend 2 (40% Ureia NBPT + 60% Ureia Emax 43%); e uma testemunha sem aplicação de fertilizante nitrogenado. A adubação com Ureia convencional e Ureia + NBPT foi parcelada em três vezes, de 100 kg de N ha⁻¹ cada, enquanto os demais foram aplicados em única adubação de 300 kg de N ha⁻¹, junto à primeira adubação desses. Avaliou-se: curva de liberação de N pelos fertilizantes de liberação controlada e ‘blends’, em campo e em laboratório; volatilização de amônia; produtividade do cafeeiro e índices de eficiência de uso de N. A liberação de N dos fertilizantes variou entre os experimentos em campo e em laboratório devido o volume de água e temperatura em cada condição. Os fertilizantes Ureia Emax 41%, Ureia Emax 43%, Blend 1 e Blend 2 liberaram 75% do N, em média, aos 158, 99, 100 e 59 dias após a adubação, respectivamente. Aos 96 dias após a adubação desses fertilizantes, correspondente a 40 dias após a 3ª adubação com Ureia convencional e Ureia + NBPT, as médias das taxas de liberação deles, considerando os experimentos de campo e de laboratório, foram de 56,9, 75,3, 74,9 e 85,6%, respectivamente. A Ureia convencional promoveu maiores perdas de nitrogênio por volatilização, de 25,7% do N aplicado nos dois anos. A Ureia + NBPT proporcionou a menor produtividade (34,7 sacas ha⁻¹) em relação aos demais fertilizantes (36,7-38,7 sacas ha⁻¹), sendo apenas superior à Testemunha (30,6 sacas ha⁻¹). Os fertilizantes de liberação controlada, Ureia Emax 41% e Ureia Emax 43%, e seus ‘blends’ com ureia com inibidor da urease possibilitam realizar a adubação nitrogenada do cafeeiro em única dose, disponibilizando o N de forma gradual para as plantas, sem afetar a produtividade e reduzindo as perdas por volatilização quando comparados à ureia convencional. A Ureia convencional é o fertilizante que promove as maiores perdas de nitrogênio por volatilização. Não há relação entre as maiores perdas por volatilização com a produtividade. A Ureia + NBPT proporciona menor produtividade em relação aos demais fertilizantes e apresenta menores índices de eficiência de uso do nitrogênio.

Palavras-chave: Nitrogênio. Eficiência de uso do N. Perdas de N. *Coffea arabica* L.

Release curves and ammonia volatilization of controlled-release nitrogen fertilizers and their blends with urease inhibitor-treated urea applied to coffee tree

ABSTRACT

In order to minimize N losses and increase the nitrogen use efficiency in coffee crop, new fertilizer technologies have been developed, such as stabilized fertilizers, controlled-release fertilizers and blends (physical mixture) of both. Therefore, this paper aims to evaluate the N-NH₃ volatilization, release curve, crop yield and N use efficiency indexes of nitrogen fertilizers with different technologies - conventional, stabilized, controlled-release and blends - applied to the coffee plants. The experiment was conducted on a farm in Carmo da Cachoeira, Minas Gerais, Brazil, between 11/09/2017 and 06/30/2019, with the Mundo Novo cultivar IAC 379/19, *Coffea arabica* L., with spacing of 3.85 m between rows and 0.85 m between plants. A randomized block design was adopted, with three replicates. Seven treatments were evaluated and they consisted of four commercial nitrogen fertilizers: Conventional Urea, Urea + NBPT (stabilized fertilizer), Urea Emax 41% (controlled-release) and Urea Emax 43% (controlled-release); two blends of stabilized and controlled-release fertilizers: Blend 1 (40% Urea NBPT + 60% Urea Emax 41%) and Blend 2 (40% Urea NBPT + 60% Urea Emax 43%); and a witness without nitrogen fertilizer application. The fertilization in Conventional Urea and Urea + NBPT treatments was divided in three applications, in doses of 100 kg N ha⁻¹, while the others were applied in a single application in a dose of 300 kg N ha⁻¹, along with their first fertilization. The evaluated characteristics were: N release curve from controlled-release fertilizers and blends, in the field and in the laboratory; ammonia volatilization; crop yield and N use efficiency indexes. The nitrogen release from fertilizers varied between field and laboratory experiments due to the volume of water and temperature in each condition. The fertilizers Urea Emax 41%, Urea Emax 43%, Blend 1 and Blend 2 released on average 75% of N at 158, 99, 100 and 59 days after fertilization, respectively. At 96 days after the fertilization of these fertilizers, corresponding to 40 days after the 3rd fertilization with Conventional Urea and Urea + NBPT, their release rates averages, considering field and laboratory experiments, were respectively 56.9, 75.3, 74.9 and 85.6%. Conventional Urea promoted the highest nitrogen losses by volatilization, of 25.7% of applied N in two years. Urea + NBPT provided the lowest crop yield (34.7 bags ha⁻¹) compared to other fertilizers (36.7-38.7 bags ha⁻¹), being superior only to the witness (30.6 bags ha⁻¹). Controlled-release fertilizers, Urea Emax 41% and Urea Emax 43%, and their "blends" with urease inhibitor-treated urea make it possible to carry out nitrogen fertilization of the coffee trees in a single application, making N gradually available to the plants, without affecting crop yield and soil N stocks and reducing losses by volatilization when compared to Conventional Urea. Conventional Urea is the fertilizer that promotes the highest nitrogen losses by volatilization. There is no relationship between the greatest losses by volatilization and crop yield. Urea + NBPT provides the lowest yield compared to other fertilizers and has the lowest rates of nitrogen use efficiency.

Keywords: Nitrogen. N use efficiency. N losses. *Coffea Arabica* L.

1 INTRODUÇÃO

A cafeicultura tem evoluído cada vez mais, fato evidenciado pelo aumento significativo da produtividade nos últimos 10 anos, cresceu 43,9% de 2009 a 2019, saindo de 18,9 para 27,2 sacas ha^{-1} (MAPA, 2016; CONAB, 2020), esperando-se atingir o patamar de 38,3 sacas ha^{-1} em 2050 (FAO, 2018). Um dos maiores desafios será obter essa produtividade de forma sustentável, uma vez que o aumento da produção de alimentos, até o momento, tem agravado a competição pelos recursos naturais, intensificado o desmatamento e a degradação da terra (FAO, 2017).

Desse modo, vê-se a necessidade de tornar a produção de café mais eficiente, buscando elevar a produção por área, aliando o melhor manejo do solo e da adubação, uso de genótipos melhorados e controle mais eficiente de pragas e de doenças. Nesse aspecto, o uso eficiente de fertilizantes se torna indispensável, visto que seu consumo e utilização tem aumentado (CONAB, 2017).

Dentre os insumos mais usados na cafeicultura, estão os fertilizantes nitrogenados. O nitrogênio (N) é o nutriente mais exigido pelo cafeeiro, podendo sua recomendação chegar até 450 kg ha^{-1} para lavouras em produção (GUERREIRO FILHO et al., 2014; GUIMARÃES et al., 1999). No entanto, os fertilizantes nitrogenados apresentam baixa eficiência de aproveitamento pelas plantas (KE et al., 2017).

Associa-se essa baixa eficiência ao uso da ureia, que por ter alta concentração de N e baixo custo por unidade de N, é o fertilizante nitrogenado mais utilizado na agricultura, mas está sujeita a perdas de 30% a 70% da quantidade de N aplicada (FAVARIN; TEZOTTO; NETO, 2013). Essas perdas podem ocorrer por volatilização, lixiviação e desnitrificação, e fazem com que o aproveitamento e a recuperação do N sejam baixos. As perdas por volatilização de amônia (NH_3) são as mais significativas para as condições das lavouras cafeeiras no Brasil e podem chegar até 44,7% do total aplicado (BARTELEGA, 2018; CHAGAS et al., 2016; DOMINGHETTI et al., 2016; FENILLI et al., 2007; FREITAS, 2017; SOUZA et al., 2018).

Visando minimizar as perdas de N e aumentar a eficiência do uso de N na agricultura, novas tecnologias de fertilizantes têm sido desenvolvidas, a exemplo dos fertilizantes estabilizados, de liberação controlada e ‘blends’ (mistura física) de ambos.

Os fertilizantes nitrogenados estabilizados são aqueles em que se adiciona algum aditivo (estabilizador) capaz de inibir a transformação do N em alguma forma não desejável

(TRENKEL, 2010). Já os fertilizantes de liberação controlada, possuem a tecnologia mais avançada dentre os fertilizantes de eficiência aumentada (TRENKEL, 2010; TIMILSENA et al., 2014). Eles são obtidos a partir do revestimento de fertilizantes solúveis convencionais, como a ureia, por materiais orgânicos ou inorgânicos, de modo a controlar a liberação do N no tempo, podendo sincronizá-la à demanda da cultura (TRENKEL, 2010). Isso se torna interessante para o cafeeiro, visto que a demanda de N durante seu ciclo é contínua, alterando apenas em quantidade para cada estágio (FULLIN et al., 2007; QUINTELA et al., 2011).

Todavia, o alto custo por unidade de N dos fertilizantes de liberação controlada tem dificultado seu uso em grande escala pelos agricultores (TRENKEL, 2010). Sendo assim, uma alternativa para reduzir esse custo é a utilização de ‘blends’ de fertilizantes estabilizado e de liberação controlada, os quais minimizam as perdas de N e ainda podem ser formulados para liberá-lo de forma ajustada à necessidade da cultura (GUELFY, 2017; TRENKEL, 2010).

Desse modo, deve-se escolher com cuidado os insumos adequados para promover o uso mais eficiente dos fertilizantes, imprescindível para garantir a produtividade e a lucratividade da cafeicultura em longo prazo (PINTO et al., 2017), visando uma cafeicultura mais sustentável técnica, econômica e ambientalmente.

Diante do exposto, objetivou-se avaliar a eficiência de fertilizantes nitrogenados de liberação controlada e seus ‘blends’ com ureia com inibidor da urease no cafeeiro, por meio da avaliação das perdas por volatilização de N-NH₃, padrão das curvas de liberação dos fertilizantes e produtividade do cafeeiro.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi realizado em uma fazenda localizada no município de Carmo da Cachoeira, Minas Gerais, Brasil, situada em latitude 21° 27' 34" Sul e longitude de 45° 16' 11" Oeste, a altitude de 1050 metros, no período de outubro de 2017 a julho de 2019. O clima da região é classificado como Cwa, mesotérmico com verões brandos e suaves e estiagens de inverno (SÁ JUNIOR et al., 2012).

Considerando-se o período de 09/11/2017 a 30/06/2019, o volume total de precipitação na área experimental foi de 2.992,5mm, aferido com medidor pluviométrico de plástico.

A cultivar utilizada foi a Mundo Novo IAC 379/19 da espécie *Coffea arabica* L. O plantio foi realizado em dezembro de 2013, com espaçamento de 3,85 m entre linhas por 0,85 m entre plantas. Adotou-se o delineamento em blocos casualizados, com três repetições. As parcelas foram compostas por 10 plantas, das quais considerou-se as 8 plantas centrais como úteis para as avaliações. As parcelas foram distribuídas nas linhas de plantio dos blocos, sendo feito, posteriormente, o sorteio dos tratamentos para distribuição nessas.

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (EMBRAPA, 2018) de textura argilosa, cujas principais características físicas e químicas das camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm antes do início dos tratamentos podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização química e física do solo da área experimental antes da aplicação dos tratamentos no ano de 2017.

Característica	Unidade	Camadas do solo em profundidade (cm)			
		0 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60
pH	-	5,5	5,7	5,6	5,6
P	mg dm ⁻³	46,67	10,72	5,25	2,30
K	mg dm ⁻³	361,39	270,12	236,30	219,93
Ca ²⁺	cmol/dm ³	2,59	1,90	1,38	1,10
Mg ²⁺	cmol/dm ³	2,31	1,05	0,59	0,36
S	mg dm ⁻³	27,32	26,44	30,42	48,61
Cu	mg dm ⁻³	5,21	4,97	3,31	2,22
B	mg dm ⁻³	0,06	0,49	0,46	0,38
Zn	mg dm ⁻³	12,41	5,80	2,22	1,32
Fe	mg dm ⁻³	39,43	57,45	65,69	50,52
Mn	mg dm ⁻³	38,07	34,73	20,93	13,83
Al ³⁺	cmol/dm ³	0,04	0,09	0,08	0,08
(H+Al)	cmol/dm ³	3,95	3,54	3,70	3,00
Soma de bases (SB)	cmol/dm ³	5,83	3,64	2,57	2,02
CTC efetiva (t)	cmol/dm ³	5,87	3,73	2,65	2,10
CTC potencial (T)	cmol/dm ³	9,78	7,18	6,27	5,02
Saturação por alumínio (m)	%	0,68	2,41	3,01	3,81
Saturação por bases (V)	%	59,58	50,70	41,03	40,27
Matéria orgânica	dag kg ⁻¹	2,47	1,89	1,50	1,69
P-Remanescente	mg L ⁻¹	30,20	28,15	18,60	15,92
Areia	%	48	47	46	46
Silte	%	9	10	11	10
Argila	%	43	43	43	44
Densidade do solo	g cm ⁻³	1,25	1,26	1,20	1,19

Nota: pH = KCl relação 1:2,5; P, K, Fe, Zn, Mn e Cu = Extrator Mehlich 1; Ca²⁺, Mg²⁺ e Al³⁺ = Extrator KCl (1 mol L⁻¹); S = Extrator fosfato monocálcico em ácido acético; H + Al = Extrator SMP; Matéria orgânica: oxidação com Na₂Cr₂O₇ 4N + H₂SO₄ 10N; B = Extrator água quente.

Fonte: Da autora (2020).

2.2 Condução do experimento

Os tratos culturais que se mantiveram padrão entre os tratamentos, como calagem, adubação de K, P e de micronutrientes, foram feitos conforme manejo já realizado na fazenda, de acordo com a necessidade da área experimental, seguindo as recomendações de Guimarães et al. (1999).

As pragas e doenças foram monitoradas frequentemente e, quando atingiam os níveis de controle, este era realizado com produto químico registrado para a cultura. No primeiro ano de condução do experimento, houve uma incidência de ferrugem tardia sobre a lavoura logo antes da colheita, o que impossibilitou seu controle imediato em razão do período de carência dos fungicidas curativos. Desse modo, o atraso no controle da doença levou a um depauperamento excessivo da lavoura.

O controle de plantas daninhas foi realizado utilizando de herbicida à base de glyphosate ($2,5 \text{ L ha}^{-1}$), alternado com roçada mecânica com uso de roçadora.

Foram monitoradas as precipitações diárias, utilizando medidor pluviométrico de plástico; temperaturas médias diárias do solo, com registrador de temperatura LogTag[®] Analyzer UTRIX-16 e; umidade do solo nos dias de coleta para volatilização de N-NH_3 , recolhendo uma amostra de solo de peso conhecido, posteriormente levada para laboratório para secagem em estufa com circulação de ar forçada e determinação da umidade volumétrica do solo.

2.3 Tratamentos

Os tratamentos foram compostos por quatro fertilizantes nitrogenados comerciais, dois ‘blends’ de fertilizantes estabilizado e de liberação controlada, aplicados em quantidades correspondentes a uma dose de $300 \text{ kg de N ha}^{-1}$, e uma testemunha sem aplicação de fertilizante nitrogenado, totalizando sete tratamentos. Algumas das características dos fertilizantes e dos ‘blends’ utilizados estão descritas a seguir:

- a) Ureia convencional: fertilizante convencional com 45% de N;
- b) Ureia + NBPT: fertilizante estabilizado com 44% de N. O tratamento consiste em ureia tratada com 530 mg kg^{-1} do inibidor da urease NBPT (N-(n-butil) tiofosfórico triamida), de acordo com declaração da empresa fabricante;

- c) Ureia Emax 41%: fertilizante de liberação controlada que contém 41% de N. Os grânulos de ureia são revestidos por polímeros de 5ª geração E-Max, insolúvel em água, porém permeável, que impede a dissolução imediata do adubo quando aplicado ao solo, fazendo com que os nutrientes sejam liberados gradualmente ao longo de 5 e 6 meses;
- d) Ureia Emax 43%: fertilizante de liberação controlada que contém 43% de N. Os grânulos de ureia são revestidos por polímeros de 5ª geração E-Max, insolúvel em água, porém, permeável, que impede a dissolução imediata do adubo quando aplicado ao solo, fazendo com que os nutrientes sejam liberados gradualmente ao longo de 3 a 4 meses;
- e) Blend 1: mistura física de dois fertilizantes, sendo 40% de Ureia + NBPT (estabilizado) e 60 % de Ureia Emax 41% (liberação controlada);
- f) Blend 2: mistura física de dois fertilizantes, sendo 40% de Ureia + NBPT (estabilizado) e 60 % de Ureia Emax 43% (liberação controlada).

A adubação dos tratamentos Ureia convencional e Ureia + NBPT foi parcelada em três vezes, de 100 kg de N ha⁻¹ cada, enquanto os demais foram aplicados em uma única adubação de 300 kg de N ha⁻¹, junto a primeira adubação desses. No primeiro ano, a primeira adubação foi feita em 10/11/2017, a segunda em 08/12/2017 e a terceira no dia 05/01/2018. Já no segundo ano, essas as adubações ocorreram nas datas: 11/11/2018, 09/12/2018 e 06/01/2019.

2.4 Características avaliadas

As características avaliadas foram: curva de liberação de N pelos fertilizantes de liberação controlada e 'blends', em campo e em laboratório; volatilização de amônia; produtividade do cafeeiro e índices de eficiência de uso de N.

2.4.1 Curva de liberação de N pelos fertilizantes

As curvas de liberação de N pelos fertilizantes: Ureia + Emax 41%, Ureia + Emax 43%, Blend 1 e Blend 2, foram determinadas em dois testes, um em campo, feito uma vez a cada ano do experimento, para avaliar o comportamento destes sob condições edafoclimáticas de uma lavoura cafeeira, e um em laboratório, para verificar a liberação do N em água destilada sob condições controladas.

Para o experimento em campo foram inseridas amostras dos fertilizantes (40 g cada) em sacos de 12,5x18 cm, feitos com rede de malha de 1,8 mm, posteriormente selados, de modo a não permitir a saída dos fertilizantes. No dia da primeira adubação de cada ano foram colocados 10 sacos em cada parcela, na projeção da copa das plantas com um pouco de solo e folhas em cima destes, de modo a simular uma adubação. As coletas desses materiais ocorreram nos dias 7, 14, 28, 42, 56, 77, 98, 126, 154 e 196 (nas semanas 1, 2, 4, 6, 8, 11, 14, 18, 22 e 28) após a adubação.

Ao coletar as amostras nas datas predeterminadas, removeu-se solo e folhas em volta dos sacos e estes foram armazenados em sacos plásticos lacrados para evitar perdas, e, em seguida, transportados para o laboratório. Então, abriu-se os sacos de rede para remoção da detritos (solo etc.) que tivessem entrado dentro deles.

As amostras foram trituradas em moinho Turrattec (Tecnal[®]) com um pouco de água (50 mL) para quebrar o polímero e liberar todo o fertilizante. Em seguida, adicionou-se 3 mL de H₂SO₄ diluído a 50% para evitar possíveis perdas por volatilização. Utilizou-se uma alíquota de 0,2 mL para a digestão, com ácido sulfúrico em bloco digestor, do N ainda presente nos fertilizantes em cada época avaliada, seguida pela sua determinação pelo método Kjeldahl. Descontando esse valor da quantidade inicial de N em cada amostra, obteve-se o valor de N liberado pelo fertilizante em cada coleta, possibilitando traçar a curva de liberação do mesmo.

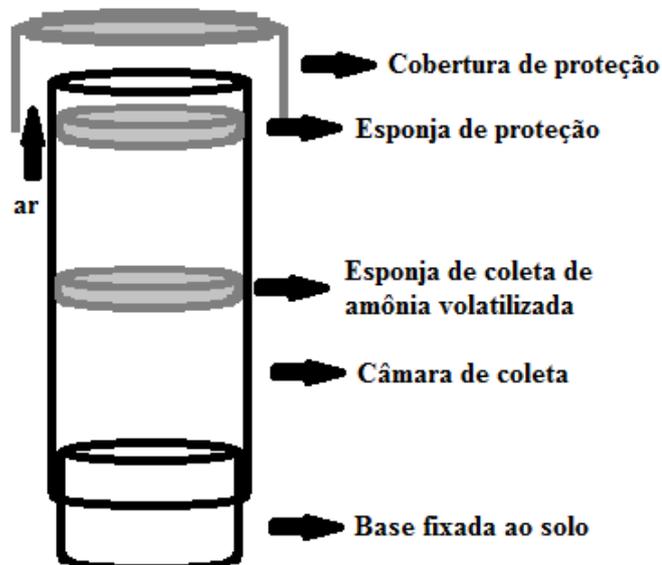
Já para o teste conduzido em condições laboratoriais, utilizou-se a metodologia ISO 21263:2017 (IOS, 2017). Pesou-se amostras de 10 g de cada fertilizante, que foram colocadas em tecido perfurado do tipo 'microtule' e amarrados. Foram feitas cinco amostras de cada fertilizante, ou seja, cinco repetições. Posteriormente, adicionou-se cada amostra em frascos com 500 ml de água destilada, colocados em câmara climática ajustada a 25 °C.

Após 1, 7, 14, 28, 42, 56, 77, 98, 126, 154 e 196 dias, foram feitas as coletas de amostras. Em cada coleta, retirava-se uma alíquota de 20 mL da solução de cada pote, guardada para posterior análise, sendo o restante da solução descartada. Adicionava-se então, 500 mL de água a cada pote, que eram levados para câmara de aclimação. O teor de N liberado a cada coleta foi determinado pelo método de Kjeldahl após a digestão sulfúrica de uma amostra de 0,2 mL.

2.4.2 Volatilização de amônia

As perdas de nitrogênio por volatilização de amônia ($N-NH_3$) foram quantificadas por meio coletores semiabertos de amônia, adaptados de Nõmmik (1973), inseridos nas linhas de adubação. Os coletores foram feitos com tubos brancos de cloreto de polivinila (PVC) de 50 cm de altura e 20 cm de diâmetro. Eles foram inseridos sobre bases fixas no solo, sendo essas produzidas com o mesmo material. Cada coletor foi coberto com uma proteção de plástico e arame, de modo a deixar um espaço que permitisse a passagem de ar entre eles, conforme Figura 1.

Figura 1 - Esquema do coletor de amônia.



Fonte: Da autora (2020).

Fixou-se três bases em cada parcela, onde os fertilizantes foram aplicados nas quantidades equivalentes a área de cada base. Para isso, os fertilizantes foram pesados em balança de precisão no dia anterior a cada adubação. A cada avaliação trocava-se os coletores de base, de modo a permitir que elas sofressem as mesmas influências de temperatura, precipitação e umidade do ar.

Dentro de cada coletor, foram colocadas duas esponjas ($0,02 \text{ g cm}^{-3}$ de densidade e 2 cm de espessura), cortadas no mesmo diâmetro das câmaras. A esponja superior foi colocada a 40 cm do solo, sendo utilizada para proteger a esponja inferior de possíveis contaminações ocasionadas por impurezas ou insetos. A esponja inferior, posicionada a 30 cm do solo, foi

embebida em uma solução de ácido fosfórico (H_3PO_4 ; 60 ml L^{-1}) e glicerina (50 ml L^{-1}), com função de capturar da amônia volatilizada.

Para os tratamentos que tiveram a adubação parcelada (Ureia convencional e Ureia + NBPT), foram feitas 12 coletas de esponjas após cada adubação. Estas coletas ocorreram com mais intensidade nos primeiros dias após a aplicação dos tratamentos, sendo realizadas diariamente até o 5º dia após a adubação nitrogenada. Posteriormente, as coletas se estenderam conforme o comportamento das perdas de amônia, influenciadas pelas condições climáticas, ocorrendo em dias alternados até acabarem as volatilizações de amônia dos fertilizantes.

Já para os fertilizantes Ureia + Emax 41%, Ureia + Emax 43%, Blend 1 e Blend 2, as coletas foram coincidentes com as dos demais referentes à primeira adubação. Assim que essas acabaram, continuou-se coletando uma vez por semana até cessarem as perdas de N-NH_3 nesses tratamentos. Em todas as avaliações realizava-se também a coleta no tratamento testemunha. Todas as coletas foram feitas em horários fixos, às 18 horas.

Em laboratório, extraiu-se a solução das esponjas, que continham N-NH_3 , com auxílio de funil de Buchner e bomba de vácuo, realizando cinco lavagens sequenciais com 80 mL água destilada cada, totalizando 400 mL por esponja. Após a extração, armazenou-se 50 mL dessa solução em refrigerador a $5 \text{ }^\circ\text{C}$, dos quais 20 mL foram usados posteriormente para destilação seguida de titulação pelo método Kjeldahl (1883) para quantificação da amônia volatilizada.

Para cada coleta avaliada descontou-se os valores obtidos pela testemunha daqueles encontrados para os demais tratamentos, por se tratar de possível volatilização de N-NH_3 do ambiente, e não dos fertilizantes, e/ou contaminação durante as análises.

A quantia de N-NH_3 perdida por hectare após cada coleta de cada tratamento foi obtida por meio de cálculos com os resultados das titulações. Calculou-se também, as perdas acumuladas de N de cada fertilizante após todas as adubações e completa liberação destes.

2.4.3 Produtividade

Para a avaliação da produtividade, colheu-se os frutos das plantas úteis (8 plantas centrais) de cada parcela sobre panos apropriados. Após a colheita de cada parcela foi feita a medição, em litros, da sua produção total, e retirada uma amostra de quatro litros para cálculo do rendimento. Essas amostras foram colocadas em sacos confeccionados de tela de polietileno com malha de 1,5 mm, de modo que os grãos ficassem bem espalhados para serem secados ao sol, sendo revolvidos algumas vezes ao dia, até atingirem umidade média de 11%.

Após atingirem a umidade ideal, as amostras foram beneficiadas em um descascador de amostras de café. Posteriormente, foram pesadas e tiveram suas umidades aferidas, para padronizar o peso a uma umidade de 11%. Com obtenção dos pesos das amostras beneficiadas a 11% de umidade e com o volume inicial das amostras recém-colhidas, foi possível obter os valores da produtividade por parcela, em kg. Com o valor de produtividade em quilos por planta (produtividade por parcela/8) multiplicado pelo estande de plantas por hectare (3.056 plantas ha⁻¹), obteve-se a produtividade em kg por hectare que, posteriormente, foi transformada em sacas de 60 kg ha⁻¹. Esse cálculo foi feito pela Equação 1:

$$\text{Produtividade (sacas ha}^{-1}\text{)} = \frac{V_t \times P_f \times N_{ph}}{A_m \times N_{pp} \times P} \quad (1)$$

Em que:

V_t = Volume total colhido na parcela (L)

P_f = Peso final de café beneficiado, a 11% de umidade (kg)

N_{ph} = nº plantas por hectare = 3056

A_m = Volume da amostra de café colhido (L) = 4 L

N_{pp} = nº plantas por parcela = 8

P = peso da saca de café (kg) = 60 kg

2.4.4 Índices de eficiência da adubação nitrogenada

Após a obtenção da média de dois anos dos dados de volatilização dos fertilizantes (kg de N-NH₃ ha⁻¹) e de produtividade do cafeeiro (sacas ha⁻¹), foram calculados os seguintes índices de eficiência da adubação nitrogenada:

a) Eficiência de Uso do N (EUN) (CANTARELLA, MONTEZANO, 2010)

$$EUN \text{ (kg café.kg N aplicado}^{-1}\text{)} = \frac{(\text{Produtividade Fertilizante}) \times 60}{(\text{kg de nitrogênio aplicado})}$$

b) Eficiência de Uso do N não volatilizado (EUN_{NV}) (FREITAS, 2017)

$$EUN_{NV} \text{ (kg café.kg N não volatilizado}^{-1}\text{)} = \frac{(\text{Produtividade Fertilizante}) \times 60}{(\text{kg N aplicado}) - (\text{kg N volatilizado})}$$

2.5 Análises estatísticas dos dados

Os dados de cada característica avaliada foram submetidos à análise de variância pelo teste F, e, ocorrendo diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade, foram submetidos ao teste de médias de Scott-Knott para comparação entre os valores pelo software Sisvar (FERREIRA, 2011). Para determinação das curvas de liberação dos fertilizantes, foi feita análise de regressão dos dados por meio do software SigmaPlot® versão 14.0 (SYSTAT SOFTWARE Inc., 2017).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Curva de liberação de N pelos fertilizantes

A liberação do nitrogênio pelos fertilizantes Ureia Emax 41%, Ureia Emax 43%, Blend 1 e Blend 2 apresentou dinâmica exponencial. No entanto, o comportamento de liberação de N de cada fertilizante foi diferente entre eles e entre os experimentos de campo e de laboratório (FIGURAS 2, 3 e 4 e TABELAS 2, 3 e 4).

Figura 2 – Porcentagem acumulada de nitrogênio liberado pelos fertilizantes aplicados no cafeeiro no primeiro ano do experimento (2017/2018) entre cada coleta (a) e após cada coleta (b).

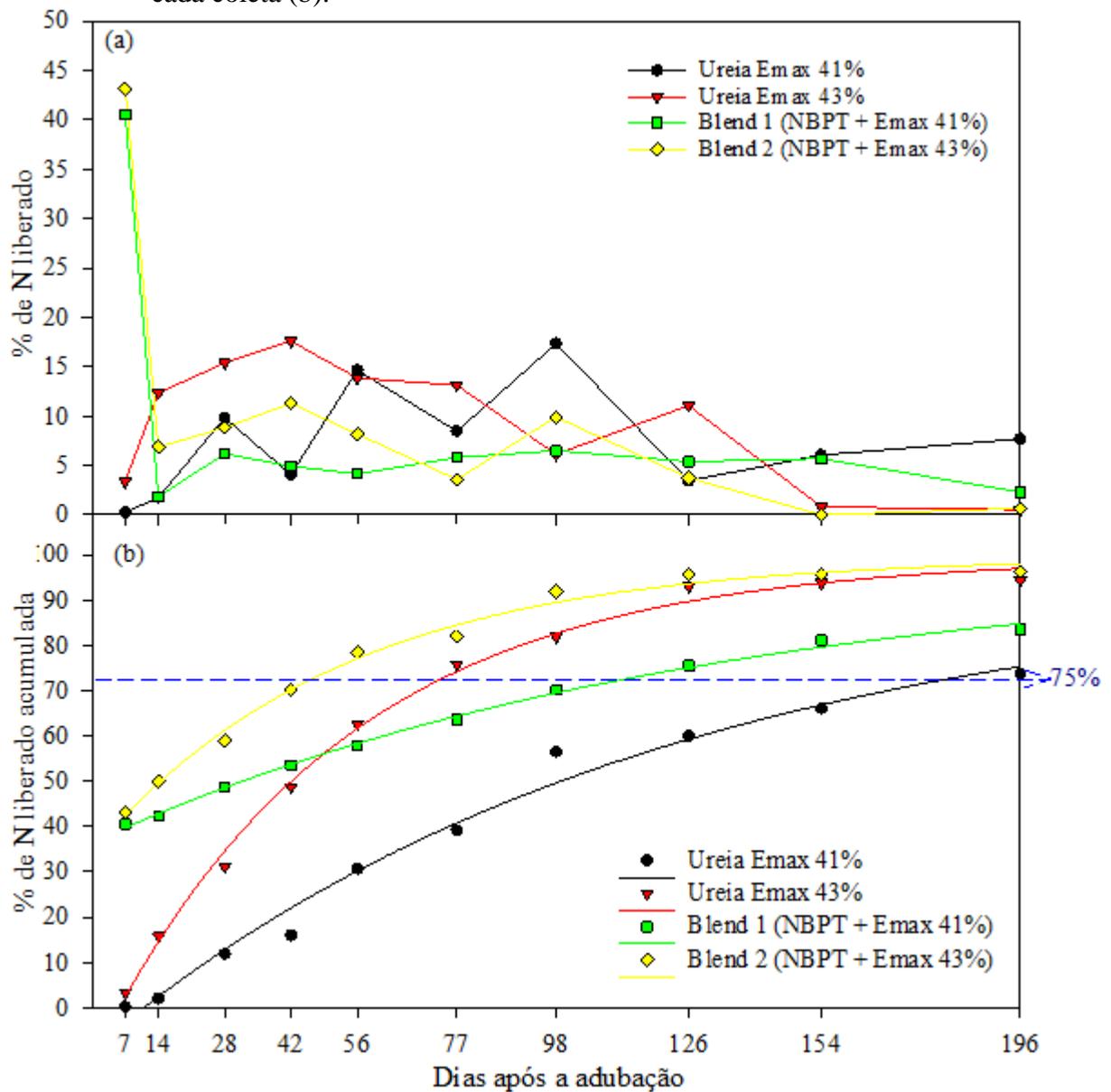


Tabela 2 – Equações de regressão, R^2 da porcentagem acumulada de nitrogênio liberado pelos fertilizantes e número de dias necessários para atingir liberação acumulada de 75% aplicados no cafeeiro no segundo ano do experimento (2017/2018).

Fertilizante	Equações	R^2	75% N liberado (dias)
Ureia Emax 41%	$\% N = -9,172 + 104,40 * (1 - 0,9916^{DAA})$	0,985	195
Ureia Emax 43%	$\% N = -11,590 + 111,20 * (1 - 0,9810^{DAA})$	0,996	79
Blend 1	$\% N = 36,46 + 61,55 * (1 - 0,9922^{DAA})$	0,997	126
Blend 2	$\% N = 34,26 + 65,33 * (1 - 0,9812^{DAA})$	0,992	51

Nota: DAA = dias após a adubação; %N \neq 0.

Fonte: Da autora (2020).

Figura 3 – Porcentagem acumulada de nitrogênio liberado pelos fertilizantes aplicados no cafeeiro no segundo ano do experimento (2018/2019) entre cada coleta (a) e após cada coleta (b).

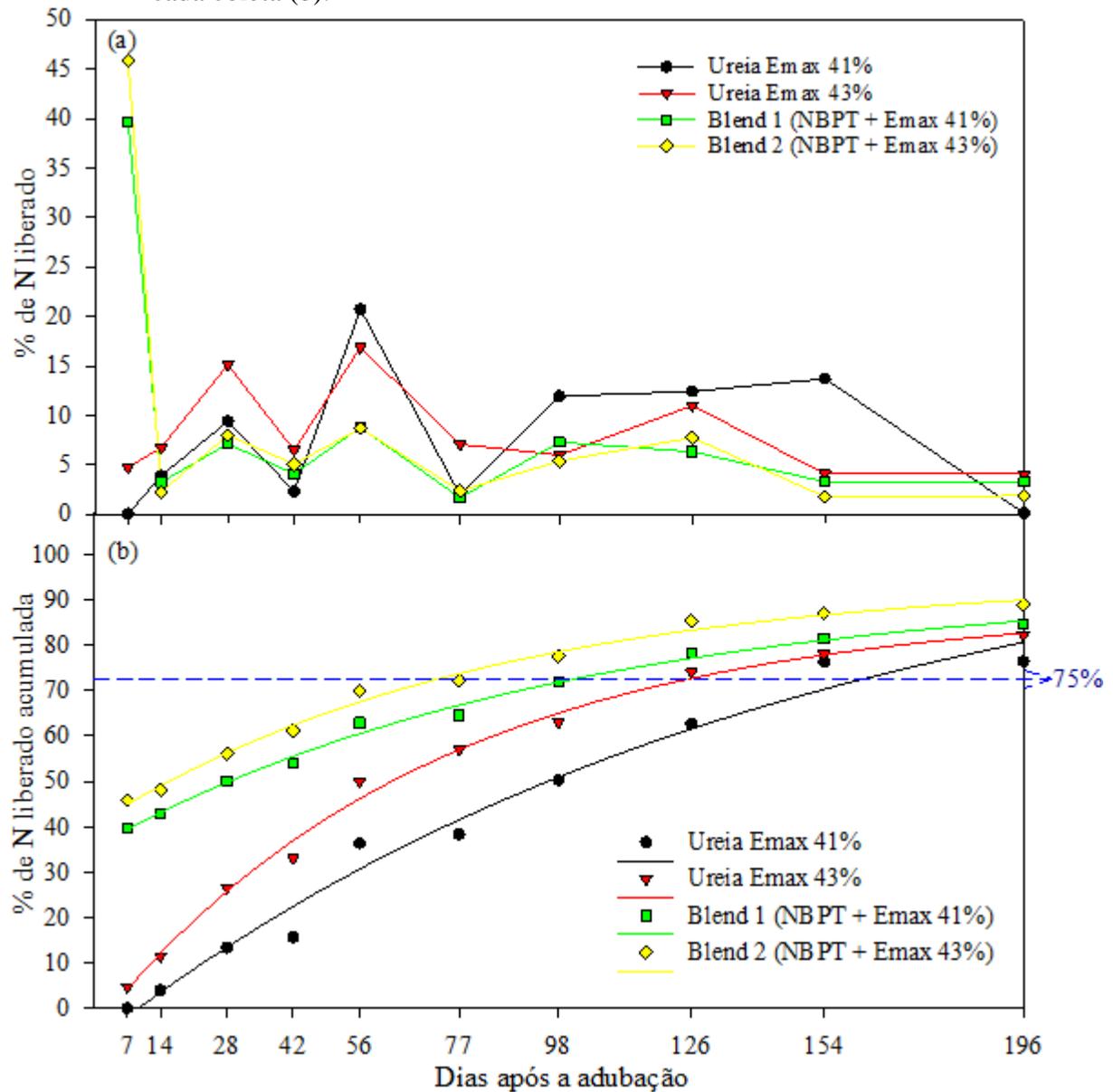


Tabela 3 – Equações de regressão, R^2 da porcentagem acumulada de nitrogênio liberado pelos fertilizantes e número de dias necessários para atingir liberação acumulada de 75% aplicados no cafeeiro no segundo ano do experimento (2018/2019).

Fertilizante	Equações	R^2	75% N liberado (dias)
Ureia Emax 41%	$\% N = -7,45 + 118,50 * (1 - 0,9931^{DAA})$	0,980	172
Ureia Emax 43%	$\% N = -4,554 + 93,15 * (1 - 0,9860^{DAA})$	0,995	136
Blend 1	$\% N = 35,47 + 57,76 * (1 - 0,9899^{DAA})$	0,994	114
Blend 2	$\% N = 40,36 + 54,43 * (1 - 0,9877^{DAA})$	0,992	82

Nota: DAA = dias após a adubação; %N \neq 0.

Fonte: Da autora (2020)

Figura 4 – Porcentagem acumulada de nitrogênio liberado pelos fertilizantes no experimento realizado em laboratório, onde estavam imersos em água destilada a 25°C, entre cada coleta (a) e após cada coleta (b).

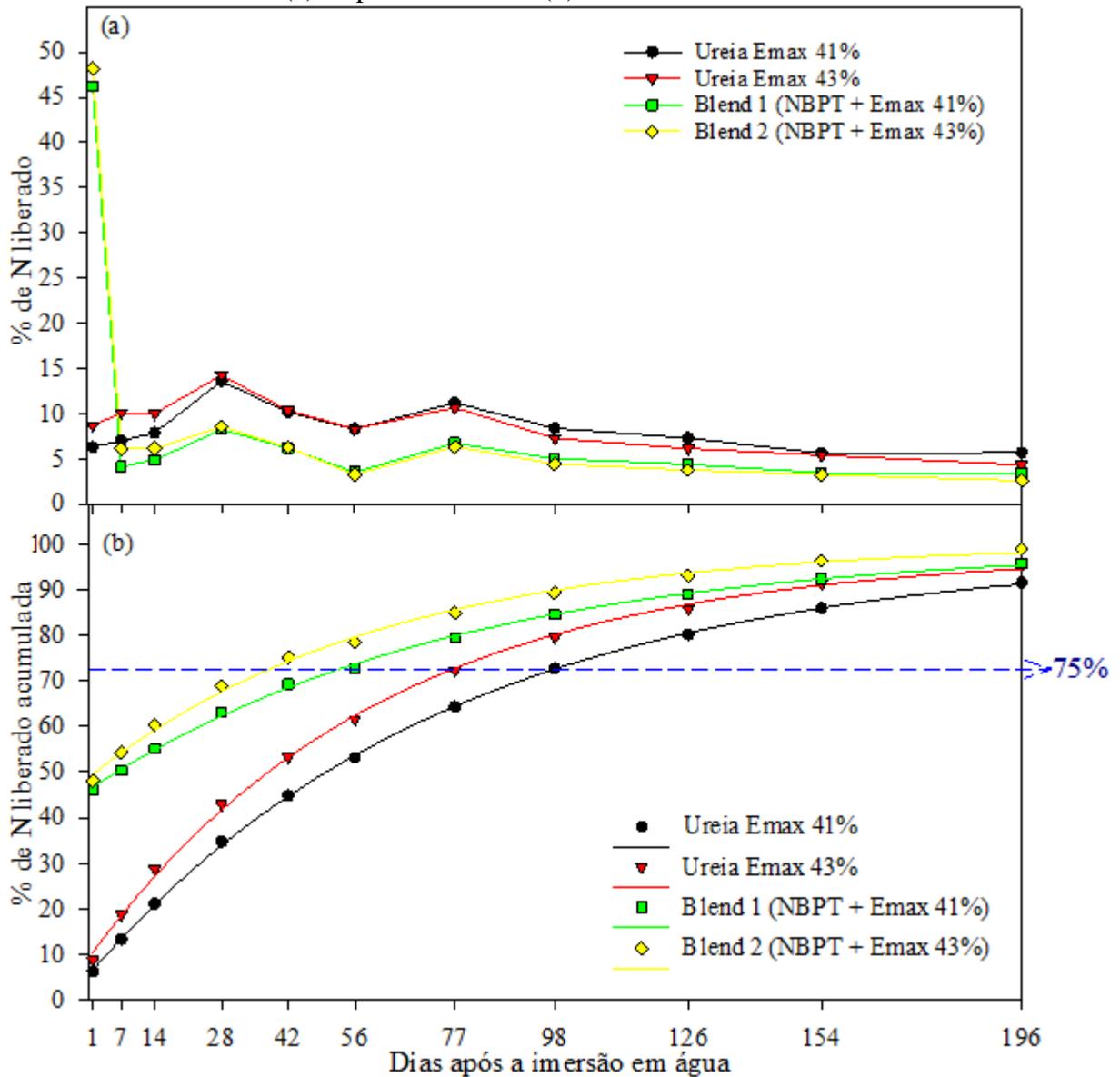


Tabela 4 – Equações de regressão, R^2 da porcentagem acumulada de nitrogênio liberado pelos fertilizantes e número de dias necessários para atingir liberação acumulada de 75% no experimento realizado em laboratório.

Fertilizante	Equações	R^2	75% N liberado (dias)
Ureia Emax 41%	$\% N = 5,35 + 93,00 * (1 - 0,9870^{DAI})$	1,000	106
Ureia Emax 43%	$\% N = 8,95 + 89,31 * (1 - 0,9839^{DAI})$	0,999	83
Blend 1	$\% N = 45,96 + 53,76 * (1 - 0,9871^{DAI})$	0,999	60
Blend 2	$\% N = 48,64 + 51,63 * (1 - 0,9838^{DAI})$	0,997	44

Nota: DAI = dias após a imersão dos fertilizantes em água destilada a 25°C; %N \neq 0.

Fonte: Da autora (2020).

Logo na primeira avaliação de cada experimento, 7 dias após a adubação (DAA) para os experimentos de campo e 1 dia após a imersão dos fertilizantes em água (DAI) para o experimento em laboratório, os 'Blends' 1 e 2 tiveram valores elevados de liberação de N. Isso ocorreu devido a composição destes, em que 40% era Ureia + NBPT, fração de alta solubilidade em água, imediatamente disponível na presença desta (FIGURAS 2a, 3a e 4a). De acordo com o experimento em laboratório, essa fração foi totalmente liberada logo no primeiro dia após a colocação dos fertilizantes em água.

Aos 7 dias após o início de cada experimento, a Ureia Emax 41% apresentou valores de liberação próximos a zero, mas teve liberação de 13,3% em laboratório. Já a Ureia Emax 43%, liberou 3,4% de N nessa avaliação no primeiro ano e 4,7% no segundo, enquanto em laboratório essa liberação foi de 18,7%. Os picos de liberação de N desses fertilizantes ocorreram 98 e 42 DAA, respectivamente, no primeiro ano, 56 DAA no segundo ano e 28 DAI em laboratório (FIGURAS 2a, 3a e 4a).

No primeiro ano (2017/2018), na última avaliação, 196 DAA, os fertilizantes Ureia Emax 41%, Ureia Emax 43%, Blend 1 e Blend 2 haviam liberado, respectivamente, 73,7, 94,4, 83,5 e 96,3% (FIGURA 2b). No segundo ano (2018/2019), esses valores foram 76,4, 82,2, 84,8 e 89,0% (FIGURA 3b). Já em laboratório, corresponderam a 91,2, 95,3, 96,0 e 98,6% (FIGURA 4b).

A longevidade de fertilizante de liberação controlada é indicada pelo tempo necessário para atingir uma taxa de liberação acumulada de 75% desde o início da extração, em repouso em água a 25 °C (ou a temperatura especificada pelo fabricante) (ISO, 2016). De acordo com o fabricante, é esperado que a liberação do fertilizante Ureia Emax 41% ocorra de 5 a 6 meses (150 a 180 dias) e da Ureia Emax 43% de 3 a 4 meses (90 a 120 dias) (ICL, 2019). Verificou-se, pelas equações de regressão, que esses fertilizantes apresentaram 75% de sua liberação, respectivamente, aos 195 e 79 DAA no primeiro ano de experimento em campo, aos 172 e 136 DAA no segundo ano e 106 e 83 DAI no experimento em laboratório (TABELAS 2, 3 e 4).

Para o Blend 1, composto por 40% de Ureia + NBPT, altamente solúvel em água, e 60% de Ureia Emax 41%, a liberação de 75% do N ocorreu 126 DAA no primeiro ano, 114 DAA no segundo ano e 60 DAI em laboratório. Com relação ao Blend 2, composto por 40% de Ureia + NBPT e 60% de Ureia Emax 43%, esses valores foram de: 51 DAA, 82 DAA e 44 DAI, respectivamente (TABELAS 2, 3 e 4).

Considerando os três testes, os fertilizantes Ureia Emax 41%, Ureia Emax 43%, Blend 1 e Blend 2 liberaram 75% do N, em média, aos 158 dias, 99 dias, 100 dias e 59 dias,

respectivamente. Aos 96 dias após a adubação desses fertilizantes, correspondente a 40 dias após a 3ª adubação nitrogenada com a Ureia convencional e Ureia + NBPT, as médias das taxas de liberação deles, considerando os experimentos de campo e de laboratório, foram de 56,9, 75,3, 74,9 e 85,6%, respectivamente.

Apesar das diferenças entre os testes, a curva de liberação do N pela Ureia Emax 41% manteve-se abaixo da curva da Ureia Emax 43%, indicando liberação mais lenta de N, assim como ocorreu com o Blend 1 em relação ao Blend 2. Esse fato está relacionado à maior espessura do revestimento dos grânulos do fertilizante Ureia Emax 41%, que também estava presente no Blend 1, quando comparada à Ureia Emax 43%, presente no Blend 2 (TABELAS 2, 3 e 4).

Dentre vários fatores que interferem na taxa de liberação do N pelo fertilizante, destacam-se diferenças na espessura de revestimento, rupturas da camada e resposta do material de revestimento as condições ambientais (ADAMS; FRANTZ; BUGBEE, 2013; TIMILSENA et al., 2014). A Ureia Emax consiste em um fertilizante 100% solúvel encapsulado por polímero insolúvel, porém, semipermeável, cuja permeabilidade é controlada apenas pela temperatura do solo, sem ser afetada por outros fatores (ICL, 2019).

A liberação do N pela ureia revestida pelo polímero Emax se dá sob influência da temperatura do solo, permitindo que a água penetre no polímero, iniciando a dissolução gradual do nutriente, gerando pressão osmótica no interior do grânulo do fertilizante. Essa pressão promove a liberação dos nutrientes para a solução do solo, através dos poros microscópicos do polímero, diminuindo até o esgotamento dos nutrientes no interior do grânulo (ICL, 2019).

Portanto, a liberação de nutriente através da membrana polimérica não é significativamente afetada por algumas propriedades do solo, como pH, salinidade, textura, atividade microbiana, potencial redox, força iônica da solução, mas sim, pela temperatura e permeabilidade à umidade do revestimento de polímero (TRENKEL, 2010). Desse modo, é possível prever a liberação de nutrientes dos fertilizantes revestidos com polímeros por um determinado período com muito mais confiabilidade do que, por exemplo, da ureia revestida por enxofre (SHAVIV, 2000).

Logo, a diferença na taxa de liberação dos experimentos de campo e do realizado em laboratório pode ser atribuída a diferentes condições ambientais, sobretudo, da temperatura do solo e da solução onde os fertilizantes estavam imersos. A média da temperatura do solo durante a condução dos experimentos de campo foi 20,7 °C no primeiro ano e 20,9 °C no segundo ano, sendo que no experimento de laboratório, a temperatura foi mantida constantemente a 25,0 °C.

Em lavoura cafeeira, dois ‘blends’ de fertilizantes de liberação controlada com fertilizante estabilizado com NBPT foram comparados por Chagas (2017). Segundo o autor, o ‘blend’ com fertilizante de liberação controlada de maior espessura (Polyblen Montanha[®]) demorou mais tempo para ser liberado do que o de menor espessura (Polyblen Extend[®]). Também foi observado diferenças entre o experimento conduzido em campo e o de laboratório, onde os fertilizantes estavam imersos em água destilada a 40 °C. De acordo com as equações de regressão encontradas pelo autor, o comportamento das curvas de liberação dos fertilizantes também foi exponencial. A liberação de N acumulada atingiu o valor de 80% aos 77 e 30 DAA, respectivamente, no experimento de campo. Já em laboratório, esse valor foi obtido pelo Polyblen Extend[®] aos 63 DAI, enquanto a liberação de N pelo Polyblen Montanha[®] não ultrapassou 75% ao final do experimento, 436 DAI.

3.2 Volatilização de amônia

As perdas acumuladas e diárias de amônia (NH₃) e os dados de precipitação, umidade do solo e temperatura média do solo, referentes ao primeiro ano do experimento, se encontram na Figura 5, enquanto as do segundo ano estão indicadas na Figura 6. As perdas acumuladas de N-NH₃ foram influenciadas significativamente ($p \leq 0,05$) pelos fertilizantes nitrogenados aplicados no cafeeiro nos dois anos do experimento (TABELA 5, FIGURAS 5a e 6a).

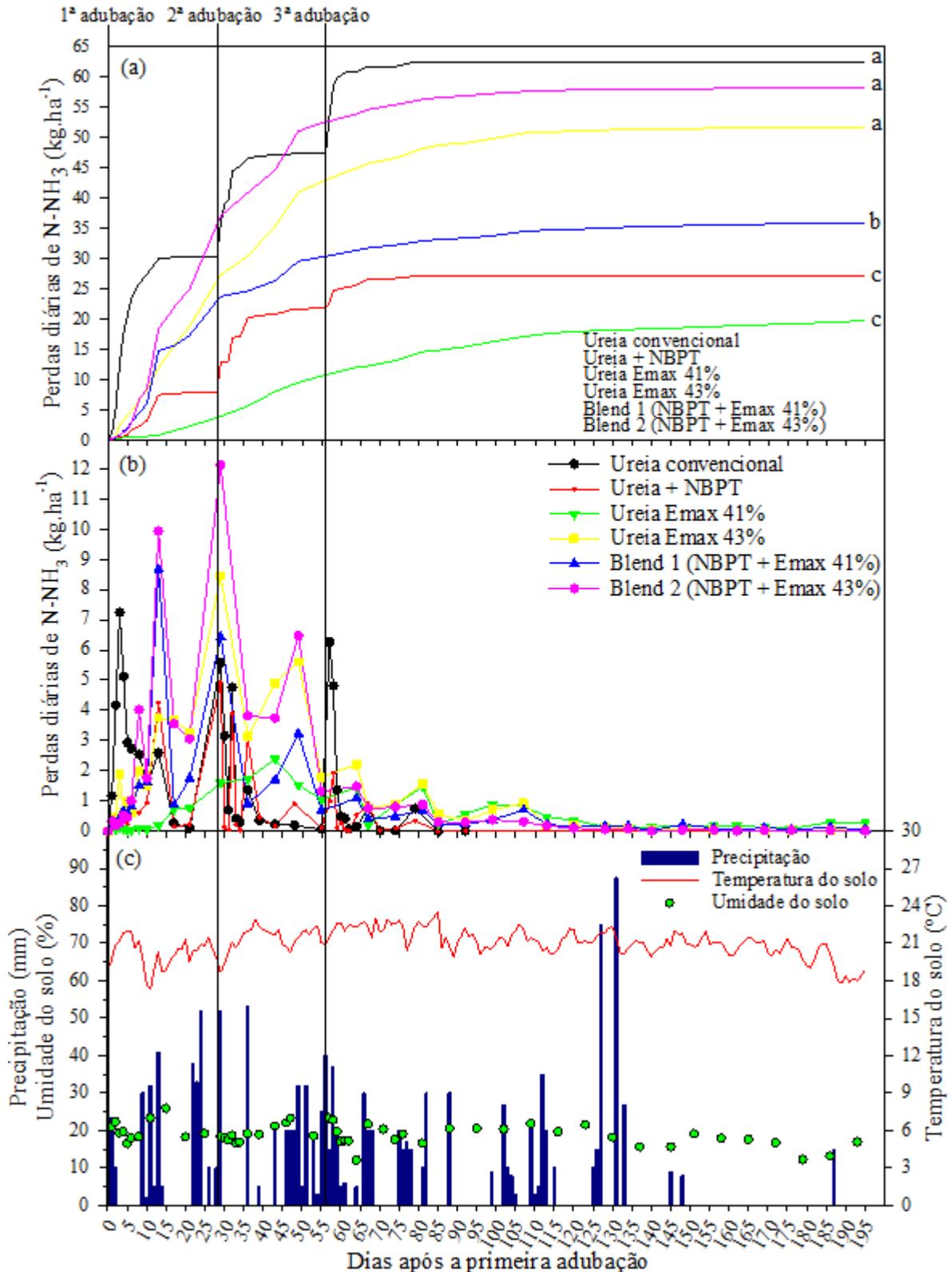
Tabela 5 – Médias das perdas acumuladas de nitrogênio por volatilização de amônia (kg ha⁻¹) dos fertilizantes aplicados no cafeeiro, no primeiro ano (2017/2018), no segundo ano (2018/2019) e a média referentes aos dois anos do experimento.

Fertilizante	Perdas acumuladas					
	2017/2018		2018/2019		Média de dois anos	
	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹	%
Ureia convencional ⁽¹⁾	62,5 a	20,8 a	91,9 a	30,6 a	77,2 a	25,7 a
Ureia + NBPT ⁽¹⁾	27,1 c	9,0 c	84,5 b	28,2 b	55,8 b	18,6 b
Ureia Emax 41% ⁽²⁾	19,8 c	6,6 c	36,3 e	12,1 e	28,1 e	9,4 e
Ureia Emax 43% ⁽²⁾	51,7 a	17,2 a	49,5 d	16,5 d	50,6 c	16,9 c
Blend 1 (NBPT + Emax 41) ⁽²⁾	36,0 b	12,0 b	50,5 d	16,8 d	43,2 d	14,4 d
Blend 2 (NBPT + Emax 43) ⁽²⁾	58,3 a	19,4 a	62,8 c	20,9 c	60,5 b	20,2 b
Média	42,6	14,2	62,6	20,9	52,6	17,5
Coefficiente de variação	10,70	10,70	6,50	6,50	5,84	5,84

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. (1) Foram parcelados em 3 aplicações de 100 kg ha⁻¹ de N cada. (2) Foram aplicados em dose única de 300 kg ha⁻¹ de N.

Fonte: Da autora (2020).

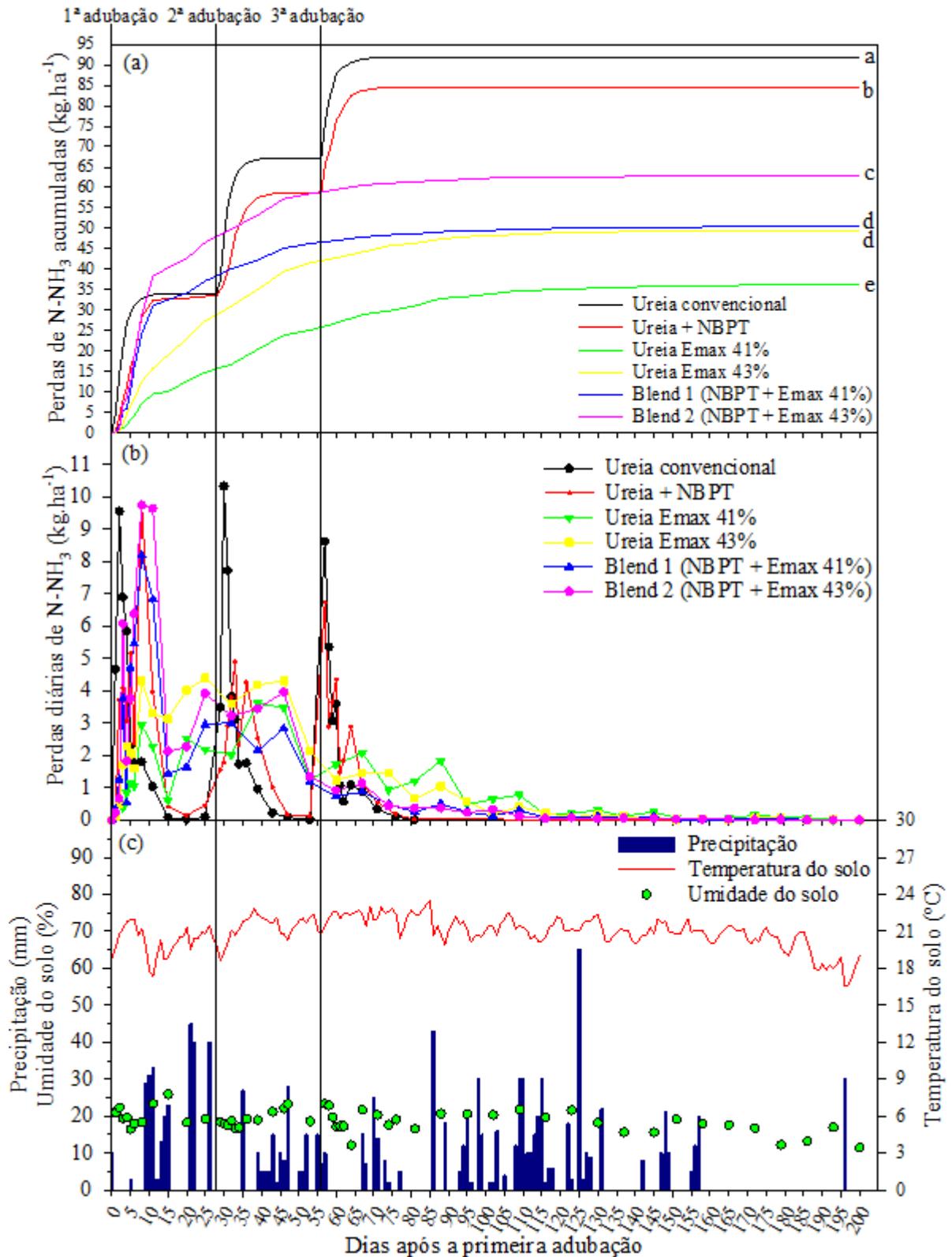
Figura 5 - Perdas acumuladas (a) e diárias (b) de amônia por volatilização dos fertilizantes aplicados no cafeeiro no primeiro ano do experimento (2017/2018), juntamente com os dados de precipitação, umidade do solo e temperatura do solo (c).



Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras na Figura 5 (a) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. Ureia convencional e Ureia + NBPT foram parceladas em 3 aplicações de 100 kg ha⁻¹ de N cada, o restante foi aplicado em dose única de 300 kg ha⁻¹ de N.

Fonte: Da autora (2020).

Figura 6 - Perdas acumuladas (a) e diárias (b) de amônia por volatilização dos fertilizantes aplicados no cafeeiro no segundo ano do experimento (2018/2019), juntamente com os dados de precipitação, umidade do solo e temperatura do solo (c).



Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras na Figura 6 (a) não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. Ureia convencional e Ureia + NBPT foram parceladas em 3 aplicações de 100 kg ha⁻¹ de N cada, o restante foi aplicado em dose única de 300 kg ha⁻¹ de N.

Fonte: Da autora (2020).

No primeiro ano (2017/2018), as perdas acumuladas de N-NH₃ foram maiores para os fertilizantes Ureia convencional (20,8%), Ureia Emax 43% (17,2%) e Blend 2 (19,4%), seguidos pelo Blend 1 (12,0%). Já a Ureia + NBPT (9,0%) e a Ureia Emax 41% (6,6%) apresentaram as menores perdas (FIGURA 5a, TABELA 5).

No segundo ano (2018/2019), a Ureia convencional foi o fertilizante que apresentou a maior perda acumulada de N-NH₃, tendo volatilizado 91,9 kg ha⁻¹ de N, equivalente a 30,6% do N aplicado. A Ureia + NBPT teve a segunda maior perda, de 84,5 kg ha⁻¹ de N-NH₃ (28,2%). Seguindo a ordem decrescente, em seguida apareceu o Blend 2 (20,9%), seguido pela Ureia Emax 43% (16,5%) e pelo Blend 1 (16,8%). Nesse ano, a Ureia Emax 41% teve a menor perda em relação aos demais fertilizantes (12,1%) (FIGURA 6a, TABELA 5).

Na Tabela 5 estão as médias das perdas acumuladas de cada fertilizante dos dois anos do experimento. A Ureia convencional apresentou as maiores perdas por volatilização (25,7% do N aplicado), seguida pelo Blend 2 (20,2%) e pela Ureia + NBPT (18,6%). Em sequência, vieram a Ureia Emax 43% (16,9%), o Blend 1 (14,4%) e, por último, com as menores perdas, a Ureia Emax 41% (9,4%).

No primeiro ano, os picos máximos de volatilização de N-NH₃ da Ureia convencional no primeiro ano ocorreram entre os seis primeiros dias após cada adubação, totalizando nesse período perdas de 23,3, 14,9 e 13,4 kg ha⁻¹ após a 1^a, 2^a e 3^a adubação, respectivamente. Já para a Ureia + NBPT, essas perdas foram de 1,7, 9,2 e 3,4 kg ha⁻¹, destacando, na primeira adubação, um maior pico fora desse período, aos 13 DAA, de 4,3 kg ha⁻¹. Os ‘Blends’ 1 e 2 também apresentaram um pico de volatilização nesse dia, de 8,7 e 9,9 kg ha⁻¹, respectivamente, possivelmente devido à fração de Ureia + NBPT. Além desse pico aos 13 DAA, ambos fertilizantes também tiveram perdas maiores aos 29 (6,4 e 12,1 kg ha⁻¹) e aos 49 DAA (3,2 e 6,5 kg ha⁻¹), bem como a Ureia Emax 43% (5,6 kg ha⁻¹). Já a Ureia Emax 41%, teve apenas um pico 43 DAA, mas representou uma perda de 2,4 kg ha⁻¹ (FIGURA 5b).

No segundo ano, os picos de volatilização da Ureia convencional também ocorreram entre os seis primeiros dias após cada adubação, acumulando perdas nesse período de 31,0, 30,2 e 22,3 kg ha⁻¹ após a 1^a, 2^a e 3^a adubação, respectivamente. Com relação a Ureia + NBPT, essas perdas corresponderam a 18,6, 17,3 e 20,9 kg ha⁻¹. Os ‘Blends’ 1 e 2 tiveram maiores perdas 8 DAA (8,2 e 9,7 kg ha⁻¹), assim como a Ureia + NBPT (9,8 kg ha⁻¹), provavelmente pela presença desta em suas composições. Já os fertilizantes de liberação controlada, Ureia Emax 41% e Ureia Emax 43%, tiveram suas maiores perdas distribuídas entre os dias 8 e 46 após a adubação, não ultrapassando 4,4 kg ha⁻¹ (FIGURA 6b).

A volatilização da amônia está diretamente relacionada com a precipitação (BLACK; SHERLOCK; SMITH, 1987; KISSEL et al., 2004) e temperatura (MARTHA JÚNIOR et al., 2004). A soma das precipitações durante as avaliações da volatilização foi de 1332 mm no primeiro ano e 1124 mm no segundo ano. A média da temperatura do solo durante a condução dos experimentos de campo foi de 20,7 °C no primeiro ano e 20,9 °C no segundo ano. Esses dados podem estar relacionados com os resultados de volatilização dos dois anos, uma vez que houve maior volume de precipitação e menores temperaturas no primeiro ano, quando se observou menores perdas em relação ao segundo ano.

De modo geral, o processo de hidrólise da ureia ocorre rapidamente, por isso, as perdas de amônia por volatilização da Ureia convencional tendem a se concentrar nos primeiros cinco ou seis dias após a aplicação do fertilizante (ALVES, 2006; CABEZAS; TRIVELIN, 1990; COSTA; VITTI; CANTARELLA, 2003; ROJAS et al., 2012). Em ambos os anos, as maiores perdas por volatilização da Ureia convencional ocorreram nos seis primeiros dias após a adubação, sendo que a soma de precipitação nesse período após cada adubação foi de 34, 62 e 124 mm no primeiro ano e 13, 0 e 17 mm no segundo ano, totalizando 220 e 30 mm com perdas de N-NH₃ de 17,2% e 27,8% do N aplicado, respectivamente. As perdas acumuladas da Ureia convencional em cada adubação foram maiores na primeira adubação do primeiro ano, assim como na primeira e na segunda adubação do segundo ano, períodos de menores precipitações.

Quando ocorrem precipitações dentro de curto período de tempo após a adubação e em quantidade suficiente para a incorporação da ureia junto ao solo, a volatilização pode ser reduzida (BLACK; SHERLOCK; SMITH, 1987; CANTARELLA et al., 2008; KISSEL et al., 2004; PRASERTSAK et al., 2001), pois a amônia no interior do solo encontra barreiras físicas e químicas para atingir a superfície e ser perdida (COSTA et al., 2008). Porém, se a precipitação aumentar o índice de água no solo e não for suficiente para incorporação da ureia, ocorrerá maiores perdas por volatilização, pois aumentará a taxa de hidrólise (KISSEL et al., 2004; PRASERTSAK et al., 2001).

A Ureia + NBPT reduziu 56,6% das perdas por volatilização de N-NH₃ em relação à Ureia convencional no primeiro ano, porém, apenas 8,1% no segundo ano, resultando em média de 27,7% de redução. Portanto, o tratamento da ureia com NBPT auxiliou na diminuição das perdas por volatilização de amônia, porém, não foi capaz de impedir totalmente a volatilização. Quando em contato com o solo, o NBPT se decompõe rapidamente a NBPTO (N-(n-butil) fosfórico triamida), sendo, então, capaz de inativar a urease pela substituição das moléculas de água próximas ao seu sítio ativo, ligando-se a átomos de níquel (KRAJEWSKA, 2009). Estudos

relatam que a ureia + NBPT reduz de 30 a 70% das perdas de N por volatilização de amônia em relação à ureia convencional, quando aplicadas no cafeeiro (DOMINGHETTI, 2016; FREITAS, 2017; SOUZA et al, 2018).

Em condições ideais, o NBPT pode inibir a hidrólise da ureia por períodos de 7 a 14 dias dependendo dos atributos do solo, como pH, umidade inicial, temperatura, dentre outros (DAWAR et al., 2011; HENDRICKSON; DOUGLASS, 1993; SANZ-COBENA et al., 2008). No entanto, se as condições favorecerem a rápida hidrólise da ureia, como alta umidade e temperatura, a atividade do NBPT pode ter sua duração reduzida, tornando-se ineficaz para proteger a ureia da atividade da urease (DAWAR et al., 2011; ROBERTS, 2014; WHITEHURST; WHITEHURST, 2014). Esse fato pode ter acontecido no segundo ano, quando as adubações foram feitas em solo úmido, devido às precipitações que ocorreram logo antes delas, e não houve precipitações após as mesmas suficientes para incorporar o fertilizante no solo, o que pode ter reduzido o efeito do NBPT.

Com relação aos fertilizantes de liberação controlada, a Ureia Emax 43% apresentou maiores perdas por volatilização de N-NH₃ do que a Ureia Emax 41%. O mesmo foi verificado para os 'Blends' com esses fertilizantes. O Blend 2, composto por 60% de Ureia Emax 43%, teve perdas superiores ao Blend 1, constituído por 60% de Ureia Emax 41%. Como a Ureia Emax 41% possui grânulos com revestimento mais espesso em relação à Ureia Emax 43%, isso pode ter influenciado diretamente na redução das perdas de N-NH₃, por permitir a liberação do N dos grânulos de forma mais gradual por período mais longo (CHAGAS et al., 2016; TIMILSENA et al., 2014). Desse modo, uma concentração menor de ureia é hidrolisada de uma só vez, reduzindo o acúmulo de N-NH₄⁺ no solo e diminuindo, conseqüentemente, o risco de formação de N-NH₃ (PENG et al., 2015).

Todavia, os quatro tratamentos diminuíram as perdas por volatilização quando comparados à Ureia convencional. A Ureia Emax 41% mostrou a maior redução, sendo de 68,4% no primeiro ano e 60,5% no segundo ano, equivalente à média de 63,7%, seguida pelo Blend 1 (NBPT + Ureia Emax 41%), cujos valores correspondentes foram de 42,5, 45,1 e 44,0%. A Ureia Emax 43% diminuiu em média 34,5%, sendo 17,3% no primeiro ano e 46,1% no segundo. Já o Blend 2 (NBPT + Ureia Emax 43%), reduziu apenas 6,9% das perdas com relação à Ureia convencional no primeiro ano, valor que subiu para 31,6% no segundo ano, correspondendo a média de 21,6%.

Outros estudos com fertilizantes nitrogenados no cafeeiro relataram que fertilizantes de liberação controlada podem reduzir de 71,6 a 73,3% das perdas por volatilização de N-NH₃ em

relação à ureia convencional (DOMINGHETTI et al., 2016; FREITAS, 2017), enquanto ‘blends’ de fertilizantes de liberação controlada e estabilizados podem reduzir de 27,8 a 81,3% (CHAGAS et al., 2016; FREITAS, 2017).

3.3 Produtividade

A produtividade do cafeeiro variou significativamente ($p \leq 0,05$) entre os fertilizantes nitrogenados avaliados nos dois anos do experimento e na média dos dois anos (TABELA 6).

Tabela 6 – Produtividade do cafeeiro (sacas 60 kg ha⁻¹) obtida após aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados no primeiro ano do experimento, no segundo ano e a média dos dois anos.

Fertilizante	Produtividade (sacas ha ⁻¹)		
	2018	2019	Média
Ureia convencional ⁽¹⁾	61,3 a	13,0 c	37,1 a
Ureia + NBPT ⁽¹⁾	54,0 b	15,3 b	34,7 b
Ureia Emax 41% ⁽²⁾	58,6 a	14,8 b	36,7 a
Ureia Emax 43% ⁽²⁾	61,5 a	15,1 b	38,3 a
Blend 1 (NBPT + Emax 41%) ⁽²⁾	55,0 b	22,6 a	38,7 a
Blend 2 (NBPT + Emax 43%) ⁽²⁾	59,8 a	17,4 b	38,6 a
Testemunha	50,7 c	10,6 c	30,6 c

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. (1) Foram parcelados em 3 aplicações de 100 kg ha⁻¹ de N cada. (2) Foram aplicados em dose única de 300 kg ha⁻¹ de N.

Fonte: Da autora (2020).

Na safra do primeiro ano (2017/2018), as maiores produtividades foram verificadas nos tratamentos Ureia convencional (61,3 sacas ha⁻¹), Blend 2 (59,8 sacas ha⁻¹) e Ureia Emax 41% (58,6 sacas ha⁻¹), seguidas pelo Blend 1 (55,0 sacas ha⁻¹) e pela Ureia + NBPT (54,0 sacas ha⁻¹), sendo a menor média observada na Testemunha (50,7 sacas ha⁻¹) (TABELA 6).

No segundo ano, as médias de produtividade seguiram a seguinte ordem decrescente: Blend 1 (22,6 sacas ha⁻¹) > Blend 2 (17,4 sacas ha⁻¹) = Ureia + NBPT (15,3 sacas ha⁻¹) = Ureia Emax 43% (15,1 sacas ha⁻¹) = Ureia Emax 41% (14,8 sacas ha⁻¹) > Ureia convencional (13,0 sacas ha⁻¹) = Testemunha (10,6 sacas ha⁻¹) (TABELA 6).

Com relação à média dos dois anos, os tratamentos com maiores produtividades foram Ureia convencional (37,1 sacas ha⁻¹), Ureia Emax 41% (36,7 sacas ha⁻¹), Ureia Emax 43% (38,3 sacas ha⁻¹), Blend 1 (38,8 sacas ha⁻¹) e Blend 2 (38,6 sacas ha⁻¹). A Ureia + NBPT proporcionou a menor produtividade (34,7 sacas ha⁻¹) em relação aos demais fertilizantes, sendo apenas superior à Testemunha, que teve a menor produtividade (30,6 sacas ha⁻¹) (TABELA 6).

O ciclo fenológico da espécie *Coffea arabica* L. é bienal, ou seja, demora dois anos para completar um ciclo de fases vegetativa e reprodutiva (CAMARGO; CAMARGO, 2001). Sendo assim, o cafeeiro precisa vegetar em um ano para produzir no ano seguinte (RENA; MAESTRI, 1985). Todavia, dois ciclos fenológicos se combinam num mesmo ano, ou seja, o processo de produção do ano corrente ocorre simultaneamente à fase de vegetação que proporcionará a produção do ano seguinte, fazendo com que a planta tenha que balancear a partição de fotoassimilados entre as duas fases.

Desse modo, nos anos de alta carga pendente, a planta direciona a produção de fotoassimilados prioritariamente para a formação e crescimento dos frutos, enquanto nos anos de baixa carga pendente, esses são direcionados à formação de novas gemas vegetativas que originarão novos ramos. Consequentemente, a alta produtividade de um ano gera redução do crescimento vegetativo, por causa do direcionamento das reservas metabólicas para a produção de frutos, provocando menor crescimento e redução da emissão de novos ramos (PICINI, 1998).

Por isso, houve essa discrepância de produtividade entre os dois anos (primeiro ano de carga alta e segundo ano de carga baixa), além de ocorrer alternância entre a ordem de produtividade quando se observou as médias de cada ano. Em vista disso, é comum avaliar a produtividade do cafeeiro com base na média de dois anos.

Observando as médias de produtividade de dois anos dos tratamentos, verificou-se que os fertilizantes foram superiores à Testemunha (sem adubação nitrogenada). No entanto, a Ureia + NBPT teve menor produtividade em relação aos demais fertilizantes, que não diferiram entre si. Sendo assim, por mais que se tenha verificado perdas por volatilização significativas para alguns fertilizantes (TABELA 5). Esse fato parece não ter influenciado na produtividade dos tratamentos (TABELA 6). Estudos demonstraram que a volatilização da ureia aplicada em superfície e de outros fertilizantes menos sujeitos a perdas de amônia não interfere na produtividade do cafeeiro (BARTELEGA, 2018; CHAGAS et al., 2016; DOMINGHETTI, 2016; LIMA et al., 2016; RODRIGUES et al., 2016; SOUZA, 2012).

Essa não interferência das perdas por volatilização na produtividade pode estar relacionada ao fato de que parte desse N volatilizado pode ser recuperado pela planta. Fenilli et al. (2007) verificaram que dos 70 kg ha⁻¹ de ureia aplicados no cafeeiro, em condições que favoreciam a volatilização (elevado pH e alta concentração de N), 58,0 kg ha⁻¹ foram volatilizados, representando perda de 82,9 % do total aplicado. Porém, 43,3% (25,0 kg ha⁻¹) do N perdido foram reabsorvidos pela planta, evidenciando que as perdas por volatilização podem ser, em grande parte, revertidas por esse processo.

Entretanto, a justificativa mais plausível para as perdas por N-NH₃ não influenciarem a produtividade é devido a maior parte do N absorvido pela planta ser proveniente do solo e não do fertilizante (BRUNO et al., 2015; CANNAVO et al., 2013). Alguns estudos com taxa de recuperação de N do fertilizante no cafeeiro, usando isótopo ¹⁵N como traçador, mostraram que essa recuperação varia de 28,6 a 78,6% do total aplicado (BORTOLOTTI, 2010; FENILLI et al., 2008; PEDROSA, 2013; SALAMANCA-JIMENEZ; DOANE; HORWATH, 2017).

Portanto, apenas parte do N aplicado é direcionada para produção e vegetação da planta. O restante fica imobilizado na matéria orgânica do solo, podendo ser disponibilizado para as próximas safras ou culturas, ou sofre perdas por diversos mecanismos, como volatilização, desnitrificação e lixiviação (REICHARDT et al., 2009). Sendo assim, deve-se atentar para que o uso de fertilizantes sujeitos a perdas significativas por volatilização não resulte na utilização indesejável do estoque de N e da M.O. do solo, comprometendo a produtividade e a fertilidade do solo a médio e longo prazo (DOBERMANN, 2007; FAVARIN; TEZOTTO; NETO, 2013). Visto isso, é necessário obter dados de produtividade de várias safras, de modo a ter médias mais seguras, que representem, de fato, as respostas aos fertilizantes em longo prazo.

3.4 Índices de eficiência da adubação nitrogenada

Na Tabela 7 encontram-se dados referentes aos índices de eficiência da adubação nitrogenada. A eficiência de uso do N (EUN) diz respeito à quantidade de café produzida por cada quilo de N aplicado no solo (CANTARELLA, MONTEZANO, 2010), enquanto a eficiência de uso do N não volatilizado (EUN_{NV}) indica quantos quilos de café são produzidos por quilo de N que não sofreu perdas por volatilização (FREITAS, 2017).

Tabela 7 – Índices de eficiência de uso do N (EUN) e de eficiência de uso do N não volatilizado (EUN_{NV}) obtidos após aplicação dos fertilizantes nitrogenados no cafeeiro.

Fertilizantes	Índices de eficiência	
	EUN (kg café.kg N ⁻¹) ⁽³⁾	EUN_{NV} (kg café.kg N _{NV} ⁻¹) ⁽⁴⁾
Ureia convencional ⁽¹⁾	7,43 a	10,01 a
Ureia + NBPT ⁽¹⁾	6,93 b	8,52 c
Ureia Emax 41% ⁽²⁾	7,34 a	8,10 c
Ureia Emax 43% ⁽²⁾	7,66 a	9,21 b
Blend 1 (NBPT + Emax 41%) ⁽²⁾	7,75 a	9,06 b
Blend 2 (NBPT + Emax 43%) ⁽²⁾	7,72 a	9,68 a

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas colunas não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. (1) Foram parcelados em 3 aplicações de 100 kg ha⁻¹ de N cada. (2) Foram aplicados em dose única de 300 kg ha⁻¹ de N. (3) EUN = kg de café/kg de N aplicado. (4) EUN_{NV} = kg de café. (kg de N aplicado - kg N volatilizado)⁻¹.

Fonte: Da autora (2020).

Com relação à EUN, a Ureia + NBPT apresentou a menor média com relação às demais, que não diferiram entre si. Já para a EUN_{NV} , os maiores valores foram obtidos pela Ureia convencional e pelo Blend 2 e os menores pela Ureia + NBPT e pela Ureia Emax 41%.

Os maiores índices de EUN_{NV} desses fertilizantes estão relacionados à maior volatilização de amônia deles. Porém, como parte do N volatilizado pode ser reaproveitado pela planta (FENILLI et al., 2007), os resultados referentes a esse índice podem ser mascarados e superestimados. Por outro lado, a Ureia + NBPT, mesmo apresentando valores altos de perdas por volatilização de amônia, ainda obteve menor EUN_{NV} , além de ter menor EUN, mostrando que esse tratamento apresentou baixo aproveitamento de N pela planta.

Freitas (2017), avaliando diferentes fertilizantes nitrogenados aplicados no cafeeiro, obteve valores de EUN_{NV} entre 6,69 e 10,09 kg de café por kg de N não volatilizado, sendo as maiores médias observadas nos tratamentos Ureia + S⁰ + polímeros ('blend' de fertilizantes de liberação controlada e estabilizado) (10,09 kg café kg N_{NV}⁻¹), Ureia convencional (9,69 kg café kg N_{NV}⁻¹), Ureia + NBPT (9,93 kg café kg N_{NV}⁻¹) e Ureia + polímeros aniônicos (fertilizante estabilizado) (11,11 kg café kg N_{NV}⁻¹), porém os três últimos apresentaram as maiores perdas por volatilização, o que pode ter superestimado o resultado.

É válido ressaltar que, baseando em estudos realizados em cafeeiros, a maior parte do N absorvido pela planta é proveniente do solo e não do fertilizante (BRUNO et al., 2015; CANNAVO et al., 2013). Além disso, quando o fertilizante nitrogenado é aplicado no solo, parte do N é recuperado pelo sistema radicular e parte aérea, uma porção permanece no solo, outra pode ser imobilizada pelos microrganismos do solo e uma fração se perde do sistema solo-

planta por lixiviação, desnitrificação ou volatilização (FENILLI et al, 2007; REICHARDT et al., 2009). Desses processos, somente as perdas por volatilização foram quantificadas.

4 CONCLUSÃO

Os fertilizantes de liberação controlada, Ureia Emax 41% e Ureia Emax 43%, e seus ‘blends’ com ureia com inibidor da urease, possibilitam realizar a adubação nitrogenada do cafeeiro em única dose, disponibilizando o N de forma gradual para as plantas, sem afetar a produtividade e reduzindo as perdas por volatilização quando comparados à ureia convencional.

A Ureia convencional é o fertilizante que promove as maiores perdas de nitrogênio por volatilização. Não há relação entre as maiores perdas por volatilização com a produtividade.

A Ureia + NBPT proporciona menor produtividade em relação aos demais fertilizantes e apresenta menores índices de eficiência de uso do nitrogênio e de eficiência de uso do nitrogênio não volatilizado.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, C.; FRANTZ, J.; BUGBEE, B. Macro- and micronutrient-release characteristics of three polymer-coated fertilizers: Theory and measurements. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 176, n. 1, p. 76-88, Feb. 2013.
- ALVES, A. C. **Métodos para quantificar a volatilização de N-NH₃ em solo fertilizado com ureia**. 2006. 40 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade de São Paulo, Pirassununga, São Paulo, SP, 2006.
- BARTELEGA, L. **Fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta, controlada e blends para o cafeeiro**. 2018. 68 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.
- BLACK, A. S.; SHERLOCK, R. R.; SMITH, N. P. Effect of timing of simulated rainfall on ammonia volatilization from urea, applied to soil of varying moisture content. **European Journal of Soil Science**, Chincester, v. 38, n. 4, p. 679-687, Dec. 1987.
- BORTOLOTTO, R. P. **Perdas de nitrogênio por lixiviação em café fertirrigado no oeste baiano**. 2011. 105 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- BRUNO, I. P. et al. Nitrogen balance and fertigation use efficiency in a field coffee crop. **Journal of plant nutrition**, Philadelphia, v. 38, n. 13, p. 2055-2076, nov. 2015.
- CABEZAS, W. A. R.; TRIVELIN, P. C. O. Eficiência de um coletor semi aberto estático na quantificação de N-NH₃ volatilizado da uréia aplicada ao solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 14, n. 3, p. 345-352, set./dez. 1990.
- CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, jan./abr. 2001.
- CANNAVO, P. et al. Low nitrogen use efficiency and high nitrate leaching in a highly fertilized *Coffea arabica*-*Inga densiflora* agroforestry system: a 15 N labeled fertilizer study. **Nutrient cycling in agroecosystems**, Dordrecht, v. 95, n. 3, p. 377-394, Apr. 2013.
- CANTARELLA, H. A. et al. Ammonia volatilization from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, n. 4, p. 397-401, July./Aug. 2008.
- CANTARELLA, H.; MONTEZANO, Z. F. Nitrogênio e enxofre. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes**: Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. V. 2. p. 15-65.
- CHAGAS, W. F. T. **Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta, controlada e Blends aplicados no cafeeiro**. 2018. 139 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

CHAGAS, W. F. T. et al. Ammonia volatilization from blends with stabilized and controlled-released urea in the coffee system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 5, p. 497-509, Sept./Oct. 2016.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de café: Primeiro levantamento Safra 2020**, Brasília: CONAB, 2020, 62 p. V. 6. N.1. Disponível em:

<https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/30380_d1e1f36c2356b81e8a385cd24f05993b>. Acesso em: 17 mar. 2020.

_____. **Custo de produção, índices, insumos e receita bruta: insumos: fertilizantes entregues**. Brasília: CONAB, 2017. Disponível em:

<<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1536&t=2>>. Acesso em: 8 fev. 2017.

COSTA, A. C. S. et al. Perdas de nitrogênio por volatilização da amônia em três solos argilosos tratados com uréia. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 4, p. 467-473, out. 2008.

COSTA, M. C. G.; VITTI, G. C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH₃ de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 4, p. 631-637, jul./ago. 2003.

DAWAR, K. et al. Urea hydrolysis and lateral and vertical movement in the soil: effects of urease inhibitor and irrigation. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 47, n. 2, p. 139-146, Feb. 2011.

DOBERMANN, A. Nutrient use efficiency: measurement and management. In: International Fertilizer Industry Association. **Fertilizer best management practices**. Paris: IFA, 2007. p. 1-28.

DOMINGHETTI, A. W. **Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e convencionais na cultura do cafeeiro**. 2016. 144 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

DOMINGHETTI, A. W. et al. Nitrogen loss by volatilization of nitrogen fertilizers applied to coffee orchard. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 2, p. 173-183, Mar./Apr. 2016.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

FAO. Food and Agriculture Organization of The United Nations. **Global Perspectives Studies - Food and agriculture projections to 2050**. 2018. Disponível em:

<<http://www.fao.org/global-perspectives-studies/food-agriculture-projections-to-2050/en/>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

_____. **The future of food and agriculture – Trends and challenges**. Rome, 2017. 163 p. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

FAVARIN, J. L.; TEZOTTO, T.; NETO, A. P. **Balço nutricional em café: estudo de caso. Visão Agrícola**, Piracicaba, n. 12, p. 79-81, jan./jul. 2013.

FENILLI, T. A. B. et al. Fertilizer 15N balance in a coffee cropping system: a case study in Brazil. In: **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1459-1469, July./Aug. 2008.

_____. Volatilization of ammonia derived from fertilizer and its reabsorption by coffee plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v. 38, n. 13/14, p. 1741-1751, July. 2007.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, Nov./Dec. 2011.

FREITAS, T. **Fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta ou controlada na cultura do cafeeiro: eficiência e custos**. 2017. 96 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

FULLIN, E. A. et al. Adubos e Eficiência das Adubações. In: PREZOTTI, L. C. et al. **Manual de Recomendação de Calagem e Adubação para o Estado do Espírito Santo: 5ª Aproximação**. Vitória, ES: SEEA/INCAPER/CEDAGRO, 2007. p. 49-80.

GUELFY, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. **Informações Agrônomicas**, Belo Horizonte, n. 157, p. 1-14, mar. 2017.

GUERREIRO FILHO, O. et al. Café Arábica. In: AGUIAR, A. T. E. et al. (Ed.). **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas: boletim 200**. Campinas: Instituto Agrônomico, 2014. p. 90-104.

GUIMARÃES, P. T. G. et al. Cafeeiro. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVARES, V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: UFV, 1999. p. 289-302.

HENDRICKSON, L. L.; DOUGLASS, E. A. Metabolism of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 25, n. 11, p. 1613-1618, Nov. 1993.

ICL. **A Revolução em Fertilizantes de Liberação Gradual**. São Paulo: ICL, 2019. 8p. Disponível em: <<https://icl-sf.com/br-pt/pastas-download/>>. Acesso em: 30 mar. 2020.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18644:2016 (en)** Fertilizers and soil conditioners — Controlled-release fertilizer — General requirements. Geneva, 2016.

_____. **ISO 21263:2017(en)**: Slow-release fertilizers — Determination of the release of the nutrients — Method for coated fertilizers. Geneva, 2017.

KE, J. et al. Effects of different controlled-release nitrogen fertilizers on ammonia volatilization, nitrogen use efficiency and yield of blanket-seedling machine-transplanted rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 205, p. 147-156, Apr. 2017.

- KISSEL, D. E. et al. Rainfall timing and ammonia loss from urea in a loblolly pine plantation. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 68, n. 5, p. 1744-1750, Sept. 2004.
- KJELDAHL, J. G. C. T. Neue methode zur bestimmung des stickstoffs in organischen körpern. **Fresenius' Journal of Analytical Chemistry**, Berlin, v. 22, n. 1, p. 366-382, 1883.
- KRAJEWSKA, B. Ureases I. functional, catalytic and kinetic properties: a review. **Journal of Molecular Catalysis**, Amsterdam, v. 59, n. 1/3, p. 9-21, July. 2009.
- LIMA, L. C. et al. Crescimento e produtividade do cafeeiro irrigado, em função de diferentes fontes de nitrogênio. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 97-107, jan./mar. 2016.
- MARTHA JÚNIOR, G. B et al. Perda de amônia por volatilização em pastagem de capim-tanzânia adubada com ureia no verão. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 33, n. 6, p. 2240-2247, dez. 2004.
- MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento . **Informe Estatístico do Café - 2009-2010**. Brasília: Ministério da Agricultura, 2016. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/agroestatisticas/cafe/informe-estatistico-do-cafe-2009-2010.xls/view>>. Acesso em: 18 mar. 2020.
- NÔMMIK, H. The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 39, n. 2, p. 309-318, Oct. 1973.
- PEDROSA, A. W. **Eficiência da adubação nitrogenada no consórcio entre cafeeiro**. 2013. 73 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2013.
- PENG, X. et al. Laboratory Evaluation of Ammonia Volatilization and Nitrate Leaching following Nitrogen Fertilizer Application on a Coarse-Textured Soil. **Agronomy Journal**, Madison, v.107, n. 3, p. 871-879, May. 2015.
- PICINI, A. G. **Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para estimativa de produtividade do cafeeiro (Coffea arabica L.) a partir do monitoramento da disponibilidade hídrica do solo**. 1998. 132 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 1998.
- PINTO, V. M. et al. Uso excessivo de nitrogênio gera perda monetária para cafeicultores do cerrado baiano. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 176-186, abr./jun. 2017.
- PRASERTSAK, P. et al. Fate of urea nitrogen applied to a banana crop in the wet tropics of Queensland. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 59, n. 1, p. 65-73, Jan. 2001.
- QUINTELA et al. Parâmetros produtivos e nutricionais do cafeeiro submetido adubação nitrogenada na região de Garanhuns. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 4, p. 74-79, out./dez, 2011.
- REICHARDT, K. et al. Relação entre a adubação nitrogenada e as condições hídricas do solo para um cafezal de piracicaba, SP. **Coffee Science**, Lavras, v. 4, n. 1, p. 41-55, jan./mar. 2009.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Fisiologia do cafeeiro. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 11, n. 126, p. 26-40, 1985.

ROBERTS, J. R. **Stabilized N-Alkyl thiophosphoric triamide solvent systems for use in nitrogen fertilizer**. US Pat.2014/0060132 A1. Aug. 29, 2013, Mar. 6, 2014.

RODRIGUES, J. O. et al. Volatilização de amônia de ureias protegidas na cultura do cafeeiro Conilon. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 4, p. 530-537, out./dez. 2016.

ROJAS, C. A. L. et al. Volatilização de amônia da ureia alterada por sistemas de preparo de solo e plantas de cobertura invernais no Centro-Sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 36, n. 1, p. 261-270, jan./fev. 2012.

SÁ JÚNIOR, A. de et al. Application of the Koppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 108, n. 1, p. 1-7, Jan./Apr. 2012.

SALAMANCA-JIMENEZ, A.; DOANE, T. A.; HORWATH, W. R. Nitrogen use efficiency of coffee at the vegetative stage as influenced by fertilizer application method. **Frontiers in plant science**, Lausanne, v. 8, article 223, p. 1-11, Mar. 2017.

SANZ-COBENA, A. et al. An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 126, n. 3/4, p. 243-249, July. 2008.

SHAVIV, A. Advances in controlled-release fertilizers. **Advances in agronomy**, San Diego, v. 71, n. 1, p. 1-49, 2000.

SOUZA, J. A. **Lixiviação de nitrato e volatilização de amônia em um Latossolo cultivado com café sob diferentes fontes de nitrogênio**. 2012. 85 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2012.

SOUZA, J. A. et al. Nitrogen dynamics in a Latosol cultivated with coffee. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 6, p. 390-395, June. 2018.

SYSTAT SOFTWARE. **SigmaPlot for Windows Version 14.0**, Build 14.0.0.124. San Jose: Systat Software Inc., 2017.

TIMILSENA, Y. P. et al. Enhanced efficiency fertilizers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 95, n. 6, p. 1131-1142, Apr. 2014.

TRENKEL, M. **Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient efficiency in agriculture**. 2nd ed. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010. 163 p.

WHITEHURST, G. B.; WHITEHURST, B. H. **NBPT solution for preparing urease inhibited urea fertilizers prepared from N-ALKYL; N,N-ALKYL; AND N-ALKYL-N-ALKYLOXY amino alcohols**. US Pat. 2010/0037570 A1. A1, Aug. 2, 2012, Feb. 6, 2014.

ARTIGO 2 - Eficiência agrônômica de fertilizantes nitrogenados de liberação controlada e seus “blends” com ureia tratada com inibidor de urease aplicados em diferentes doses no cafeeiro

RESUMO

Diante da necessidade de encontrar a fonte e dose ideal de nitrogênio para o cafeeiro, capaz de proporcionar boas produtividades sem prejudicar a fertilidade do solo, objetivou-se avaliar a influência da adubação com fertilizantes nitrogenados convencional, estabilizado, de liberação controlada e ‘blends’, aplicados em diferentes doses, no estoque de N do solo, na produtividade do cafeeiro e na eficiência de uso do N. O experimento foi realizado em fazenda em Carmo da Cachoeira-MG, Brasil, entre 09/11/2017 e 30/06/2019, com a cultivar Mundo Novo IAC-379/19 (*Coffea arabica* L.) em espaçamento de 3,85x0,85m. Adotou-se delineamento em blocos casualizados, com três repetições. Os tratamentos foram compostos por quatro fertilizantes nitrogenados comerciais: Ureia convencional, Ureia + NBPT (fertilizante estabilizado), Ureia Emax 41% (liberação controlada) e Ureia Emax 43% (liberação controlada), e dois ‘blends’: Blend 1 (40% Ureia NBPT + 60% Ureia Emax 41%) e Blend 2 (40% Ureia NBPT + 60% Ureia Emax 43%), aplicados em quatro doses (0, 150, 300 e 450 kg de N ha⁻¹), constituindo fatorial 6x4, totalizando 24 tratamentos. A adubação dos cafeeiros dos tratamentos Ureia convencional e Ureia + NBPT foi parcelada em três vezes, enquanto os demais foram aplicados em dose única, na primeira adubação desses. Avaliou-se: teores e estoques de N_{TOTAL}, N_{MINERAL}, N-NO₃⁻ e N-NH₄⁺ do solo, produtividade do cafeeiro e índices de eficiência em duas safras. Os teores e estoques de N_{TOTAL}, N_{MINERAL}, N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ reduziram nos tratamentos com dose 0 para o primeiro e com doses 0 e 150 para os demais, em uma ou mais camadas do solo, quando comparados aos valores obtidos antes do início do experimento. Eles foram maiores na camada de 0-5cm e diminuíram até 40-60cm, e, no geral, aumentaram com o incremento da dose de N aplicada. A produtividade aumentou com a dose de N, mas nas doses 300 e 450 não diferiram estatisticamente (36,7-41,0 sacas ha⁻¹), sendo superior às demais, com exceção à Ureia + NBPT, em que foi inferior na dose 300. A testemunha e a Ureia + NBPT e Blend 2 na dose 150 proporcionaram as menores produtividades (30,6-32,5 sacas ha⁻¹), seguidas pela Ureia convencional, Ureia Emax 41%, Ureia Emax 43% e Blend 1 na dose 150 e Ureia + NBPT na dose 300 (33,6-35,0 sacas ha⁻¹). A Ureia + NBPT proporcionou os menores índices de eficiência (IEAR, EA, EUN). Os teores e estoques de N_{TOTAL}, N_{MINERAL}, N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ aumentam com o aumento da dose de N aplicada, mas o fornecimento insuficiente de N causa redução dos mesmos. A produtividade do cafeeiro aumenta linearmente com o aumento da dose de N. Mas, a redução da dose de 450 para 300 kg de N ha⁻¹ não prejudica a produtividade, além de não diminuir o estoque de N do solo. O uso de ‘blends’ e fertilizantes de liberação controlada possibilita realizar a adubação nitrogenada do cafeeiro em única dose sem afetar a produtividade. A Ureia + NBPT é o fertilizante com menor eficiência, proporciona a menor produtividade, além de estar entre os menores estoques de N_{MINERAL}.

Palavras-chave: Adubação nitrogenada. Estoque de N do solo. Produtividade. NBPT. *Coffea arabica*.

Agronomic efficiency of controlled release nitrogen fertilizers and their blends with urease inhibitor-treated urea at different rates in coffee tree

ABSTRACT

Considering the necessity of finding the ideal nitrogen source and dose for coffee plants, capable of providing good crop yield without affecting soil fertility, this paper aims to evaluate the influence of fertilization using nitrogen fertilizers with different technologies - conventional, stabilized, controlled-release and blends -, applied in different doses, on the soil N stocks, on coffee yield and on N use efficiency. The experiment was conducted on a farm in Carmo da Cachoeira, Minas Gerais, Brazil, between 11/09/2017 and 06/30/2019, with the Mundo Novo cultivar IAC-379/19 (*Coffea arabica* L.) with spacing of 3.85 m between rows and 0.85 m between plants. A randomized block design was adopted, with three replicates. The treatments consisted of four commercial nitrogen fertilizers: Conventional Urea, Urea + NBPT (stabilized fertilizer), Urea Emax 41% (controlled-release) and Urea Emax 43% (controlled-release) and two blends of stabilized and controlled-release fertilizers: Blend 1 (40% Urea NBPT + 60% Urea Emax 41%) and Blend 2 (40% Urea NBPT + 60% Urea Emax 43%), applied in four application rates (0, 150, 300 and 450 kg of N ha⁻¹), in a 6x4 factorial, totaling 24 treatments. The coffee plants fertilization in Conventional Urea and Urea + NBPT treatments was divided in three applications, while the others were applied in a single application, along with their first fertilization. The evaluated characteristics were: the soil N_{TOTAL}, N_{MINERAL}, N-NO₃⁻ and N-NH₄⁺ levels and stocks, crop yield and N efficiency indexes in two harvests. The levels and stocks of N_{TOTAL}, N_{MINERAL}, N-NH₄⁺ and N-NO₃⁻ reduced in treatments with a 0kg dose for the first one and with 0kg and 150kg doses for the others, in one or more soil layers, when compared to the values obtained before the beginning of the experiment. They were higher in the 0-5cm layer and decrease up the 40-60 cm layer, and, in general, increase with the increase of the applied N dose. Crop yield increased with the N dose, but in 300kg and 450kg doses there was no statistically significant differences (36.7-41.0 bags ha⁻¹), being higher than the others, except for Urea + NBPT, which was lower in a 300kg dose. The witness (0kg dose) and Urea + NBPT and Blend 2 in a 150kg dose provided the lowest crop yields (30.6-32.5 bags ha⁻¹), followed by Conventional Urea, Urea Emax 41%, Urea Emax 43% and Blend 1 in a 150 kg dose and Urea + NBPT in a 300 kg dose (33.6-35.0 bags ha⁻¹). Urea + NBPT provided the lowest efficiency rates (UREI, AE, NUE). The levels and stocks of N_{TOTAL}, N_{MINERAL}, N-NH₄⁺ and N-NO₃⁻ increase with the increase of the applied N dose, but the insufficient N supply causes their reduction. The coffee yield increases linearly with the increase of the applied N dose. But, the dose reduction from 450 to 300 kg of N ha⁻¹ does not affect the coffee yield, besides not reducing the soil N stock. The use of blends and controlled-release fertilizers makes it possible to carry out nitrogen fertilization of the coffee trees in a single application without affecting crop yield. Urea + NBPT is the fertilizer with the lowest efficiency index. It provides the lowest crop yield, besides being among the lowest N_{MINERAL} stocks.

Keywords: Nitrogen fertilization. Soil N stock. Crop yield. NBPT. *Coffea Arabica*.

1 INTRODUÇÃO

O cafeeiro é uma das culturas mais exigentes em nitrogênio (N) (MALAVOLTA, 1993; RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVARES, 1999). Para lavouras cafeeiras em produção, a recomendação desse nutriente é feita de acordo com a produtividade esperada, podendo variar de 50 a 450 kg ha⁻¹ (GUERREIRO FILHO et al., 2014; GUIMARÃES et al., 1999). Estima-se que o consumo médio de N para produção de uma saca de 60 kg de café beneficiado seja de 6,2 kg de N, dos quais 3,6 kg atendem à demanda para vegetação e 2,6 kg para a produção dos grãos, podendo variar em função de fatores edafoclimáticos de cultivo (MATIELLO et al., 2010).

É válido ressaltar, que, dentre todos os nutrientes, o N é o que mais sofre interações com o ambiente, em decorrência das diversas reações que ocorrem no solo, grande parte mediada por microrganismos, cuja atividade é afetada por temperatura, pH, umidade e outros fatores, estando sujeito a diversos tipos de perdas, como volatilização (NH₃), desnitrificação (N₂ e N₂O) e lixiviação (NO₃⁻) (CANTARELLA, 2007; CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

Por esse motivo, os fertilizantes nitrogenados tendem a ter baixa eficiência de aproveitamento pelas plantas (KE et al., 2017). Segundo Guimarães et al. (1999), as recomendações de N para as culturas, incluindo o cafeeiro, já são feitas considerando perdas em torno de 50% de N, ocasionadas pela ureia, por ser o fertilizante mais utilizado na agricultura. No entanto, o uso de maiores quantidades de fertilizantes para compensar essas perdas aumenta o custo de produção e a chance de ocorrer contaminação ambiental.

Por isso, ressalta-se a importância de aumentar a eficiência de uso do nitrogênio (EUN), de modo a tornar a cafeicultura mais sustentável e lucrativa, principalmente por causa da elevação dos custos de produção, incluindo os de fertilizantes, nos últimos anos (CONAB, 2020). Diante desse cenário, surgiram os fertilizantes de eficiência aumentada: estabilizados, de liberação lenta e de liberação controlada, com a proposta de diminuir as perdas de N para o ambiente e proporcionar, no caso do último, a liberação de N ajustada à demanda da cultura (AZEEM et al., 2014; TIMILSENA et al., 2014).

Entretanto, o fator mais limitante ao uso desses fertilizantes na agricultura é o custo mais elevado quando comparado aos fertilizantes nitrogenados convencionais (GUELFY, 2017). Uma alternativa para reduzir esse custo e ainda conseguir minimizar as perdas de N e fornecer esse nutriente de maneira mais sincronizada à necessidade da cultura, é a utilização de 'blends' -

mistura física de fertilizantes, como, por exemplo, de um fertilizante estabilizado e um de liberação controlada (GUELF, 2017; TRENKEL, 2010).

Outra alternativa seria a redução da dose de N recomendada para a cultura, utilizando esses fertilizantes de eficiência aumentada e seus 'blends'. Chagas et al. (2016) observaram que, com a utilização de um 'blend' de fertilizante estabilizado com um de liberação controlada, foi possível reduzir a dose recomendada para lavoura cafeeira adulta (450 kg.ha^{-1}) a 70% (315 kg.ha^{-1}) sem prejuízo na produtividade e nutrição do cafeeiro.

Porém, deve-se atentar para que essa redução de dose não cause a utilização indesejável do estoque de N e da matéria orgânica do solo, comprometendo a produtividade e a fertilidade do solo em médio e longo prazo (DOBERMANN, 2007; FAVARIN; TEZOTTO; NETO, 2013). Sendo assim, há a necessidade de encontrar, de acordo com cada realidade, a dose ideal de N para o cafeeiro, capaz de proporcionar produtividades com maior retorno econômico, aliadas a melhor EUN, sem reduzir os estoques de N e, conseqüentemente, sem prejudicar a fertilidade do solo.

Nesse contexto, objetivou-se avaliar a influência da adubação com doses variadas de fertilizantes nitrogenados com diferentes tecnologias, dentre eles: convencional, estabilizado, de liberação controlada e 'blends', no estoque de N do solo, na produtividade do cafeeiro e na eficiência do N.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em lavoura cafeeira de uma fazenda situada no município de Carmo da Cachoeira, Minas Gerais, Brasil, latitude $21^{\circ} 27' 34''$ Sul e longitude de $45^{\circ} 16' 11''$ Oeste, a altitude de 1050 metros, no período de outubro de 2017 a julho de 2019. O clima da região é classificado como Cwa, mesotérmico com verões brandos e suaves e estiagens de inverno (SÁ JUNIOR et al., 2012). O volume total de precipitação na área experimental, de 09/11/2017 a 30/06/2019, foi de 2.992,5mm, aferido com medidor pluviométrico instalado na área experimental.

O plantio da lavoura foi realizado em dezembro de 2013, com espaçamento de 3,85 m entre linhas por 0,85 m entre plantas, utilizando-se a cultivar Mundo Novo IAC 379/19 da espécie *Coffea arabica* L. O experimento foi implantado com delineamento em blocos

casualizados, com três repetições. As parcelas foram compostas por 10 plantas, sendo as 8 plantas centrais consideradas úteis para as avaliações. Os tratamentos foram distribuídos nas parcelas mediante sorteio.

A classificação do solo da área experimental é Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (EMBRAPA, 2018) de textura argilosa. As principais características físicas e químicas das camadas de 0 a 10, 10 a 20, 20 a 40 e 40 a 60 cm antes do início dos tratamentos estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização química e física do solo da área experimental antes da aplicação dos tratamentos no ano de 2017.

Característica	Unidade	Camadas do solo em profundidade (cm)			
		0 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60
pH	-	5,5	5,7	5,6	5,6
P	mg dm ⁻³	46,67	10,72	5,25	2,30
K	mg dm ⁻³	361,39	270,12	236,30	219,93
Ca ²⁺	cmol _c /dm ³	2,59	1,90	1,38	1,10
Mg ²⁺	cmol _c /dm ³	2,31	1,05	0,59	0,36
S	mg dm ⁻³	27,32	26,44	30,42	48,61
Cu	mg dm ⁻³	5,21	4,97	3,31	2,22
B	mg dm ⁻³	0,06	0,49	0,46	0,38
Zn	mg dm ⁻³	12,41	5,80	2,22	1,32
Fe	mg dm ⁻³	39,43	57,45	65,69	50,52
Mn	mg dm ⁻³	38,07	34,73	20,93	13,83
Al ³⁺	cmol _c /dm ³	0,04	0,09	0,08	0,08
(H+Al)	cmol _c /dm ³	3,95	3,54	3,70	3,00
Soma de bases (SB)	cmol _c /dm ³	5,83	3,64	2,57	2,02
CTC efetiva (t)	cmol _c /dm ³	5,87	3,73	2,65	2,10
CTC potencial (T)	cmol _c /dm ³	9,78	7,18	6,27	5,02
Saturação por alumínio (m)	%	0,68	2,41	3,01	3,81
Saturação por bases (V)	%	59,58	50,70	41,03	40,27
Matéria orgânica	dag kg ⁻¹	2,47	1,89	1,50	1,69
P-Remanescente	mg L ⁻¹	30,20	28,15	18,60	15,92
Areia	%	48	47	46	46
Silte	%	9	10	11	10
Argila	%	43	43	43	44

	Unidade	Camadas do solo em profundidade (cm)				
		0 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 40	40 - 60
Densidade do solo	kg dm ⁻³	1,20	1,29	1,26	1,20	1,19
N _{TOTAL}	g dm ⁻³	3,33	2,95	2,15	1,75	1,45
N _{MINERAL}	mg dm ⁻³	65,87	61,07	56,12	49,70	47,18
N-NH ₄ ⁺	mg dm ⁻³	27,61	27,09	25,44	22,32	21,16
N-NO ₃ ⁻	mg dm ⁻³	38,26	33,98	30,68	27,38	26,02

Nota: pH = KCl relação 1:2,5; P, K, Fe, Zn, Mn e Cu = Extrator Mehlich 1; Ca, Mg e Al = Extrator KCl (1 mol L⁻¹); S = Extrator fosfato monocálcico em ácido acético; H + Al = Extrator SMP; Matéria orgânica: oxidação com Na₂Cr₂O₇ 4N + H₂SO₄ 10N; B = Extrator água quente. Densidade do solo = método do anel volumétrico.

Fonte: Da autora (2020).

2.2 Condução do experimento

Todos os tratos culturais, com exceção da adubação nitrogenada, se mantiveram padronizados entre os tratamentos. A calagem e adubação de K, P e de micronutrientes foram feitas conforme manejo já realizado na fazenda, de acordo com a necessidade da área experimental, seguindo as recomendações de Guimarães et al. (1999).

O controle de pragas e doenças foi feito quando se observava, a partir de monitoramentos realizados frequentemente, que estas atingiam os níveis de controle, e, então, utilizavam-se produtos químicos registrados para a cultura. Houve ocorrência de ferrugem tardia sobre a lavoura logo antes da colheita do primeiro ano de condução do experimento, inviabilizando seu controle instantâneo devido ao período de carência dos fungicidas curativos. Por consequência desse atraso no controle da doença, a lavoura sofreu depauperamento excessivo. Para o manejo do mato, foi feito controle químico das plantas daninhas com herbicida à base de glyphosate ($2,5 \text{ L ha}^{-1}$) alternado com roçada mecânica com uso de roçadora.

2.3 Tratamentos

Os tratamentos foram compostos por quatro fertilizantes nitrogenados comerciais e dois ‘blends’ de fertilizantes estabilizado e de liberação controlada, aplicados em quatro doses (0, 150, 300 e $450 \text{ kg de N ha}^{-1}$), constituindo fatorial 6×4 , totalizando 24 tratamentos. Algumas das características dos fertilizantes e dos ‘blends’ utilizados estão descritas a seguir:

- a) Ureia convencional: fertilizante convencional com 45% de N;
- b) Ureia + NBPT: fertilizante estabilizado com 44% de N. O tratamento consiste em ureia tratada com 530 mg kg^{-1} de NBPT (N-(n-butil) tiofosfórico triamida), um inibidor da urease, de acordo com declaração da empresa fabricante;
- c) Ureia + Emax 41%: fertilizante de liberação controlada que contém 41% de N. Os grânulos de ureia são revestidos por polímeros de 5ª geração E-Max, insolúvel em água, porém permeável, que impede a dissolução imediata do adubo quando aplicado ao solo, fazendo com que os nutrientes sejam liberados gradualmente ao longo de 5 e 6 meses;
- d) Ureia + Emax 43%: fertilizante de liberação controlada que contém 43% de N.

Os grânulos de ureia são revestidos por polímeros de 5ª geração E-Max, insolúvel em água, porém permeável, que impede a dissolução imediata do adubo quando

aplicado ao solo, fazendo com que os nutrientes sejam liberados gradualmente ao longo de 3 a 4 meses;

- e) Blend 1: mistura física de dois fertilizantes, sendo 40% de Ureia + NBPT (estabilizado) e 60 % de Ureia Emax 41% (liberação controlada);
- f) Blend 2: mistura física de dois fertilizantes, sendo 40% de Ureia + NBPT (estabilizado) e 60 % de Ureia Emax 43% (liberação controlada).

A adubação dos tratamentos com Ureia convencional e Ureia + NBPT foi parcelada em três vezes, enquanto os demais foram aplicados em uma única adubação, junto a primeira adubação desses. As datas das adubações no primeiro ano foram: 10/11/2017, 08/12/2017 e 05/01/2018. Já no segundo ano, as adubações ocorreram nas datas: 11/11/2018, 09/12/2018 e 06/01/2019.

2.4 Características avaliadas

As características avaliadas foram: estoque de N_{TOTAL} do solo, estoque de $N_{MINERAL}$ (NO_3^- e NH_4^+) do solo, produtividade do cafeeiro e índices de eficiência da adubação nitrogenada.

2.4.1 Teor e estoque de N_{TOTAL} do solo

O N_{TOTAL} e o estoque de N_{TOTAL} foram avaliados nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 cm do solo, em duas avaliações, uma no início (07/10/2017 - TABELA 1) e outra ao término do experimento (29/06/2019). Na avaliação inicial, as amostragens foram feitas por bloco, uma vez que dentro de cada bloco o solo era homogêneo. Já para a avaliação final, essas foram realizadas em cada parcela, visando identificar as alterações do estoque de N_{TOTAL} provocadas pelos tratamentos.

Coletou-se três amostras de solo com auxílio de trado de caneca em cada profundidade de cada parcela. Essas três amostras foram misturadas formando uma amostra composta de cada profundidade de cada parcela, acondicionada em saco plástico e levada para laboratório para prosseguimento das análises.

O N_{TOTAL} foi determinado pelo método Kjeldahl, com algumas adaptações, dividido em três etapas: a) digestão da amostra com ácido sulfúrico, sulfato de potássio, sulfato de cobre e selênio, para converter o N orgânico em $N-NH_4^+$; b) destilação com NaOH para liberação de

NH₃; c) titulação da amônia recolhida na destilação com indicador de ácido bórico e ácido clorídrico (VALE, 1990).

Os teores de N_{TOTAL} foram calculados utilizando o método da massa equivalente (BAYER, 2003), tendo como referência as densidades do solo obtidas na área experimental nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 cm de profundidade pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997). Esse método foi escolhido para se evitar a superestimativa do acúmulo de N_{TOTAL} nos tratamentos com maior densidade. O teor de N_{TOTAL} em uma certa profundidade foi calculado utilizando-se a expressão:

$$\text{Teor de N}_{\text{TOTAL}} (\text{g dm}^{-3}) = N_t \times D_s$$

Em que:

N_t = teor de N_{TOTAL} (g kg⁻¹);

D_s = densidade do solo média da profundidade (kg dm⁻³).

O estoque de N_{TOTAL} do solo em certa profundidade foi calculado considerando a faixa da camada avaliada, utilizando-se a expressão:

$$\text{Estoque de N}_{\text{TOTAL}} (\text{Mg ha}^{-1}) = N_{\text{TOTAL}} \times \text{Faixa}$$

Em que:

N_{TOTAL} = teor de N_{TOTAL} (g dm⁻³);

Faixa = faixa de solo da camada avaliada (cm).

2.4.2 Teor e estoque de N_{MINERAL} do solo

Das amostras coletadas para análise de N_{TOTAL}, retirou-se 10 g de solo, colocando-os imediatamente em frasco de 250 mL, contendo 100 mL de KCl 1N, que foi levado para laboratório para análise do N_{MINERAL} (N-NO₃⁻ e N-NH₄⁺) nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 cm do solo.

A determinação de N_{AMÔNIO} (N-NH₄⁺) e N_{NITRATO} (N-NO₃⁻) foi realizada pelo método de destilação a vapor do extrato de KCl, baseado no método de Bremner e Keeney (1966), conforme indicado por Cantarella e Trivelin (2011). Os teores de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻, obtidos primeiramente em mg kg⁻¹, foram corrigidos para mg dm⁻³ utilizando o método da massa equivalente (BAYER, 2003), tendo como referência as densidades do solo que foram obtidas

na área experimental nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 cm de profundidade pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

Foram calculados os estoques de N-NH_4^+ e N-NO_3^- nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 cm de profundidade a partir dos seus respectivos teores no solo em mg dm^{-3} , multiplicado pela faixa da camada de solo avaliada (cm). Os teores e estoques de $\text{N}_{\text{MINERAL}}$ foram obtidos por meio da soma dos teores e estoques de N-NH_4^+ e N-NO_3^- , respectivamente.

2.4.3 Produtividade do cafeeiro

A produtividade de cada tratamento nos dois anos do experimento foi obtida a partir da colheita dos frutos das plantas na área útil (8 plantas centrais) de cada parcela, sobre panos apropriados, sendo obtido o valor em litros da produção da mesma. Do material colhido em cada parcela, foi retirada amostra de quatro litros para cálculo do rendimento, armazenada em sacos confeccionados de tela de polietileno com malha de 1,5 mm, de modo que os grãos ficassem arejados e bem espalhados para serem secados ao sol, sendo revolvidos algumas vezes ao dia, até atingirem umidade próxima a 11%.

As amostras, então, foram beneficiadas em descascador de amostras de café, e, em seguida, foram pesadas e tiveram suas umidades aferidas, para padronizar o peso a umidade de 11%.

A partir dos valores do volume inicial das amostras recém-colhidas na parcela, do peso da amostra beneficiada a 11% de umidade, do número de plantas colhidas, de plantas por hectare e do peso da saca de café (60 kg), calculou-se a produtividade, de acordo com a Equação 1:

$$\text{Produtividade (sacas ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Vt} * \text{Pf} * \text{Nph}}{\text{Am} * \text{Npp} * \text{P}} \quad (1)$$

Em que:

Vt = Volume total colhido na parcela (L)

Pf = Peso final de café beneficiado, a 11% de umidade (kg)

Nph = nº plantas por hectare = 3056

Am = Volume da amostra de café colhido (L) = 4 L

Npp = nº plantas por parcela = 8

P = peso da saca de café (kg) = 60 kg

2.4.4 Índices de eficiência da adubação nitrogenada

Após a obtenção da média de dois anos dos dados de produtividade do cafeeiro (sacas ha⁻¹), foram calculados os seguintes índices de eficiência da adubação nitrogenada:

a) Índice de Eficiência Agronômica Relativa (IEAR) (adaptado de Ladha et al. (2005))

$$\text{IEAR (\%)} = \frac{[(\text{Produtividade Fertilizante}^*) - (\text{Produtividade Testemunha})] \times 100}{(\text{Produtividade Ureia Convencional}^*) - (\text{Produtividade Testemunha})}$$

* = Produtividade do fertilizante e da Ureia convencional na mesma dose avaliada.

b) Eficiência Agronômica do N Aplicado (EA) (adaptado de Ladha et al. (2005))

$$\text{EA (kg café kg N}^{-1}\text{)} = \frac{[(\text{Produtividade Fertilizante}) - (\text{Produtividade Testemunha})] \times 60}{\text{Dose de nitrogênio (kg)}}$$

c) Eficiência de Uso do N (EUN) (CANTARELLA, MONTEZANO, 2010)

$$\text{EUN (kg café kg N}^{-1}\text{)} = \frac{\text{Produtividade Fertilizante} \times 60}{\text{Dose de nitrogênio (kg)}}$$

2.5 Análises estatísticas dos dados

Os dados de cada característica avaliada foram submetidos à análise de variância pelo teste F, e, ocorrendo diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade, os dados foram submetidos ao teste de médias de Scott-Knott para comparação entre as médias e análise de regressão para as doses avaliadas. Para os teores e estoques de N, considerou-se fatorial triplo, entre fertilizantes, doses e profundidades (6x4x5). Para a produtividade, a análise foi feita em fatorial duplo, entre fertilizantes e doses (6x4). Já para os índices de eficiência, não foi considerada a dose 0, portanto as análises foram realizadas considerando fatorial duplo entre seis fertilizantes e três doses (6x3). Todas as análises foram realizadas pelo software Sisvar (FERREIRA, 2011).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Teor e estoque de N_{TOTAL} do solo

O N_{TOTAL} da adubação nitrogenada realizada com cada fertilizante teve o mesmo comportamento em todas as profundidades e em todas as doses, assim como o N_{TOTAL} de cada dose se comportou da mesma maneira em todas as profundidades, uma vez que não houve interação significativa entre eles.

As médias do teor de N_{TOTAL} e estoque de N_{TOTAL} da faixa de 0-60 cm do solo foram iguais entre os fertilizantes Ureia convencional, Ureia + NBPT, Ureia Emax 41%, Ureia Emax 43% e Blend 2, com médias entre 2,68 e 2,76 g dm⁻³ e 16,08 e 16,56 Mg ha⁻¹, que foram maiores do que o N_{TOTAL} e o estoque de N_{TOTAL} obtido pela adubação com o Blend 1 (2,60 g dm⁻³ e 15,60 Mg ha⁻¹) (TABELA 2).

Tabela 2 – Teor de nitrogênio total (g dm⁻³) e estoque de nitrogênio total do solo (Mg ha⁻¹), até 60 cm de profundidade, após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. ⁽¹⁾

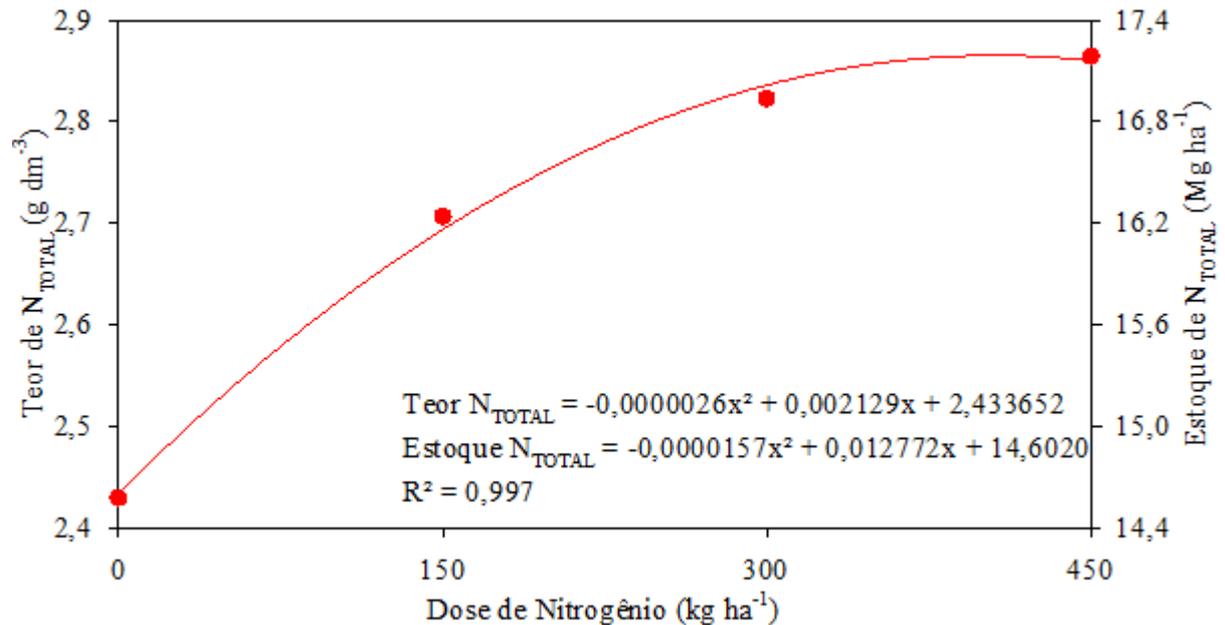
Fertilizantes	Teor N_{TOTAL} (g dm ⁻³)	Estoque N_{TOTAL} (Mg ha ⁻¹) ⁽²⁾
Ureia convencional	2,73 a	16,38 a
Ureia + NBPT	2,70 a	16,20 a
Ureia Emax 41%	2,76 a	16,56 a
Ureia Emax 43%	2,76 a	16,56 a
Blend 1 (NBPT + Emax 41)	2,60 b	15,60 b
Blend 2 (NBPT + Emax 43)	2,68 a	16,08 a

Nota: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. (1) Coleta realizada ao final do experimento, após dois anos de condução, em junho de 2019. (2) Estoque de N_{TOTAL} da faixa de 0-60 cm de profundidade do solo.

Fonte: Da autora (2020).

Todos os fertilizantes e profundidades mostraram comportamento quadrático para o teor de N_{TOTAL} . Para a média de todos os fertilizantes e profundidades, o maior valor do teor de N_{TOTAL} foi 2,87 g dm⁻³ e do estoque de N_{TOTAL} na faixa de 60 cm foi de 17,2 Mg ha⁻¹, obtidos na dose de 406 kg N ha⁻¹ (FIGURA 1).

Figura 1 – Teor de nitrogênio total (g dm^{-3}) e estoque de nitrogênio total (Mg ha^{-1}) das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, em junho de 2019, obtido após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.



Nota: x = dose de nitrogênio aplicada.

Fonte: Da autora (2020).

Para todos os fertilizantes nitrogenados e doses de N havia quantidade maior de N_{TOTAL} na camada mais superficial do solo (0-5 cm) de $3,52 \text{ g dm}^{-3}$, que foi diminuindo com a profundidade do solo, até atingir menor valor na camada de 40-60 cm ($2,07 \text{ g dm}^{-3}$) (TABELA 3), assim como nos trabalhos de Coser et al. (2007), D'Andrea et al. (2004) e Peacock et al. (2001).

Tabela 3 – Teor de nitrogênio total (g dm^{-3}) e estoque de nitrogênio total (Mg ha^{-1}) das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, após adubação nitrogenada no cafeeiro. ⁽¹⁾

Profundidades	N_{TOTAL}	Estoque de N_{TOTAL}
	g dm^{-3}	$\text{Mg ha}^{-1(2)}$
0-5 cm	3,52 a	1,76
5-10 cm	3,07 b	1,53
10-20 cm	2,62 c	2,62
20-40 cm	2,25 d	4,50
40-60 cm	2,07 e	4,14

Nota: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. (1) Coleta realizada ao final do experimento, após dois anos de aplicação dos tratamentos, em junho de 2019. (2) Área correspondente à camada avaliada, 0-5 e 5-10 cm = 5 cm, 10-20 cm = 10 cm, 20-40 e 40-60 cm = 20 cm.

Fonte: Da autora (2020).

Extrapolando as médias de N_{TOTAL} obtidas em g dm^{-3} para megagrama por hectare (Mg ha^{-1}), o mesmo que toneladas por hectare, considerando a espessura da faixa avaliada,

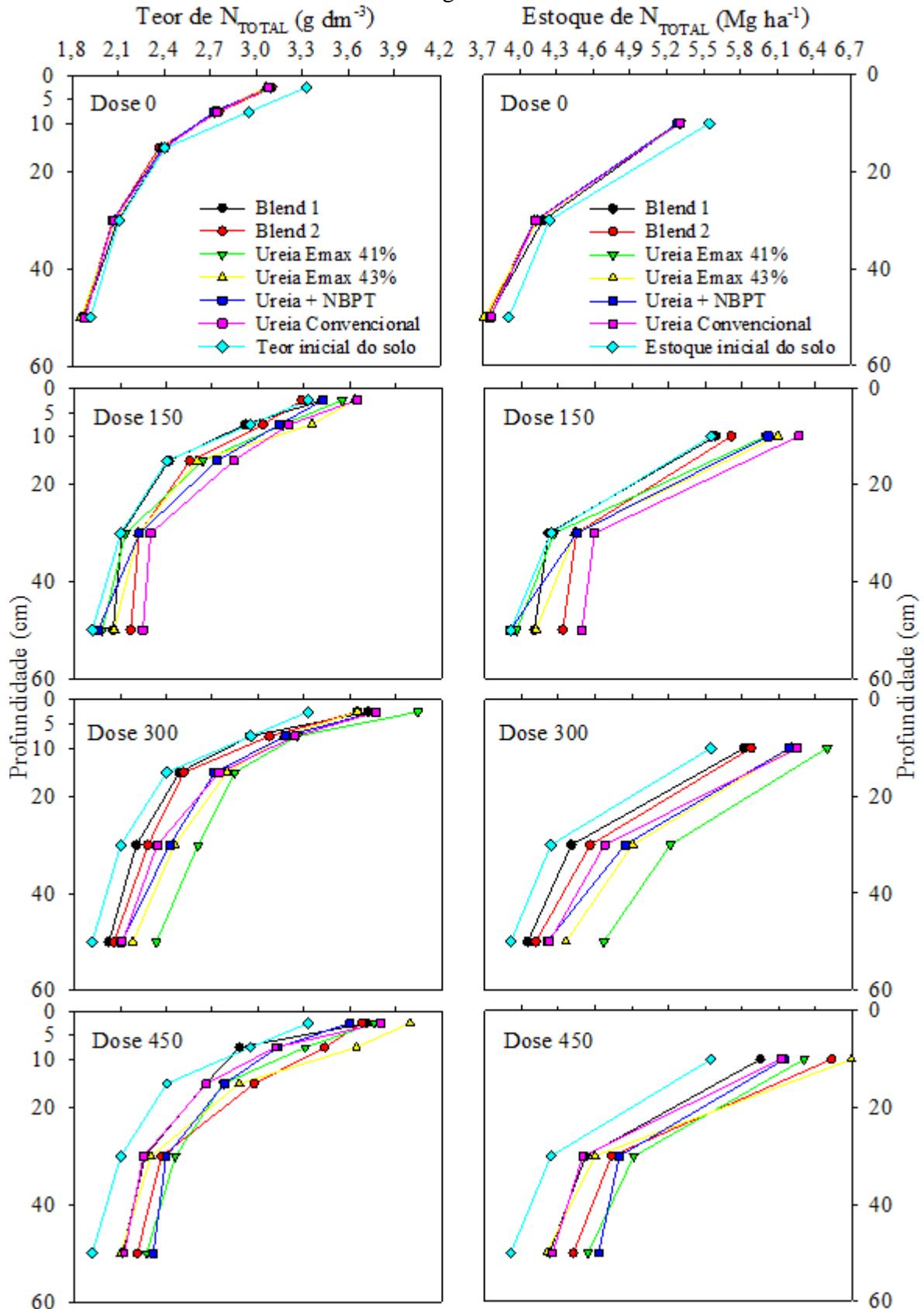
encontrou-se valores entre $1,53 \text{ Mg ha}^{-1}$ na camada de 5-10 cm (faixa de 5 cm de espessura) a $4,50 \text{ Mg ha}^{-1}$ na camada de 20-40 cm (faixa de 20 cm espessura) (TABELA 3). Considerando faixas de 20 cm de espessura, encontrou-se $5,91 \text{ Mg de N}_{\text{TOTAL}} \text{ ha}^{-1}$ na camada de 0-20 cm, $4,50 \text{ Mg ha}^{-1}$ na camada de 20-40 cm e $4,41 \text{ Mg ha}^{-1}$ na camada de 40-60 cm, ou seja, valores decrescentes do estoque de N_{TOTAL} a medida que se aprofunda no solo.

Os estoques de N_{TOTAL} de três regiões produtoras de café em Minas Gerais foram avaliados por Cerri et al. (2017). Para a lavoura situada no Sul de Minas, sem poda e plantada sobre área previamente cultivada com café (situação semelhante à do presente trabalho), os autores encontraram estoques de $1,87 \text{ Mg de N ha}^{-1}$ na camada de 0-10 cm e de $4,36 \text{ Mg de N ha}^{-1}$ na camada de 0-30 cm.

Em experimento realizado em lavoura de café, Pedrosa (2013) avaliou a adubação nitrogenada na dose $300 \text{ kg de N ha}^{-1}$ fornecidos 100% ao cafeeiro e 50% ao cafeeiro e 50% à braquiária, que foi roçada quatro vezes ao longo do experimento e depositada sob a saia do cafeeiro como adubo verde. O autor verificou que os teores de N_{TOTAL} do solo nas profundidades 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm foram maiores no tratamento com $300 \text{ kg de N ha}^{-1}$ fornecidos exclusivamente ao cafeeiro, cujos valores foram: 1,73, 1,20, 1,03, 1,17 g de N kg de solo⁻¹.

Ao avaliar o N_{TOTAL} em diferentes profundidades do solo antes e após a aplicação dos tratamentos com os fertilizantes nitrogenados em diferentes doses, foi observado redução nos teores e estoques de N_{TOTAL} nos tratamentos de dose 0 quando comparados aos valores iniciais, obtidos antes do início do experimento (FIGURA 2). Já nas doses de 150, 300 e 450 kg de N ha⁻¹, todos os fertilizantes provocaram aumento no teor de N_{TOTAL} (FIGURA 2). Esse fato corrobora com outros estudos em que a adição de fertilizante nitrogenado aumenta o N_{TOTAL} do solo em diversos sistemas de cultivo (LOVATO et al., 2004; WEBER; MIELNICZUK, 2009).

Figura 2 – Teor de nitrogênio total (g dm^{-3}) e estoque de nitrogênio total (Mg ha^{-1}) das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, antes e após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.



Fonte: Da autora (2020).

Somente uma parte do N aplicado, 40 a 60%, é absorvido pela planta, sendo direcionado para produção e vegetação da planta (FURTINI NETO et al., 2001). Do restante, 20 a 50% são incorporados ao solo como nitrogênio orgânico, sendo parte disponibilizada para as próximas culturas (FENILLI et al, 2008; FURTINI NETO et al., 2001) e outra fração, de 30 a 70%, pode perder-se por diversos mecanismos, tais como a volatilização, desnitrificação e lixiviação (FAVARIN; TEZOTTO; NETO, 2013; REICHARDT et al., 2009).

Consequentemente, a maior parte do N absorvido pela planta é proveniente do solo e não do fertilizante, sendo que, em cafeeiros, apenas 13,5 a 30% provém do fertilizante (BRUNO et al., 2015; CANNAVO et al., 2013). Mas, esse N disponível para absorção das plantas é o N_{MINERAL} ($N\text{-NH}_4^+$ e $N\text{-NO}_3^-$), entretanto, a forma predominante de N no solo é a orgânica (95% do N_{TOTAL} do solo), que não é diretamente aproveitada pelas plantas (FURLANI, 2004).

Para disponibilizar o $N_{\text{ORGÂNICO}}$, ele deve ser mineralizado para produzir $N\text{-NH}_4^+$ e, posteriormente, $N\text{-NO}_3^-$, sendo esse processo responsável, por ano, pela conversão de 2 a 5% do $N_{\text{ORGÂNICO}}$ a N_{MINERAL} (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010; MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). Segundo Cannavo et al. (2013), a taxa de mineralização de N em lavoura cafeeira na camada de 0-10 cm de profundidade é de $200 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, sendo a exportação de N pela colheita dos grãos de $110 \text{ kg de N ha}^{-1}$, dos quais apenas 17,6 kg provém do fertilizante.

Desse modo, deve-se atentar para que o uso da dose inadequada de fertilizantes não resulte na utilização indesejável do estoque de N, comprometendo a produtividade e fertilidade do solo (DOBERMANN, 2007; FAVARIN; TEZOTTO; NETO, 2013), conforme foi observado no presente trabalho, em que houve redução do N_{TOTAL} quando se comparou o estoque inicial do solo com o estoque após dois anos de experimento na dose 0, ou seja, sem aplicação de fertilizante.

3.2 Teor e estoque de N_{MINERAL} do solo

Os teores de N_{MINERAL} e de $N\text{-NO}_3^-$ da adubação nitrogenada realizada com cada fertilizante tiveram o mesmo comportamento em todas as profundidades e em todas as doses (TABELA 4). Apenas para o teor de $N\text{-NH}_4^+$ se observou interação entre fertilizantes e doses (TABELAS 5 e 6, FIGURA 3). Houve interação entre as doses e profundidades para o N_{MINERAL} , $N\text{-NH}_4^+$ e $N\text{-NO}_3^-$ (TABELAS 7 e 8, FIGURA 4).

Tabela 4 – Teores de nitrogênio mineral, amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) do solo ($\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$), até 60 cm de profundidade, após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. ⁽¹⁾

Fertilizantes	Teores ($\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$)			Relação $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$
	$\text{N}_{\text{MINERAL}}$	N-NH_4^+	N-NO_3^-	
Ureia convencional	56,34 b	25,81 b	30,53 c	1,18 b
Ureia + NBPT	55,93 b	25,90 b	30,03 c	1,16 b
Ureia Emax 41%	58,70 a	26,81 a	31,89 b	1,19 b
Ureia Emax 43%	58,95 a	25,86 a	32,09 b	1,19 b
Blend 1 (NBPT + Emax 41)	56,04 b	25,03 c	31,01 c	1,24 a
Blend 2 (NBPT + Emax 43)	58,99 a	25,42 c	33,57 a	1,31 a

Nota: Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. (1) Coleta realizada ao final do experimento, após dois anos de condução, em junho de 2019.

Fonte: Da autora (2020).

As médias de $\text{N}_{\text{MINERAL}}$ foram maiores para os fertilizantes Ureia Emax 41%, Ureia Emax 43% e Blend 2, iguais entre si, com médias entre 58,7 e 59,0 $\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$, e menores para os fertilizantes Ureia convencional, Ureia + NBPT e Blend 1, cujos valores estavam entre 55,9 e 56,3 $\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$ (TABELA 4).

Para o N-NH_4^+ , os teores foram superiores para Ureia Emax 41% e Ureia Emax 43% (26,81 e 25,86 $\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$, respectivamente), seguidas pela Ureia convencional e pela Ureia + NBPT (25,81 e 25,90 $\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$), e, por último, pelos ‘Blends’ 1 e 2 (25,03 e 25,42 $\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$) (TABELA 4).

Já para o N-NO_3^- , as médias seguiram a seguinte ordem decrescente: Blend 2 (33,57 $\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$) > Ureia Emax 41% e Ureia Emax 43% (31,89 e 32,09 $\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$) > Ureia convencional, Ureia + NBPT e Blend 1 (30,53, 30,03 e 31,01 $\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$) (TABELA 4).

Ao calcular a relação entre N-NO_3^- e N-NH_4^+ , foi possível observar que os ‘blends’ apresentaram maiores valores, isto é, a proporção de nitrato no solo foi maior do que as dos demais tratamentos, com valores entre 1,24 a 1,31 unidades de N-NO_3^- para cada unidade de N-NH_4^+ (TABELA 4).

Analisando o teor de N-NH_4^+ , as médias dos tratamentos sem aplicação de fertilizantes nitrogenados (dose 0) não diferiram entre si, apresentando valores entre 23,62 e 23,67 $\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$. Para a dose 150, os ‘Blends’ 1 e 2 tiveram menores médias (24,16 e 24,56 $\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$) em relação aos demais, iguais estatisticamente (médias entre 25,60 a 26,23 $\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$). Já para as doses 300 e 450, a Ureia Emax 41% e a Ureia Emax 43% proporcionaram maiores valores de N-NH_4^+ , 27,16 e 27,91 $\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$ na dose 300 e 30,81 e 29,99 $\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$ na dose 450, sendo que os demais fertilizantes exibiram teores de N-NH_4^+ entre 25,96 e 26,87 $\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$ na dose 300 e 26,38 e 27,25 $\text{mg}\ \text{dm}^{-3}$ na dose 450 (TABELA 5).

Tabela 5 – Teor de amônio ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) do solo após aplicação dos fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro. ⁽¹⁾

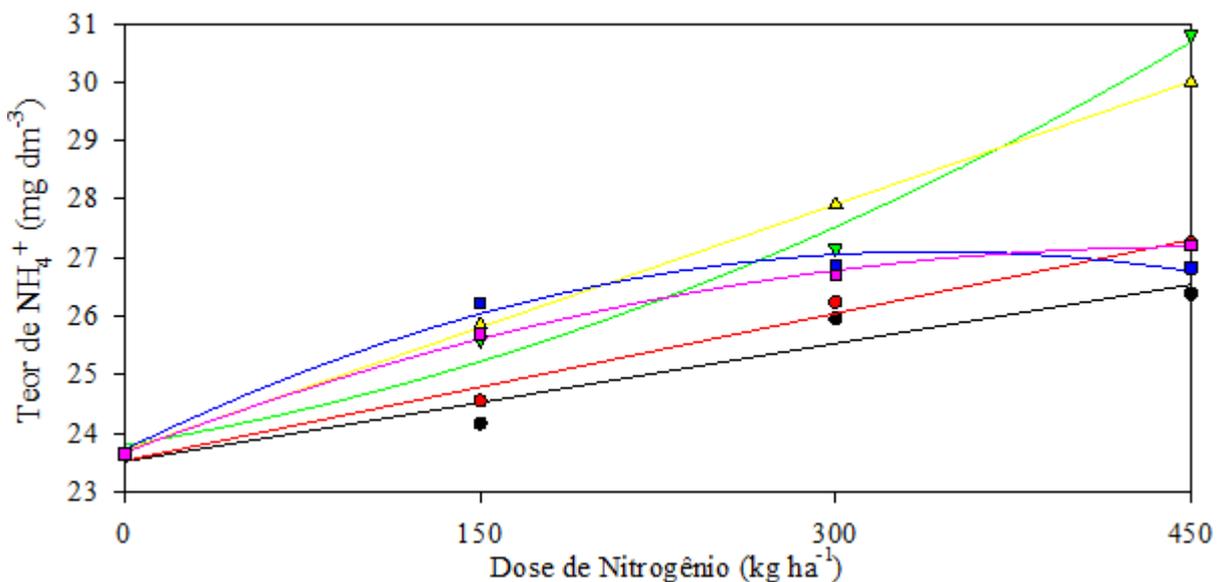
Fertilizantes	Teor de NH_4^+ ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$)				Média
	Dose de Nitrogênio ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)				
	0	150	300	450	
Ureia convencional	23,65 a	25,69 a	26,70 b	27,21 b	25,81 b
Ureia + NBPT	23,66 a	26,23 a	26,87 b	26,83 b	25,90 b
Ureia Emax 41%	23,67 a	25,60 a	27,16 a	30,81 a	26,81 a
Ureia Emax 43%	23,67 a	25,85 a	27,91 a	29,99 a	25,86 a
Blend 1 (NBPT + Emax 41)	23,62 a	24,16 b	25,96 b	26,38 b	25,03 c
Blend 2 (NBPT + Emax 43)	23,62 a	24,56 b	26,23 b	27,25 b	25,42 c

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. (1) Coleta realizada ao final do experimento, após dois anos de aplicação dos tratamentos, em junho de 2019.

Fonte: Da autora (2020).

Com relação ao teor de N-NH_4^+ de cada fertilizante nas doses avaliadas, observou-se tendência quadrática para Ureia convencional, Ureia + NBPT e Ureia Emax 41%, e linear crescente para Ureia Emax 43%, Blend 1 e Blend 2. As maiores médias foram obtidas na dose 450 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, com exceção à Ureia + NBPT, cujo valor máximo foi verificado na dose 342 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, com médias de N-NH_4^+ iguais a 27,20, 27,11, 30,64, 29,82, 26,54 e 27,31 $\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, respectivamente (FIGURA 3).

Figura 3 – Estoque de amônio ($\text{mg} \cdot \text{dm}^{-3}$) do solo, em junho de 2019, obtido após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.



Fonte: Da autora (2020).

Tabela 6 – Equações de regressão e R² do teor de amônio (mg.dm⁻³) do solo após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.

Fertilizantes	Equações	R ²
Ureia convencional	$NH_4^+ = -0,000017x^2 + 0,015499x + 23,672467$	0,998
Ureia + NBPT	$NH_4^+ = -0,000029x^2 + 0,019823x + 23,721400$	0,989
Ureia Emax 41%	$NH_4^+ = 0,000019x^2 + 0,006658x + 23,796300$	0,989
Ureia Emax 43%	$NH_4^+ = 0,014012x + 23,706067$	1,000
Blend 1 (NBPT + Emax 41)	$NH_4^+ = 0,006723x + 23,517733$	0,936
Blend 2 (NBPT + Emax 43)	$NH_4^+ = 0,008393x + 23,529000$	0,987

Nota: x = dose de nitrogênio aplicada.

Fonte: Da autora (2020).

Ao analisar os teores de N_{MINERAL}, N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ de todos os fertilizantes nitrogenados em cada dose de N e em cada profundidade, verificou-se médias maiores na camada de 0-5 cm, que foram diminuindo até a camada de 40-60 cm (TABELA 7). Para o N_{MINERAL}, as médias ficaram entre 55,15 (0-5 cm) e 42,81 mg dm⁻³ (40-60 cm) na dose 0, entre 64,86 e 46,52 mg dm⁻³ na dose 150, entre 71,09 e 50,95 mg dm⁻³ na dose 300 e entre 78,29 e 51,77 mg dm⁻³ na dose 450. Com relação ao N-NH₄⁺, esses valores foram: 26,84 - 20,99 mg dm⁻³ (dose 0), 28,57 - 21,30 mg dm⁻³ (dose 150), 29,64 - 23,27 mg dm⁻³ (dose 300) e 33,53 - 23,27 mg dm⁻³ (dose 450). Já para o N-NO₃⁻, as médias variaram entre: 28,31 - 21,82 mg dm⁻³ (dose 0), 36,29 - 25,21 mg dm⁻³ (dose 150), 41,45 - 27,67 mg dm⁻³ (dose 300) e 44,76 - 28,49 mg dm⁻³ (dose 450) (TABELA 7).

Tabela 7 – Teores de nitrogênio mineral, amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) (mg dm^{-3}) das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, após aplicação dos fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro. ⁽¹⁾

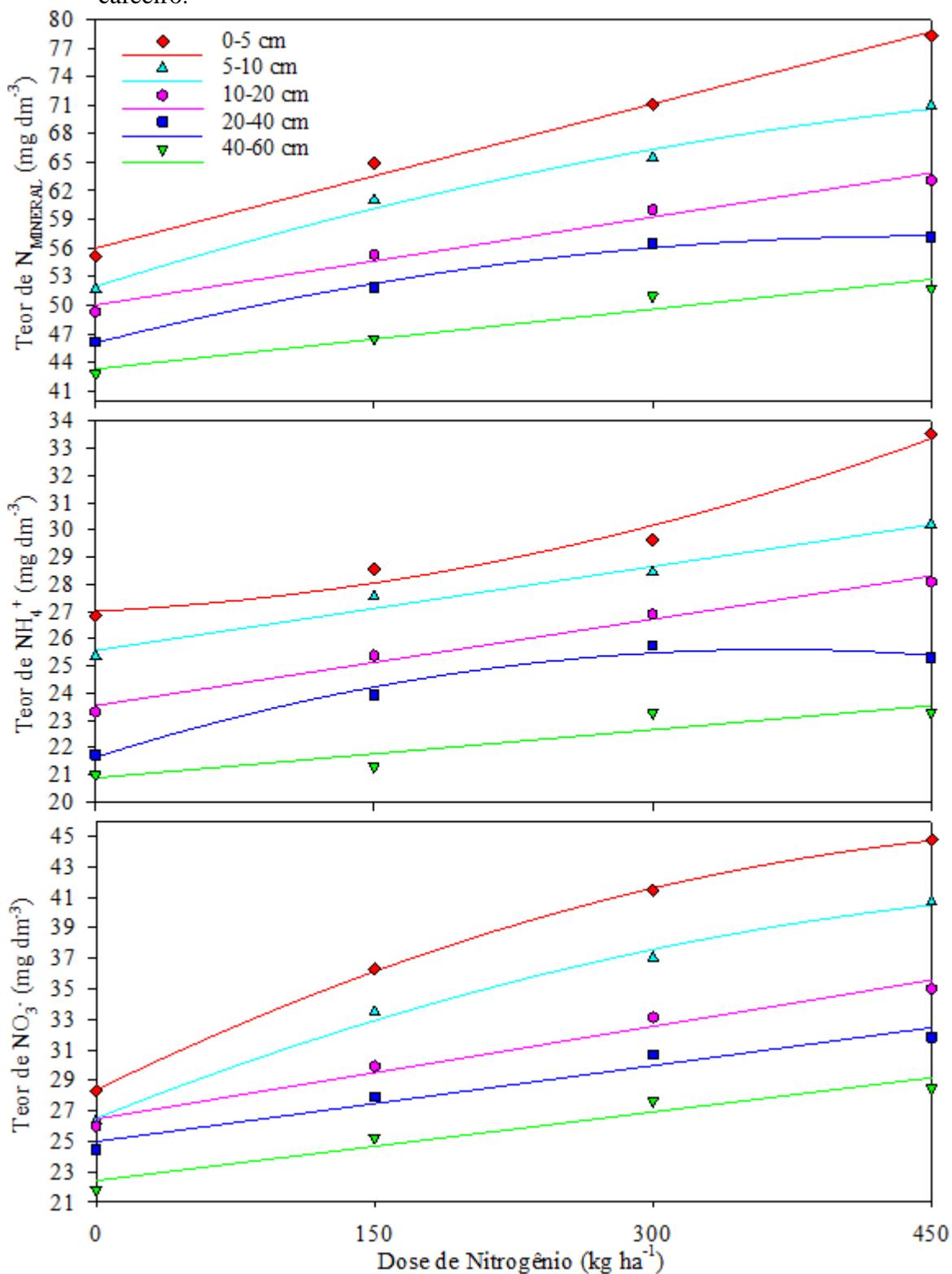
Profundidade	Dose de Nitrogênio (kg ha^{-1})			
	0	150	300	450
	Teor de $\text{N}_{\text{MINERAL}}$ (mg dm^{-3})			
0-5 cm	55,15 a	64,86 a	71,09 a	78,29 a
5-10 cm	51,67 b	61,02 b	65,46 b	70,88 b
10-20 cm	49,30 b	55,30 c	60,05 c	63,12 c
20-40 cm	46,19 c	51,85 d	56,46 d	57,12 d
40-60 cm	42,81 d	46,52 e	50,95 e	51,77 e
	Teor de NH_4^+ (mg dm^{-3})			
0-5 cm	26,84 a	28,57 a	29,64 a	33,53 a
5-10 cm	25,35 b	27,54 b	28,45 b	30,19 b
10-20 cm	23,31 c	25,38 c	26,91 c	28,10 c
20-40 cm	21,74 d	23,94 d	25,76 d	25,30 d
40-60 cm	20,99 d	21,30 e	23,27 e	23,27 e
	Teor de NO_3^- (mg dm^{-3})			
0-5 cm	28,31 a	36,29 a	41,45 a	44,76 a
5-10 cm	26,32 a	33,48 b	37,02 b	40,68 b
10-20 cm	25,99 a	29,92 c	33,14 c	35,02 c
20-40 cm	24,45 b	27,91 c	30,70 d	31,82 d
40-60 cm	21,82 c	25,21 d	27,67 e	28,49 e

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras nas colunas de cada estoque não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. (1) Coleta realizada ao final do experimento, após dois anos de aplicação dos tratamentos, em junho de 2019.

Fonte: Da autora (2020).

Nas análises de regressão entre as doses de N e os teores de $\text{N}_{\text{MINERAL}}$, de N-NH_4^+ e de N-NO_3^- , todos os fertilizantes apresentaram o mesmo comportamento em cada camada avaliada. Considerando as médias de todos os fertilizantes, os maiores valores de $\text{N}_{\text{MINERAL}}$, N-NH_4^+ e N-NO_3^- foram obtidos nas doses de 450 kg de N ha^{-1} , com exceção ao estoque de N-NH_4^+ na camada de 20-40 cm, que foi maior na dose de 366 kg de N ha^{-1} . Para os teores de $\text{N}_{\text{MINERAL}}$, esses valores máximos foram iguais a 78,69, 70,88, 63,87, 57,27 e 52,71 mg dm^{-3} nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm, respectivamente. Os teores de N-NH_4^+ nessas mesmas camadas foram de 33,35, 30,20, 28,31, 25,60 e 23,54 mg dm^{-3} . Já para os teores de N-NO_3^- , corresponderam a 44,71, 40,49, 35,56, 32,46 e 29,17 mg dm^{-3} (FIGURA 4).

Figura 4 – Teores de nitrogênio mineral, amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-) (mg dm^{-3}) das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, em junho de 2019, obtido após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.



Fonte: Da autora (2020).

Tabela 8 – Equações de regressão e R² dos teores nitrogênio mineral, amônio (NH₄⁺) e nitrato (NO₃⁻) (mg dm⁻³) das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.

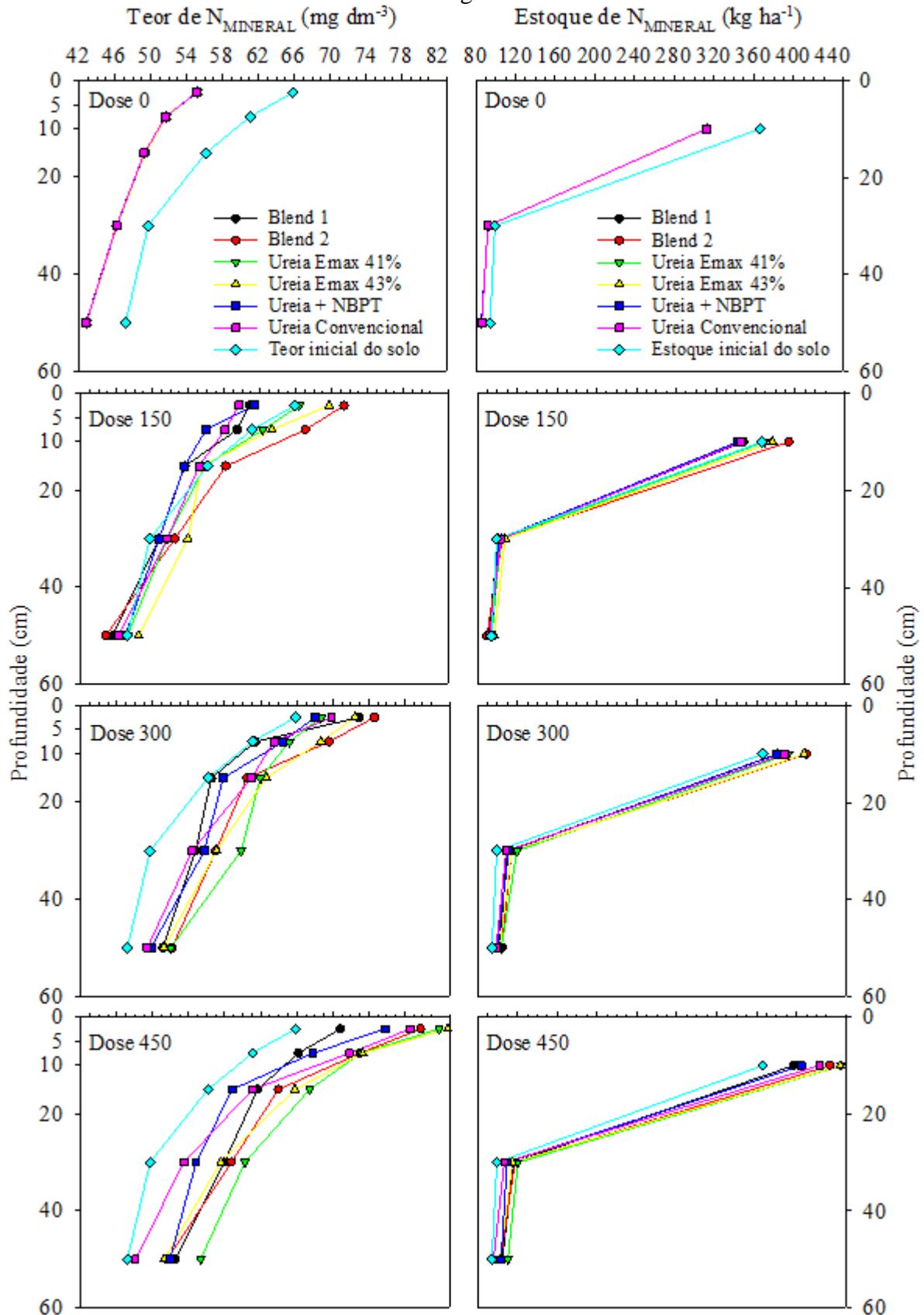
Profundidade	Equações	R ²
	Teor de N _{MINERAL} (mg dm ⁻³)	
0-5 cm	$N_{\text{MINERAL}} = 0,050431x + 56,000500$	0,991
5-10 cm	$N_{\text{MINERAL}} = -0,000044x^2 + 0,061031x + 51,967167$	0,991
10-20 cm	$N_{\text{MINERAL}} = 0,030804x + 50,011444$	0,980
20-40 cm	$N_{\text{MINERAL}} = -0,000056x^2 + 0,049930x + 46,043083$	0,995
40-60 cm	$N_{\text{MINERAL}} = 0,020878x + 43,314222$	0,942
	Teor de NH ₄ ⁺ (mg dm ⁻³)	
0-5 cm	$NH_4^+ = 0,000024x^2 + 0,003322x + 27,017750$	0,975
5-10 cm	$NH_4^+ = 0,010284x + 25,570056$	0,977
10-20 cm	$NH_4^+ = 0,010584x + 23,544500$	0,985
20-40 cm	$NH_4^+ = -0,000030x^2 + 0,021626x + 21,645528$	0,982
40-60 cm	$NH_4^+ = 0,005899x + 20,885056$	0,852
	Teor de NO ₃ ⁻ (mg dm ⁻³)	
0-5 cm	$NO_3^- = -0,000052x^2 + 0,059698x + 28,354417$	1,000
5-10 cm	$NO_3^- = -0,000039x^2 + 0,048529x + 26,508000$	0,994
10-20 cm	$NO_3^- = 0,020217x + 26,467000$	0,977
20-40 cm	$NO_3^- = 0,016610x + 24,982278$	0,956
40-60 cm	$NO_3^- = 0,014979x + 22,428278$	0,937

Nota: x = dose de nitrogênio aplicada.

Fonte: Da autora (2020).

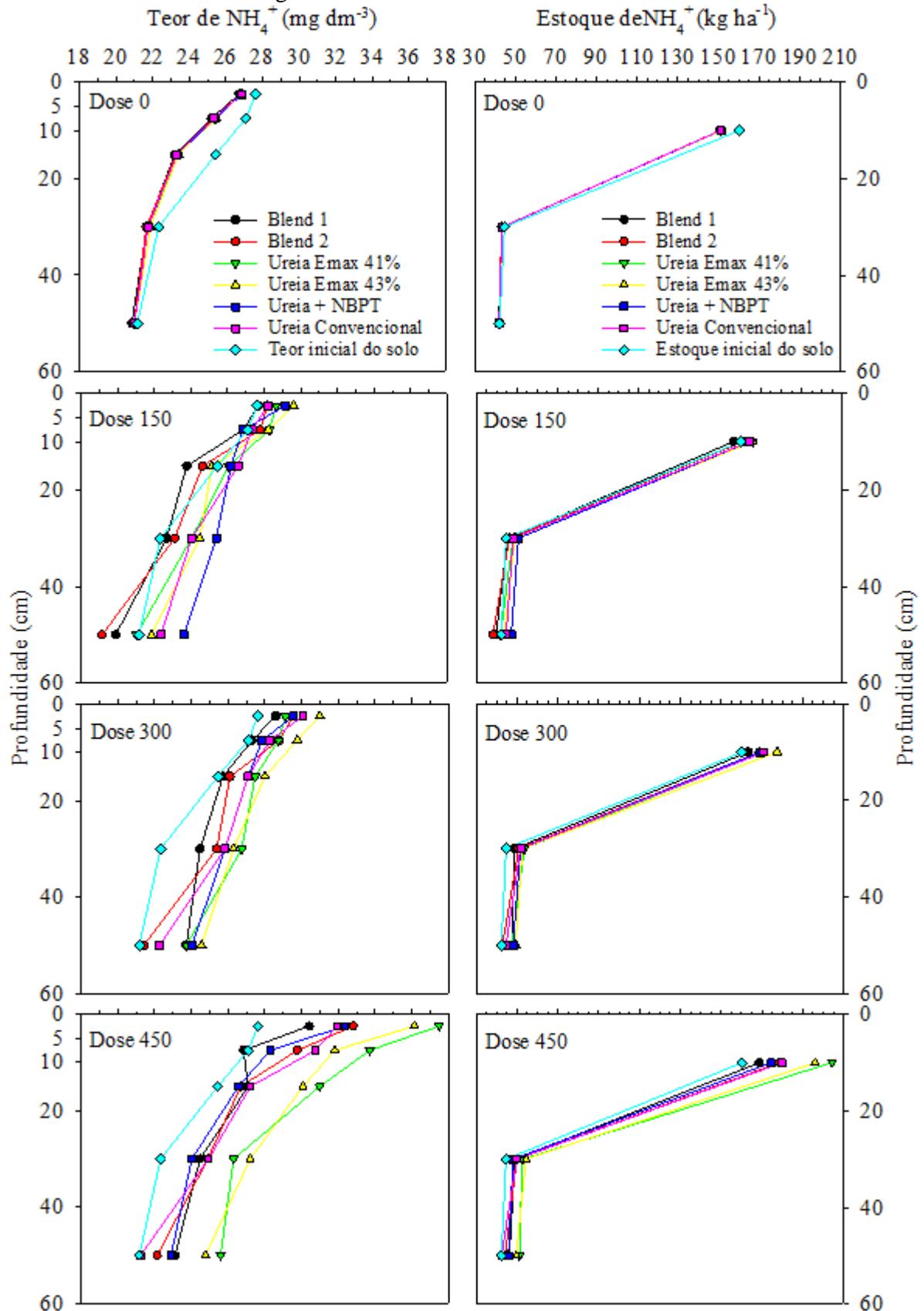
Nas Figuras 5, 6 e 7, pode-se observar os teores e estoques de N_{MINERAL}, N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ de cada fertilizante, em cada profundidade para cada dose. Todos os teores e estoques obtidos na dose 0 foram menores do que os valores iniciais do solo, ou seja, o não fornecimento de N na forma de fertilizantes provocou uma redução nos teores e estoques de N_{MINERAL}, N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ do solo.

Figura 5 – Teor e estoque de nitrogênio mineral das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, antes da aplicação dos tratamentos e após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeieiro.



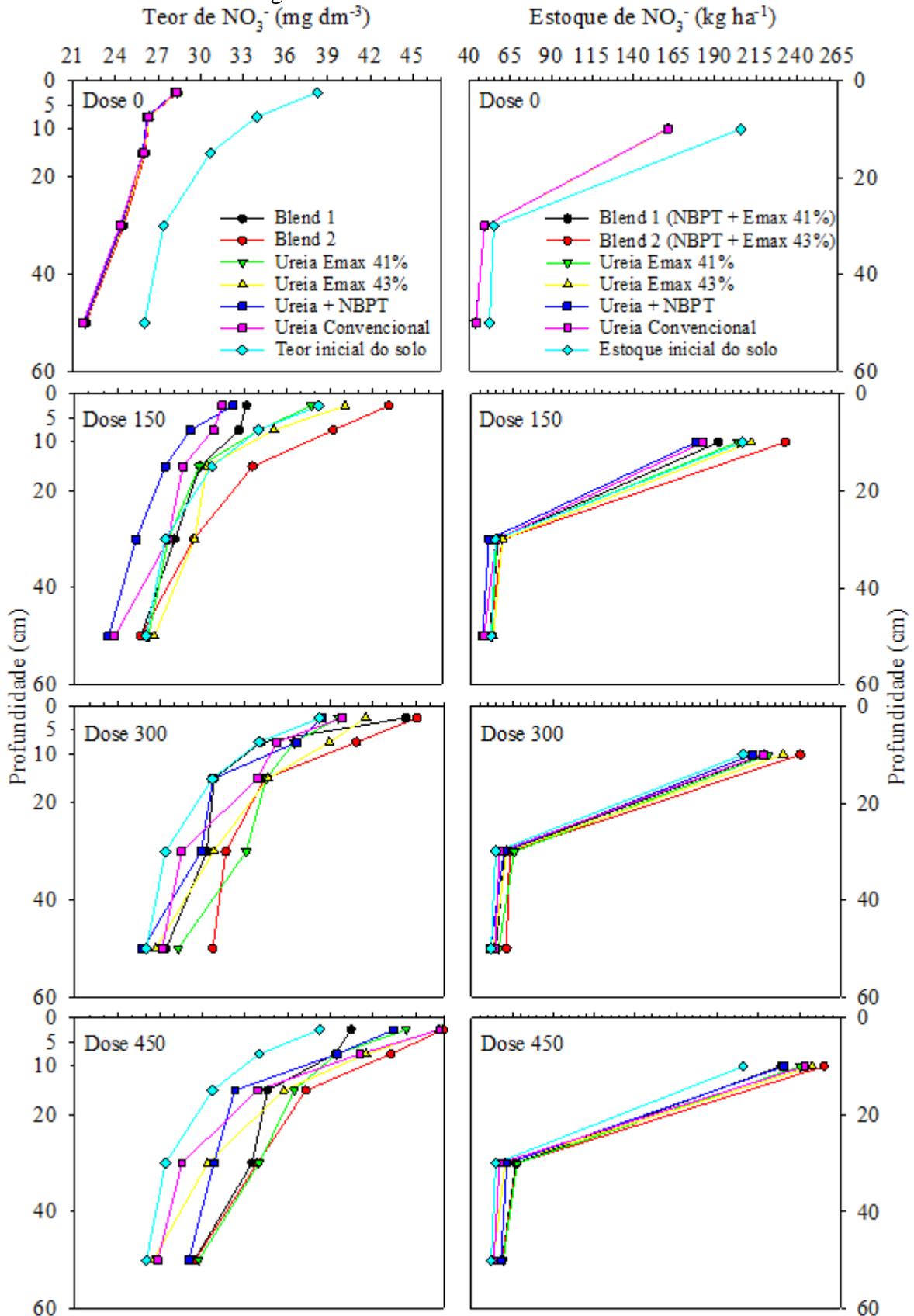
Fonte: Da autora (2020).

Figura 6 – Teor e estoque de amônio das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, antes da aplicação dos tratamentos e após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.



Fonte: Da autora (2020).

Figura 7 – Teor e estoque de nitrato das camadas do solo em até 60 cm de profundidade, antes da aplicação dos tratamentos e após dois anos de aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.



Fonte: Da autora (2020).

O mesmo foi notado na dose 150 dos fertilizantes Ureia convencional, Ureia + NBPT e Blend 1 nos teores de N_{MINERAL} das camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 40-60 cm e nos estoques de N_{MINERAL} das camadas 0-20 e 40-60; dos fertilizantes Ureia Emax 41% e Emax 43% nos teores de N_{MINERAL} da camada de 10-20 cm e do Blend 2 nos teores e estoques de N_{MINERAL} da camada de 40-60 cm (FIGURA 5).

Para o $N\text{-NH}_4^+$, também se observou redução nos teores e estoques de $N\text{-NH}_4^+$ na dose 150. Para o Blend 1, houve redução nos teores de $N\text{-NH}_4^+$ das camadas de 5-10, 10-20 e 40-60 cm e estoques de $N\text{-NH}_4^+$ das camadas 0-20 e 40-60 cm. Para o Blend 2, nos teores de $N\text{-NH}_4^+$ das camadas 10-20 e 40-60 cm e estoque de $N\text{-NH}_4^+$ da camada 40-60 cm; para Ureia Emax 41%, no teor e estoque da camada de 40-60 cm; para Ureia + NBPT, no teor da camada 5-10 cm; e para Ureia Emax 43%, no teor da camada 10-20 cm. Também houve redução do teor de $N\text{-NH}_4^+$ na dose 450 para o Blend 1 na camada 5-10 cm (FIGURA 6).

Já com relação ao $N\text{-NO}_3^-$, ocorreu redução dos teores e estoques, além da dose 0, na dose 150 para ambos na Ureia + NBPT em todas as camadas; para Ureia convencional e Blend 1 nos teores de $N\text{-NO}_3^-$ das camadas 0-5, 5-10, 10-20 e 40-60 cm e nos estoques de $N\text{-NO}_3^-$ das camadas 0-20 e 40-60 cm; para Blend 2 nos teores e estoques da camada 40-60 cm; e para os teores de $N\text{-NO}_3^-$ dos tratamentos com Ureia Emax 41% nas camadas 0-5 e 10-20 cm e Ureia Emax 43% na camada 10-20 cm. Na dose 300, também se verificou redução do teor e estoque de $N\text{-NO}_3^-$ para a Ureia + NBPT na camada 40-60 cm (FIGURA 7).

Em geral, o nitrato é a forma predominante de N em solos cultivados, bem aerados, sendo sua ocorrência no solo atribuída, principalmente, ao processo de nitrificação, em que o amônio, carregado com cargas positivas, é oxidado para nitrito, que por sua vez é oxidado para nitrato (CANNAVO et al., 2013; ROGERI et al., 2015; VIEIRA, 2017). Além disso, o $N\text{-NH}_4^+$ proveniente da ureia tende a ser nitrificado rapidamente em virtude da elevação do pH do meio durante a hidrólise (SILVA; VALE, 2000).

De acordo com os resultados obtidos, notou-se que os tratamentos em que houve aplicação dos 'Blends' 1 e 2 apresentaram menores médias de $N\text{-NH}_4^+$ e maiores relações entre $N\text{-NO}_3^-$ e $N\text{-NH}_4^+$, enquanto os fertilizantes de liberação controlada, Ureia Emax 41% e Ureia Emax 43%, tiveram maiores teores e estoques de $N\text{-NH}_4^+$, e, juntamente à Ureia convencional e à Ureia + NBPT, menores relações entre $N\text{-NO}_3^-$ e $N\text{-NH}_4^+$. Possivelmente, isso está relacionado com a quantidade de fertilizante de alta solubilidade aplicada de uma só vez no solo, que implica diretamente no pH do solo e, conseqüentemente, na taxa de nitrificação.

A Ureia convencional e a Ureia + NBPT, ambos de alta solubilidade, tiveram as aplicações parceladas em três vezes, correspondendo a três aplicações de 50, de 100 e de 150 kg de N ha⁻¹. Já os ‘blends’ e os fertilizantes de liberação controlada, foram aplicados em dose total (100% = 150, 300 e 450 kg de N ha⁻¹) em novembro de cada ano. É importante ressaltar que os ‘blends’ eram compostos por 40% de Ureia + NBPT, fração prontamente disponível, equivalente a 60, 120 e 180 kg de N ha⁻¹, portanto, maiores do que as quantidades aplicadas em cada parcelamento dos tratamentos Ureia convencional e Ureia + NBPT.

Dentre os fatores que influenciam o processo de nitrificação, estão a disponibilidade de O₂, a acidez e a temperatura do solo (CANTARELLA, 2007). Como nesse experimento a disponibilidade de O₂ e a temperatura do solo foram as mesmas para todos os tratamentos, o que mais afetou a taxa de nitrificação foi o pH do solo, beneficiada com o aumento do pH em decorrência do processo de hidrólise da ureia (SILVA; VALE, 2000). Essa reação consome prótons (H⁺) e provoca elevação do pH ao redor dos grânulos desse fertilizante, que, mesmo temporária, é suficiente para promover condições favoráveis à nitrificação no solo adjacente ao grânulo (CANTARELLA, 2007; WICKRAMASINGHE; RODGERS; JENKINSON, 1985).

Como os ‘Blends’ 1 e 2 forneceram N em maior quantidade ao solo de uma só vez, consumiram naquele momento mais H⁺, ocasionando maior elevação do pH, favorecendo a nitrificação do N-NH₄⁺ a N-NO₃⁻. Já os fertilizantes de liberação controlada, disponibilizados de maneira gradual, oscilam menos o pH do solo (ZHANG, ZHANG, TIAN, 2001), possibilitando que uma maior fração de N-NH₄⁺ resultante da hidrólise da ureia permaneça nessa forma, em relação aos demais tratamentos.

Também foi observado que o aumento das doses de N aumentou os teores e estoques de N_{MINERAL}, N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻, sendo as maiores concentrações desses, encontradas na camada superficial do solo. Essa camada teve contato direto com os adubos, independente da fonte de N utilizada, e foram diminuindo com o aumento da profundidade, assim como foi verificado por Cardoso Neto, Guerra e Chaves (2006). Cannavo et al. (2013) também encontraram resultados semelhantes a esse, em que os teores de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ são maiores na camada superficial do solo e vão, no geral, diminuindo com a profundidade do solo.

Esse fato pode estar relacionado à presença de matéria orgânica em maior quantidade na camada mais superficial do solo (TABELA 1), uma vez que aumenta a capacidade de troca catiônica do solo, colaborando para maior adsorção de NH₄⁺ e, conseqüentemente, de N_{MINERAL} (CARDOSO NETO; GUERRA; CHAVES, 2006). Ademais, a textura do solo influencia a capacidade de retenção de N, uma vez que solos argilosos, como o do presente experimento,

retêm mais N-NH_4^+ comparados a solos arenosos e têm maior capacidade de armazenamento de água, reduzindo a percolação desta pelo perfil e, assim, o arraste de N-NO_3^- para camadas inferiores do solo (BORTOLINI, 2000; KLEIN; KLEIN, 2015; MENDES et al., 2015).

Mas, ainda assim, pôde-se observar aumento considerável de N-NO_3^- na camada de 40-60 cm para os fertilizantes de liberação controlada - Ureia Emax 41% e Ureia Emax 43% - e para os 'Blends' 1 e 2 na dose de $450 \text{ kg de N ha}^{-1}$, e para o Blend 2 na dose 300, apresentando valores superiores a $29,0 \text{ mg dm}^{-3}$. Culturas adubadas com altas doses de nitrogênio podem apresentar acúmulo de N inorgânico na camada subsuperficial (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010). Em lavoura cafeeira em condição de sequeiro, Souza et al. (2018) verificaram perdas consideráveis por lixiviação de N-NO_3^- com aumento da dose de N, principalmente quando aplicou-se $600 \text{ kg de N ha}^{-1}$.

É recomendado pela Organização Mundial de Saúde (OMS) que a água potável não apresente concentração maior do que 10 mg L^{-1} de nitrato (HOWARTH; MARINO, 2006). Desse modo, a adubação nitrogenada deve ser feita com cautela, adotando boas práticas para uso eficiente de fertilizantes, aplicando a fonte certa, na dose certa, na época certa e no lugar certo (4 C), visando adequar a oferta de nutrientes às necessidades da cultura, aumentar a produtividade e minimizar as suas perdas no campo, que são necessárias para o manejo sustentável da nutrição das plantas (CASARIN; STIPP, 2013).

3.3 Produtividade

Os valores de produtividade obtidos após as adubações nitrogenadas do primeiro ano (2018) tiveram o mesmo comportamento para todos os fertilizantes em cada dose, ou seja, não houve interação entre fertilizantes e doses. O mesmo foi observado para as produtividades do segundo ano (2019) e para a média dos dois anos. As produtividades médias obtidas nos tratamentos de cada fertilizante em 2018, 2019 e na média dos dois anos estão na Tabela 9. Já a análise de regressão para as médias de cada dose em 2018, 2019 e na média dos dois anos e suas respectivas equações e R^2 estão na Figura 8.

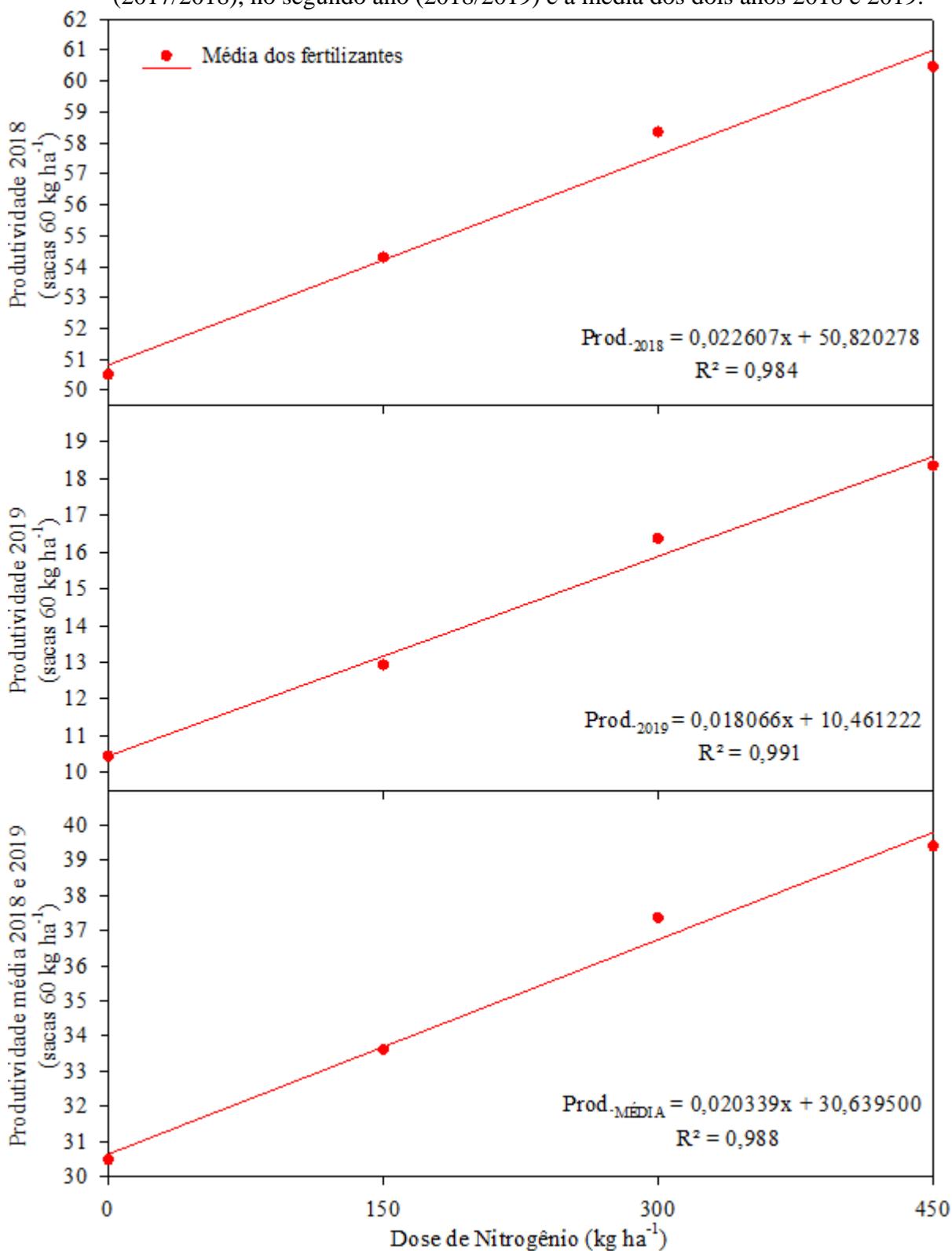
Tabela 9 – Produtividade do cafeeiro (sacas 60 kg ha⁻¹) obtida após aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados no primeiro ano do experimento (2017/2018), no segundo ano (2018/2019) e a média dos dois anos 2018 e 2019.

Fertilizantes	Produtividade (sacas 60 kg ha ⁻¹)		
	2018	2019	Média 2018-2019
Ureia convencional	57,9 a	12,3 d	35,1 a
Ureia + NBPT	52,6 c	14,2 c	33,4 b
Ureia Emax 41%	57,0 a	14,6 c	35,8 a
Ureia Emax 43%	57,7 a	13,6 c	35,6 a
Blend 1 (NBPT + Emax 41)	54,7 b	17,1 a	35,9 a
Blend 2 (NBPT + Emax 43)	55,4 b	15,4 b	35,4 a

Nota: Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott.

Fonte: Da autora (2020).

Figura 8 – Produtividade do cafeeiro (sacas 60 kg ha⁻¹) obtida após aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses, no primeiro ano do experimento (2017/2018), no segundo ano (2018/2019) e a média dos dois anos 2018 e 2019.



Nota: x = dose de nitrogênio aplicada.

Fonte: Da autora (2020).

No ano de 2018, as maiores produtividades foram obtidas pelos tratamentos Ureia convencional (57,9 sacas 60 kg ha⁻¹), Ureia Emax 41% (57,0 sacas 60 kg ha⁻¹) e Ureia Emax 43% (57,7 sacas 60 kg ha⁻¹), seguidos pelos ‘Blends’ 1 e 2 (54,7 e 55,4 sacas 60 kg ha⁻¹) e, por último, pela Ureia + NBPT (52,6 sacas 60 kg ha⁻¹), com a menor média (TABELA 9).

As médias de produtividade no segundo ano (2019) tiveram, no geral, um comportamento praticamente inverso ao primeiro ano, no qual os tratamentos com os fertilizantes que proporcionaram maiores produtividades em 2018, produziram menos em 2019, e vice-versa, com exceção à Ureia + NBPT, que permaneceu com menores médias em 2019. Os fertilizantes que tiveram maiores produtividades em 2019 foram Blend 1 (17,1 sacas 60 kg ha⁻¹), seguido pelo Blend 2 (15,4 sacas 60 kg ha⁻¹). As médias de produtividade da Ureia + NBPT, Ureia Emax 41% e Ureia Emax 43% não diferiram entre si, variando de 13,6 a 14,6 sacas 60 kg ha⁻¹, e foram menores que os ‘Blends’, mas superiores à Ureia convencional, tratamento que menos produziu nesse ano (12,3 sacas 60 kg ha⁻¹) (TABELA 9).

Já para a média dos dois anos, essas discrepâncias de produtividade em cada ano para cada fertilizante desapareceram, mostrando o efeito da bienalidade do cafeeiro. Todos os fertilizantes, com exceção à Ureia + NBPT, proporcionaram médias de produtividade iguais estatisticamente, entre 35,1 e 35,9 sacas 60 kg ha⁻¹. Somente a Ureia + NBPT teve a menor produtividade (33,4 sacas 60 kg ha⁻¹) em relação aos demais fertilizantes (TABELA 9). Souza et al. (2017) também observaram menor produtividade para a Ureia + NBPT ao avaliar diferentes fontes de N, e que essa apresentou produtividade igual ao controle (sem adubação).

As produtividades de 2018, de 2019 e da média dos dois anos de todos os fertilizantes aumentaram linearmente com o aumento da dose de N aplicada no cafeeiro, isto é, para cada 1 kg de N adicionado na forma de fertilizante, a produtividade média dos fertilizantes por hectare aumentou 0,0226 sacas em 2018, equivalente a 1,35 kg de café beneficiado, 0,0181 sacas (1,08 kg de café) em 2019 e 0,0204 sacas (1,22 kg de café) na média dos dois anos (FIGURA 8).

O cafeeiro apresenta bienalidade de produção, que consiste na alternância de produções altas e baixas, própria da natureza fisiológica do cafeeiro, que necessita vegetar em um ano para produzir bem no ano seguinte (RENA; MAESTRI, 1985). Isso ocorre porque um ciclo fenológico do cafeeiro se completa a cada dois anos, sendo um ano de fase vegetativa e outro de fase reprodutiva (CAMARGO; CAMARGO, 2001). Porém, dois ciclos fenológicos ocorrem simultaneamente em um mesmo ano, isto é, o processo de produção do ano corrente coincide com a fase de vegetação que proporcionará a produção do ano seguinte, de modo que a planta tenha que balancear a partição de fotoassimilados entre as duas fases.

Assim, em ano de alta produtividade, grande parte dos fotoassimilados é direcionada para o desenvolvimento dos frutos, sobrando menos reservas metabólicas para a vegetação, ocasionando menor crescimento vegetativo, logo, menor produtividade no ano seguinte. Já nos anos de baixa produtividade, os fotoassimilados são, em sua maioria, direcionados à formação de novas gemas vegetativas que originarão novos ramos, capazes de proporcionar maior produtividade no ano seguinte (PICINI, 1998). Esse fato justifica a discrepância de produtividade entre os dois anos (primeiro ano de carga alta e segundo ano de carga baixa) e a alternância entre a ordem de produtividade quando se observou as médias de cada ano.

Para poder comparar as produtividades dos tratamentos de cada fertilizante em cada dose, foi feita uma análise estatística considerando todos os fertilizantes nas doses 150, 300 e 450 e uma testemunha de dose 0, totalizando 19 tratamentos, para a média de produtividade dos dois anos avaliados (TABELA 10).

Tabela 10 – Produtividade média do cafeeiro (sacas 60 kg ha⁻¹) dos anos 2018 e 2019 obtida após aplicação dos fertilizantes nitrogenados com diferentes doses.

Fertilizantes	Doses de N (kg ha ⁻¹ ano ⁻¹)	Produtividade (sacas 60 kg ha ⁻¹)
Testemunha	0	30,6 c
Ureia convencional	150	34,1 b
Ureia + NBPT	150	31,7 c
Ureia Emax 41%	150	34,8 b
Ureia Emax 43%	150	35,0 b
Blend 1 (NBPT + Emax 41)	150	33,6 b
Blend 2 (NBPT + Emax 43)	150	32,5 c
Ureia convencional	300	37,1 a
Ureia + NBPT	300	34,7 b
Ureia Emax 41%	300	36,7 a
Ureia Emax 43%	300	38,3 a
Blend 1 (NBPT + Emax 41)	300	38,8 a
Blend 2 (NBPT + Emax 43)	300	38,6 a
Ureia convencional	450	38,7 a
Ureia + NBPT	450	37,1 a
Ureia Emax 41%	450	40,7 a
Ureia Emax 43%	450	38,8 a
Blend 1 (NBPT + Emax 41)	450	41,0 a
Blend 2 (NBPT + Emax 43)	450	40,1 a

Nota: Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste Scott-Knott.

Fonte: Da autora (2020).

As produtividades obtidas com as doses 300 e 450 kg de N ha⁻¹ não diferiram estatisticamente, com exceção do fertilizante Ureia + NBPT, em que a dose 450 proporcionou maior produtividade em relação à dose de 300 kg de N ha⁻¹, sendo esta igual às produtividades

obtidas na dose 150 para os fertilizantes Ureia convencional, Ureia Emax 41%, Ureia Emax 43% e Blend 1 (TABELA 10).

A dose de 150 kg de N ha⁻¹ ocasionou produções menores que as demais doses para todos os fertilizantes. Para os tratamentos Ureia + NBPT e Blend 2, as produtividades obtidas com a dose 150 foram iguais à testemunha (dose 0, sem adubação nitrogenada) e menores que as da Ureia convencional, Ureia Emax 41%, Ureia Emax 43% e Blend 1 (TABELA 10).

Vale ressaltar que na dose 0, além de se observar menor produtividade, houve redução dos estoques de N_{TOTAL} e N_{MINERAL} para todos os fertilizantes. O mesmo aconteceu para a Ureia + NBPT na dose 150, em que apresentou também menor produtividade e redução dos estoques de N_{TOTAL} e N_{MINERAL}, e na dose 300, na qual teve produtividade inferior aos demais fertilizantes na mesma dose, além de reduzir o estoque de N-NO₃⁻, em relação ao estoque inicial, na camada de 40-60 cm.

Deve-se atentar para o fato de que a utilização de fertilizante na dose inadequada pode comprometer a fertilidade do solo (DOBERMANN, 2007; FAVARIN; TEZOTTO; NETO, 2013), pois a maior parte de N utilizada pelas plantas vem do solo, e não do fertilizante (BRUNO et al., 2015; CANNAVO et al., 2013), mas este é de extrema importância para repor o N utilizado do solo, além de fornecer uma parte também para as plantas. A consequência mais direta e mais fácil de ser observada é a diminuição da produtividade em casos mais extremos, como foi verificado quando não se utilizou fertilizante nitrogenado (dose 0) e para alguns fertilizantes na dose 150, em que os estoques de N do solo também foram afetados. Porém, pode ser que a produtividade em curto prazo não seja afetada, mas ocorra redução dos estoques de N do solo, como foi observado para todos os fertilizantes na dose 150, em uma ou mais camadas do solo, o que poderá afetar a produtividade a médio e longo prazo.

Já para as doses 300 e 450 kg de N ha⁻¹, notou-se que a redução da dose de 450 para 300 kg de N ha⁻¹ não reduziu a produtividade e não diminuiu os estoques de N em comparação aos estoques iniciais, apesar de que a dose 450 proporcionou um incremento maior nos estoques de N. Além disso, a redução do número de parcelamentos para os 'blends' e os fertilizantes de liberação controlada em relação à Ureia convencional também não afetou a produtividade.

Diante disso, é imprescindível obter dados de produtividade e de estoques de N total e mineral de várias safras do cafeeiro, de modo a ter médias mais seguras, que representem, de fato, as respostas aos fertilizantes e às doses em longo prazo. No entanto, os trabalhos realizados com adubação nitrogenada no cafeeiro envolvendo doses e fertilizantes são poucos, sendo a

maioria avaliada em poucas safras, além de apresentarem resultados discrepantes, sendo alguns citados a seguir.

Em trabalho com café arábica irrigado em Garanhuns-PE, com a cultivar Catuaí Vermelho IAC H2077-2-5-24, de cinco anos de idade, Quintela et al. (2011) avaliaram a produtividade do cafeeiro submetido a doses de 0, 100, 200, 300, 400 e 500 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N, e concluíram que ela foi influenciada significativamente pelas doses de N, mostrando tendência quadrática com aumento até a dose estimada de 338 kg ha⁻¹, correspondendo a 60 sacas ha⁻¹, sendo a produtividade máxima econômica equivalente a 54 sacas ha⁻¹, obtida com a dose 196 kg ha⁻¹.

Diversos experimentos de adubação nitrogenada no cafeeiro foram analisados por Pinto et al. (2017), Bortolotto et al. (2013), Bruno et al. (2011), Bruno et al. (2015), Pinto (2015) e Pinto et al. (2015), tentando identificar a dose ideal para que se promovesse boa produtividade e lucratividade da cafeicultura do Cerrado baiano, aliada a menores perdas, visando a preservação do ambiente. Os autores concluíram que a redução da dose de N aplicada no cafeeiro de 600 para 400 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N deve ser considerada pelos cafeicultores do Cerrado baiano, uma vez que, além de reduzir os gastos com aplicação de fertilizantes em 33%, sem diminuir a produtividade, poderia reduzir as perdas de N por lixiviação em 46% e de volatilização e desnitrificação em 26%.

Duas fontes de N, ureia revestida com enxofre e polímeros e um formulado com nitrogênio, foram avaliadas por Paiva et al. (2011), que observaram maiores produtividades com o uso da primeira do que com a segunda na análise de duas safras separadamente. Porém, na média do biênio, não foram encontradas diferenças significativas entre as fontes nitrogenadas.

Em estudos realizados em lavoura cafeeira adulta, Dominghetti (2016) e Bartelega (2018) avaliaram diferentes fontes de nitrogênio, com adubação de 450 kg de N ha⁻¹ nas safras de 2013/2014 e 2014/2015 e 300 kg de N ha⁻¹ nas safras de 2015/2016 (DOMINGHETTI, 2016) e 2016/2017 (BARTELEGA, 2018). Bartelega (2018) fez a média das produtividades de quatro safras e não observou diferença entre as produtividades promovidas pela ureia convencional, ureia + NBPT, 'blend' de ureia estabilizada com NBPT e ureia revestida com S⁰ e polímeros e pela ureia revestida com resina plástica (liberação controlada).

Em experimento com lavoura cafeeira de três anos e meio de idade, Abranches (2018) avaliou duas fontes de fertilizantes nitrogenados (ureia revestida e ureia convencional) em três doses de N (150, 300 e 600 kg ha⁻¹), e uma testemunha (sem aplicação de N). O autor não

observou diferença entre as fontes utilizadas, mas o aumento das doses influenciou a produtividade nas três safras avaliadas (2015, 2016 e 2017), havendo aumento linear da produtividade com o aumento da dose em 2015 e 2017 e comportamento quadrático em 2016 e para a média dos três anos, atingindo maior produtividade nas doses 538 kg de N ha⁻¹ e 600 kg de N ha⁻¹, respectivamente.

Fertilizantes nitrogenados convencionais e ‘blends’ de ureia + NBPT e ureia de liberação controlada (Polyblen Montanha[®] e Polyblen Extend[®]) aplicados em diferentes doses e parcelamentos em lavoura cafeeira irrigada por gotejamento foram comparados por Chagas et al. (2016). Os autores verificaram que a utilização do Polyblen Montanha[®] possibilitou a redução do número de parcelamentos da adubação a uma única aplicação, em comparação a fontes convencionais como ureia e nitrato de amônio aplicadas em três parcelamentos, aplicando-se apenas 70% da dose recomendada sem alterar a produtividade e a nutrição do cafeeiro.

A produtividade média do cafeeiro em cinco safras foi avaliada por Fagundes et al. (2015). A maior produtividade foi encontrada com aplicação de um ‘blend’ composto por fertilizantes estabilizado (ureia + NBPT) e de liberação controlada (ureia revestida por S⁰ e polímeros) em comparação ao formulado convencional (25-00-25) aplicando-se 25% a menos de N.

A produtividade do cafeeiro com diferentes fontes (ureia, ureia polimerizada e nitrato de amônio) e doses de N (210 e 300 kg de N ha⁻¹) em quatro safras (2010/2011, 2011/2012, 2012/2013 e 2013/2014) foi estudada por Lima et al. (2016). Segundo os autores, na média das quatro safras, não houve diferença entre as fontes e as doses de N utilizadas, porém, os tratamentos foram superiores ao controle, sem adubação nitrogenada, proporcionando incrementos de produtividade de até 151% em relação ao controle.

Ao comparar três fontes de N (ureia polimerizada, nitrato de amônio e ureia convencional) em três doses (150, 210 e 300 kg de N ha⁻¹) e uma testemunha sem adubação nitrogenada, Fernandes e Fraga Júnior (2010) relataram que as produtividades obtidas nos tratamentos de dose 150 não diferiram da testemunha, assim como o nitrato de amônio na dose 210 e a ureia convencional na dose 300. Os autores concluíram que essas doses para essas fontes possivelmente não foram suficientes para suprir a necessidade do cafeeiro. Além disso, verificaram que a ureia polimerizada na dose de 210 kg de N ha⁻¹ teve a mesma produtividade que todos os fertilizantes na dose 300, o que indica que a redução da dose para esse fertilizante é uma opção a ser considerada.

Os trabalhos realizados com o uso de ‘blends’ e de fertilizantes de liberação controlada aparentemente apresentam bom potencial. Entretanto, com base nos estudos disponíveis sobre adubação nitrogenada do cafeeiro com diferentes fontes e doses citados anteriormente, observou-se resultados divergentes, não permitindo obter uma conclusão generalizada sobre o assunto. Autores como Chagas et al (2016), Fagundes et al. (2015), Fernandes e Fraga Júnior (2010) e Lima et al. (2016) relataram que com menores quantidades de ‘blends’ ou fertilizantes de liberação controlada é possível se atingir os mesmos níveis de produtividade conseguidos com o uso da ureia convencional. Já Abranches (2018), Bartelega (2018), Dominghetti (2016) e Paiva et al. (2011) não observaram nenhum tipo de ganho desses fertilizantes em comparação com a aplicação de ureia convencional, não permitindo que se feche essa questão.

3.4 Índices de eficiência da adubação nitrogenada

Os índices de eficiência agrônômica relativa à ureia (IEAR), de eficiência agrônômica do nitrogênio aplicado (EA) e de eficiência do uso do nitrogênio (EUN) foram influenciados significativamente ($p \leq 0,05$) pelos fertilizantes nitrogenados e pelas doses de N após os dois anos do experimento (2017/2018 e 2018/2019), ocorrendo interação entre fertilizantes e doses (TABELAS 11, 12 e 13).

Tabela 11 – Índice de eficiência agrônômica relativa à ureia (IEAR - %) obtido após aplicação dos tratamentos com fertilizantes nitrogenados em diferentes doses no cafeeiro.

Fertilizantes	IEAR (%)			Média
	Dose de Nitrogênio (kg.ha ⁻¹)			
	150	300	450	
Ureia convencional ⁽¹⁾	100,0 aA	100,0 bA	100,0 bA	100,0 a
Ureia + NBPT ⁽¹⁾	36,4 bB	66,6 cA	80,3 bA	61,5 c
Ureia Emax 41% ⁽²⁾	116,9 aA	94,8 bB	126,1 aA	112,6 a
Ureia Emax 43% ⁽²⁾	116,7 aA	116,0 aA	102,0 bA	111,6 a
Blend 1 (NBPT + Emax 41%) ⁽²⁾	97,0 aB	122,8 aA	128,6 aA	116,2 a
Blend 2 (NBPT + Emax 43%) ⁽²⁾	25,2 bB	118,6 aA	117,0 aA	86,9 b
Média	82,0 B	103,1 A	109,2 A	

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. (1) Foram parcelados em 3 aplicações. (2) Foram aplicados em dose única.

Fonte: Da autora (2020).

Tabela 12 – Índice de eficiência agrônômica do nitrogênio aplicado (EA), obtido pela relação entre a quantidade de café produzida a mais que a dose 0 e a dose de N aplicada.

Fertilizantes	EA (kg café por kg N)			Média
	Dose de Nitrogênio (kg ha ⁻¹)			
	150	300	450	
Ureia convencional ⁽¹⁾	1,71 aA	1,47 aA	1,19 aA	1,45 a
Ureia + NBPT ⁽¹⁾	0,77 bA	0,97 bA	0,97 aA	0,90 b
Ureia Emax 41% ⁽²⁾	1,98 aA	1,38 aB	1,46 aB	1,61 a
Ureia Emax 43% ⁽²⁾	1,95 aA	1,70 aA	1,19 aB	1,62 a
Blend 1 (NBPT + Emax 41%) ⁽²⁾	1,64 aA	1,79 aA	1,49 aA	1,64 a
Blend 2 (NBPT + Emax 43%) ⁽²⁾	1,08 bB	1,76 aA	1,38 aB	1,41 a
Média	1,52 A	1,51 A	1,28 B	

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. (1) Foram parcelados em 3 aplicações. (2) Foram aplicados em dose única.

Fonte: Da autora (2020).

Tabela 13 – Índice de eficiência do uso do nitrogênio (EUN), obtido pela relação entre a quantidade de café produzida e a dose de N aplicada dos fertilizantes nitrogenados.

Fertilizantes	EUN (kg café por kg N)			Média
	Dose de Nitrogênio (kg ha ⁻¹)			
	150	300	450	
Ureia convencional ⁽¹⁾	13,63 aA	7,43 aB	5,16 aC	8,74 a
Ureia + NBPT ⁽¹⁾	12,69 bA	6,93 bB	4,94 aC	8,19 b
Ureia Emax 41% ⁽²⁾	13,91 aA	7,34 aB	5,43 aC	8,89 a
Ureia Emax 43% ⁽²⁾	13,88 aA	7,66 aB	5,17 aC	8,90 a
Blend 1 (NBPT + Emax 41%) ⁽²⁾	13,56 aA	7,75 aB	5,47 aC	8,93 a
Blend 2 (NBPT + Emax 43%) ⁽²⁾	13,01 bA	7,72 aB	5,35 aC	8,69 a
Média	13,45 A	7,47 B	5,26 C	

Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas colunas e maiúsculas nas linhas não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Scott-Knott. (1) Foram parcelados em 3 aplicações. (2) Foram aplicados em dose única.

Fonte: Da autora (2020).

O índice de eficiência agrônômica relativa à ureia (IEAR) de cada fertilizante em cada dose foi calculado considerando a produtividade da Ureia convencional na mesma dose como base de cálculo, descontando, de ambos, a produtividade obtida na dose 0 (testemunha). Na dose 150, a Ureia + NBPT e o Blend 2 apresentaram IEAR menores que o da Ureia convencional, correspondendo a eficiência de 36,4 e 25,2% em relação à esta. Já os demais fertilizantes apresentaram a mesma eficiência da Ureia convencional nessa mesma dose (TABELA 11).

Na dose de 300 kg de N.ha⁻¹, a Ureia Emax 43% e os ‘Blends’ 1 e 2 tiveram eficiência maior do que a da Ureia convencional, equivalente a 116,0, 122,8 e 118,6%, respectivamente.

Já a Ureia Emax 41% teve a mesma eficiência da Ureia convencional, porém a Ureia + NBPT proporcionou menor IEAR, de 66,6% (TABELA 11).

Considerando a dose 450, a Ureia Emax 41% e os 'Blends' 1 e 2 apresentaram os maiores IEAR, sendo superiores à Ureia convencional, cuja eficiência não diferiu da Ureia + NBPT e da Ureia Emax 43% (TABELA 11).

Na média de todas as doses para cada fertilizante, a Ureia Emax 41%, Ureia Emax 43% e o Blend 1 tiveram a mesma eficiência da Ureia convencional, e foram superiores ao Blend 2 e à Ureia + NBPT. O Blend 2 apresentou eficiência de 86,9% em relação à Ureia convencional e a Ureia + NBPT teve o menor IEAR, de 61,5% (TABELA 11).

Considerando as doses avaliadas dentro de cada fertilizante, a Ureia + NBPT, Blend 1 e Blend 2, na dose 150, apresentaram menores IEAR. Já nas doses 300 e 450 desses tratamentos, as médias de IEAR não diferiram. Para a Ureia Emax 41%, o menor IEAR foi obtido na dose 300, já as doses 150 e 450 tiveram o mesmo IEAR. Não houve diferença entre as doses para a Ureia Emax 43% e, obviamente, para a Ureia convencional, uma vez que como esta foi utilizada como referência para esse índice, apresentando valores iguais a 100% em todas as doses (TABELA 11).

Comparando as médias obtidas pelos fertilizantes em cada dose, a dose 150 teve menor IEAR. Isso quer dizer que, no geral, os fertilizantes tiveram menor eficiência que a Ureia convencional na dose 150 e maior IEAR nas doses 300 e 450, à exceção da Ureia + NBPT (TABELA 11).

O IEAR de diferentes fertilizantes nitrogenados: convencionais e 'blends' de ureia + NBPT e ureia de liberação controlada (Polyblen Montanha[®] e Polyblen Extend[®]), aplicados em diferentes doses e parcelamentos no cafeeiro, foi avaliado por Chagas (2017). Os 'blends' nas doses 450 e 315 kg de N ha⁻¹ tiveram maior IEAR do que a ureia convencional, aplicada na dose 450 kg de N ha⁻¹, sendo o Polyblen Montanha[®] na dose 450 kg de N ha⁻¹ superior aos demais. Em um experimento com milho, Zavaschi et al. (2014) encontraram IEAR de 92% para a ureia com polímeros.

Avaliando o índice de eficiência agrônômica do nitrogênio aplicado (EA), na dose 150 a Ureia + NBPT e o Blend 2 apresentaram menores médias em relação aos outros fertilizantes, iguais entre si. Na dose de 300 kg de N ha⁻¹, apenas a Ureia + NBPT foi menos eficiente do que os demais fertilizantes. Na dose 450, todos apresentaram a mesma eficiência. No entanto, ao analisar a média dos fertilizantes, a Ureia + NBPT apresentou menor EA, equivalente ao incremento de 0,90 kg de café a mais do que a testemunha por kg de N adicionado ao solo,

enquanto os demais fertilizantes tiveram aumento entre 1,41 e 1,64 kg café por kg N (TABELA 12).

Considerando as doses dentro de cada fertilizante, não houve diferença entre essas para a Ureia convencional, Ureia + NBPT e Blend 1. Para a Ureia Emax 41%, o maior EA foi obtido na dose 150. Já para o Blend 2, a dose 300 apresentou o maior EA. Mas, ao avaliar a média dos fertilizantes em cada dose, a dose 450 apresentou menor eficiência agrônômica, de 1,28 kg de café por kg de N. As doses 150 e 300 não diferiram entre si e proporcionaram produções de 1,52 e 1,51 kg de café a mais do que a dose 0 por kg de N aplicado ao solo. Portanto, as plantas de café, nas condições desse experimento, apresentaram maior eficiência quando receberam doses de 150 e 300 kg de N ha⁻¹ (TABELA 12).

Pereira (1999) avaliou a eficiência agrônômica do N aplicado no cafeeiro e também observou que o acréscimo na dose de N causou decréscimo na EA, ou seja, que as plantas avaliadas apresentaram alta eficiência quando supridas pelas menores doses de N. De acordo com Dobermann (2007), a utilização de menores doses de N pode permitir maior EA, quando comparado a aplicação de doses maiores.

Chagas (2017) comparou EA da ureia convencional e de 'blends' de ureia + NBPT e ureia de liberação controlada (Polyblen Montanha[®] e Polyblen Extend[®]) aplicados no cafeeiro na mesma dose que a ureia (450 kg de N.ha⁻¹) e em dose 70% menor (315 kg de N.ha⁻¹). O autor encontrou menor EA para a ureia (0,73 kg de grãos.kg de N⁻¹), enquanto os demais apresentaram médias de EA entre 1,53 e 1,99 kg de grãos.kg de N⁻¹. Além disso, para o fertilizante Polyblen Extend[®], a dose de 315 kg de N.ha⁻¹ apresentou maior EA do que a dose de 450 kg de N.ha⁻¹, caso semelhante ao Blend 2 nesse presente experimento, que teve maior EA na dose 300 do que na dose 450.

Ao analisar o índice de eficiência do uso do nitrogênio (EUN), observou-se o mesmo comportamento para os fertilizantes dentro de cada dose que o EA, ou seja, menores valores para Ureia + NBPT e Blend 2 na dose 150, Ureia + NBPT na dose 300, a mesma eficiência para todos os fertilizantes na dose 450 e menor EUN para a Ureia + NBPT na média de todas as doses. Com relação às doses dentro de cada fertilizante e para a média de todos fertilizantes em cada dose, verificou-se que houve um decréscimo da EUN com o aumento da dose de N (TABELA 13).

A eficiência de uso de nitrogênio, medida pela quantidade produzida pela cultura por unidade de fertilizante aplicado, é inversamente proporcional às doses usadas (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010). Para Favarin, Tezotto e Neto (2013), essa relação

negativa entre a EUN e a dose de N utilizada está associada ao metabolismo do carbono, pois com aumento da dose de N, maior quantidade de carboidratos é demandada para sua assimilação. Isto é, o metabolismo do N e do carbono são processos ‘competitivos’, sendo comprovado por diversas pesquisas por curva de resposta decrescente à dose de N. Os autores ainda ressaltam que esse fato pode estar acontecendo em lavouras cafeeiras de várias regiões, sobretudo naquelas onde se aplicam doses superiores a 450 kg ha^{-1} de N.

No entanto, a utilização de doses baixas de N, por mais que proporcione altos índices de EUN, pode resultar na utilização indesejada do estoque de N e matéria orgânica do solo e comprometer a fertilidade do solo em médio prazo (DOBERMANN, 2007). Tal fato foi observado nesse experimento - a dose 150 proporcionou maiores EUN, porém, ocasionou redução dos estoques de N do solo para todos os fertilizantes, em uma ou mais camadas do solo.

De modo geral, as doses econômicas ótimas são as próximas daquelas necessárias para compensar a exportação de N pela colheita. Já doses aplicadas muito além das exportadas pela colheita, podem resultar em excesso de N livre no solo, baixa EUN e, conseqüentemente, maiores riscos de perdas (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010). Diante do exposto, o uso eficiente dos fertilizantes é imprescindível para garantir em longo prazo a produtividade e a lucratividade da cafeicultura (PINTO et al. 2017).

Desse modo, ressalta-se a importância da realização de mais estudos envolvendo fontes e doses de N em longo prazo, em diferentes regiões, avaliando não só a produtividade, mas também fatores do solo, como os estoques de N_{TOTAL} e N_{MINERAL} , de forma a obter dados mais concisos e reais sobre a adubação nitrogenada no cafeeiro.

4 CONCLUSÃO

Os teores e estoques de NTOTAL, NMINERAL, N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ aumentam com o aumento da dose de N aplicada, mas o fornecimento insuficiente de N causa redução dos mesmos.

A produtividade do cafeeiro aumenta linearmente com o aumento da dose de N aplicada. Mas, a redução da dose de 450 para 300 kg de N ha⁻¹ não prejudica a produtividade, além de não diminuir o estoque de N do solo.

O uso de 'blends' e fertilizantes de liberação controlada possibilita realizar a adubação nitrogenada do cafeeiro em única dose sem afetar a produtividade.

A Ureia + NBPT é o fertilizante com menor eficiência, proporciona a menor produtividade, além de estar entre os menores estoques de NMINERAL

REFERÊNCIAS

- ABRANCHES, J. L. **Resposta da cultura do café arábica à aplicação de ureia revestida**. 2018. 92 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu, 2018.
- AZEEM, B. et al. Review on materials & methods to produce controlled release coated urea fertilizer. **Journal of Controlled Release**, Minnesota, v. 181, n. 1, p. 11-21, May. 2014.
- BARTELEGA, L. **Fertilizantes nitrogenados convencionais, estabilizados, de liberação lenta, controlada e blends para o cafeeiro**. 2018. 68 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2018.
- BAYER, C. Aumento do estoque de matéria orgânica de um Cambissolo Húmico catarinense sob plantio direto. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 2, n. 2, p. 81-87, jun./dez. 2003.
- BORTOLINI, C. G. **Eficiência do método de adubação nitrogenada em pré-semeadura do milho implantado em semeadura direta após aveia preta**. 2000. 48 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- BORTOLOTTO, R. P. et al. Nitrate leaching through climatologic water balance in a fertigated coffee plantation. **Revista Ceres**, Viçosa, MG, v. 60, n. 6, p. 785-792, Nov./Dec. 2013.
- BREMNER, J. M.; KEENEY, D. R. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: 3. Exchangeable ammonium, nitrate, and nitrite by extraction-distillation methods. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 30, n. 5, p. 577-582, Sept./Oct. 1996.
- BRUNO, I. P. et al. Fertilizer nitrogen in fertigated coffee crop: absorption changes in plant compartments over time. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 124, n. 3, p. 369-377, Dec. 2011.
- _____. Nitrogen balance and fertigation use efficiency in a field coffee crop. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 38, n. 13, p. 2055-2057, Nov. 2015.
- CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, jan./abr. 2001.
- CANNAVO, P. et al. Low nitrogen use efficiency and high nitrate leaching in a highly fertilized *Coffea arabica*-*Inga densiflora* agroforestry system: a 15 N labeled fertilizer study. **Nutrient cycling in agroecosystems**, Dordrecht, v. 95, n. 3, p. 377-394, Apr. 2013.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.

CANTARELLA, H.; MONTEZANO, Z. F. Nitrogênio e enxofre. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes: volume 2**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. p. 15-65.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O. Determinação de nitrogênio inorgânico em solo pelo método da destilação a vapor. In: RAIJ, B. et al. (Ed.) **Análise Química para Avaliação da Fertilidade de Solos Tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2011. p. 270-276.

CARDOSO NETO, F.; GUERRA, H. O. C.; CHAVES, L. H. G. Nitrogênio residual em solo adubado com diferentes fontes e intervalos de aplicação de nitrogênio. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 19, n. 2, p. 161-168, abr./jun. 2006.

CASARIN, V.; STIPP, S. R. Quatro medidas corretas que levam ao uso eficiente dos fertilizantes. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 142, p. 14-20, jun. 2013.

CERRI, C. C. et al. Estoques de carbono e nitrogênio no solo devido a mudanças no uso da terra em áreas de cultivo de café em minas gerais. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 1, p. 30-41, jan./mar. 2017.

CHAGAS, W. F. T. **Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta, controlada e Blends aplicados no cafeeiro**. 2018. 139 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

CHAGAS, W. F. T. et al. Ammonia volatilization from blends with stabilized and controlled-released urea in the coffee system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 5, p. 497-509, Sept./Oct. 2016.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Preços agropecuários – Preços de insumos – Insumos agropecuários: fertilizante, químico**, MG, 2010-2020. Brasília: CONAB, 2020. Disponível em: <<https://consultaweb.conab.gov.br/consultas/consultaInsumo.do?method=acaoCarregarConsulta>>. Acesso em: 17 mar. 2020.

COSER, T. R. et al. Nitrogênio da biomassa microbiana em solo de Cerrado com aplicação de fertilizante nitrogenado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 3, p. 399-406, mar. 2007.

D'ANDREA, A. F. et al. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 2, p. 179-186, fev. 2004.

DOBERMANN, A. Nutrient use efficiency: measurement and management. In: International Fertilizer Industry Association. **Fertilizer best management practices**. Paris: IFA, 2007. p. 1-28.

DOMINGHETTI, A. W. **Fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada e convencionais na cultura do cafeeiro**. 2016. 144 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa - CNPS, 1997. 212 p.

_____. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. 356 p.

FAGUNDES, A. V. et al. Adubação nitrogenada e potássica com fertilizantes de liberação controlada (Polyblen®) em cafeeiros *Coffea arabica* por cinco safras (2011/2012 a 2015/2016) no sul de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 41, 2015, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: Fundação PROCAFÉ, 2015. CD-ROM.

FAVARIN, J. L.; TEZOTTO, T.; NETO, A. P. Balanço nutricional em café: estudo de caso. **Visão Agrícola**, Piracicaba, n. 12, p. 79-81, jan./jul. 2013.

FENILLI, T. A. B. et al. Fertilizer 15N balance in a coffee cropping system: a case study in Brazil. In: **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 1459-1469, July./Aug. 2008.

FERNANDES, A. L. T.; FRAGA-JÚNIOR, E. F. Doses de fontes nitrogenadas convencionais e nitrogênio polimerizado na produtividade e maturação do cafeeiro irrigado. **Fazu em Revista**, Uberaba, n. 7, p. 37-41, 2010.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, Nov./Dec. 2011.

FURLANI, A. M. C. Nutrição mineral. In: KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. São Paulo: Guanabara Koogan, 2004. p. 40-75.

FURTINI NETO, A. E. et al. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001. 261 p.

GUELFÍ, D. Fertilizantes nitrogenados estabilizados, de liberação lenta ou controlada. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 157, p. 1-14, mar. 2017.

GUERREIRO FILHO, O. et al. Café Arábica. In: AGUIAR, A. T. E. et al. (Ed.). **Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**: boletim 200. Campinas: Instituto Agrônomico, 2014. p. 90-104.

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

HOWARTH, R. W.; MARINO, R. Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: evolving views over three decades. **American Society of Limnology and Oceanography**, Waco, v. 51, n. 1, p. 364-376, Jan. 2006.

KE, J. et al. Effects of different controlled-release nitrogen fertilizers on ammonia volatilization, nitrogen use efficiency and yield of blanket-seedling machine-transplanted rice. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 205, p. 147-156, Apr. 2017.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Estratégias para potencializar a retenção e disponibilidade de água no solo. **REGET** - Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Santa Maria, v.19, n.1, p.21-29, jan./abr. 2015.

LADHA, J.K. et al. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: retrospects and prospects. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 87, n. 5, p. 85-156, Jan. 2000.

LIMA, L. C. et al. Crescimento e produtividade do cafeeiro irrigado, em função de diferentes fontes de nitrogênio. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 97-107, jan./mar. 2016.

LOVATO, T. et al. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 28, n. 1, p. 175-187, jan./fev. 2004.

MALAVOLTA, E. **Nutrição mineral e adubação do cafeeiro**: colheitas econômicas e máximas. São Paulo: Agronômica CERES, 1993. 210 p.

MATIELLO, J. B. et al. **Cultura de café no Brasil**: novo manual de recomendações. Varginha: MAPA, 2010. 546 p.

MENDES, W. C. et al. Lixiviação de nitrato em função de lâminas de irrigação em solos argiloso e arenoso. **Irriga**, Botucatu, v.1, n.2. p.47-56, ago./dez. 2015. (Edição Especial).

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: UFLA, 2002. 626 p.

PAIVA, R. F. et al. Adubação de cafeeiros *Coffea arabica* em produção com fertilizantes de liberação lenta e controlada (Polyblen®) no Sul de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIEIRAS, 37., 2011, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: Fundação PROCAFÉ, 2011. p. 191-192.

PEACOCK, A. D. et al. Soil microbial community responses to dairy manure or ammonium nitrate applications. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.33, n. 7-8, p.1011-1019, June. 2001.

PEDROSA, A. W. **Eficiência da adubação nitrogenada no consórcio entre cafeeiro**. 2013. 73 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, 2013.

PEREIRA, J. B. D. **Eficiência nutricional de nitrogênio e de potássio em plantas de café (*Coffea arabica* L.)**. 1999. 99 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

PICINI, A. G. **Desenvolvimento e teste de modelos agrometeorológicos para estimativa de produtividade do cafeeiro (*Coffea arabica* L.) a partir do monitoramento da disponibilidade hídrica do solo**. 1998. 132 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

PINTO, V. M. **Simulation of water and nitrogen dynamics in a Cerrado soil under coffee cultivation using SWAP and ANIMO models**. 2015. 123 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015.

PINTO, V. M. et al. Deep drainage modeling for a fertigated coffee plantation in the Brazilian savanna. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.148, p. 130-140, Jan. 2015.

_____. Uso excessivo de nitrogênio gera perda monetária para cafeicultores do cerrado baiano. **Coffee Science**, Lavras, v. 12, n. 2, p. 176 - 186, abr./jun. 2017.

QUINTELA et al. Parâmetros produtivos e nutricionais do cafeeiro submetido adubação nitrogenada na região de Garanhuns. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 24, n. 4, p. 74-79, out./dez. 2011.

REICHARDT, K. et al. Relação entre a adubação nitrogenada e as condições hídricas do solo para um cafezal de Piracicaba, SP. **Coffee Science**, Lavras, v. 4, n. 1, p. 41-55, jan./mar. 2009.

RENA, A. B.; MAESTRI, M. Ecofisiologia do cafeeiro. In: CASTRO, P. R. C.; FERREIRA, S. O.; YAMADA, T. (Ed.). **Ecofisiologia do cafeeiro**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1987. p. 119-147.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVARES, V. H. (Ed.). **Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: UFV, 1999. 359 p.

ROGERI, D. A. et al. Mineralização e nitrificação do nitrogênio proveniente da cama de aves aplicada ao solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.6, p. 534–540, jun. 2015.

SÁ JÚNIOR, A. de et al. Application of the Koppen classification for climatic zoning in the state of Minas Gerais, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 108, n. 1, p. 1-7, Jan./Apr. 2012.

SILVA, C. A.; VALE, F. R. Disponibilidade de nitrato em solos brasileiros sob efeito da calagem e de fontes e doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 12, p. 2461-2471, dez. 2000.

SOUZA, J. A. et al. Nitrogen dynamics in a Latosol cultivated with coffee. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 22, n. 6, p. 390-395, June. 2018.

SOUZA, T. L. et al. Produtividade do cafeeiro fertilizado com diferentes fontes e doses de nitrogênio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 43, 2017, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: Fundação PROCAFÉ, 2017. CD-ROM.

TIMILSENA, Y. P. et al. Enhanced efficiency fertilizers: a review of formulation and nutrient release patterns. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, London, v. 95, n. 6, p. 1131-1142, Apr. 2014.

TRENKEL, M. **Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient efficiency in agriculture.** 2nd ed. Paris: International Fertilizer Industry Association, 2010. 163 p.

VALE, F. R. **Análise de nitrogênio total, amoniacal e nítrico em solos.** Lavras: UFLA, 1990. 13 p.

VIEIRA, R. F. **Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas.** Brasília: Embrapa. 2017. 163 p.

WEBER, M. A.; MIELNICZUK, J. Estoque e disponibilidade de nitrogênio no solo em experimento de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 2, p. 429-437, mar./abr. 2009.

WICKRAMASINGHE, K.N.; RODGERS, G.A.; JENKINSON, D.S. Transformations of nitrogen fertilizers in soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v.17, n. 5, p. 625-630, 1985.

ZAVASCHI, E. et al. Ammonia volatilization and yield components after application of polymer-coated urea to maize. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, p. 1200-1206, jul./ago. 2014.

ZHANG, Q. L.; ZHANG, M.; TIAN, W. B. Leaching characteristics of controlled release and common fertilizers and their effects on soil and ground water quality. (Chinese) **Ecology and Environmental Sciences**, Beijing, v. 10, n. 2, p. 98-103, Apr./June. 2001.