



**CLÉRIO HICKMANN**

**DINÂMICA DE NITROGÊNIO E AJUSTES NA  
ADUBAÇÃO NPK PARA UMA SEQUÊNCIA  
MILHO-SOJA-MILHO NA REGIÃO DOS  
CAMPOS DAS VERTENTES, MINAS GERAIS**

**LAVRAS – MG**

**2014**

**CLÉRIO HICKMANN**

**DINÂMICA DE NITROGÊNIO E AJUSTES NA ADUBAÇÃO NPK  
PARA UMA SEQUÊNCIA MILHO-SOJA-MILHO NA REGIÃO DOS  
CAMPOS DAS VERTENTES, MINAS GERAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

Orientador

Dr. Carlos Alberto Silva

Coorientador

Dr. Álvaro Vilela de Resende

**LAVRAS – MG**

**2014**

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e  
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Hickmann, Clério.

Dinâmica de nitrogênio e ajustes na adubação NPK para uma  
sequência milho-soja-milho na região dos Campos das Vertentes,  
Minas Gerais / Clério Hickmann. – Lavras : UFLA, 2014.

159 p. : il.

Tese (doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Carlos Alberto Silva.

Bibliografia.

1. Alta produtividade. 2. Economia da adubação. 3. Créditos de  
N. 4. Eficiência de uso de nutrientes. 5. Solo de fertilidade  
construída. 6. Ureia tratada. I. Universidade Federal de Lavras. II.  
Título.

CDD – 631.811

**CLÉRIO HICKMANN**

**DINÂMICA DE NITROGÊNIO E AJUSTES NA ADUBAÇÃO NPK  
PARA UMA SEQUÊNCIA MILHO-SOJA-MILHO NA REGIÃO DOS  
CAMPOS DAS VERTENTES, MINAS GERAIS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 03 de novembro de 2014.

Dr. Douglas Ramos Guelfi Silva	UFLA
Dr. Messias José Bastos de Andrade	UFLA
Dr. Marcos Alberto Lana	ZALF e.V MUNCHEBERG
Dr. Paulo Tácito Gontijo Guimarães	EPAMIG

Dr. Carlos Alberto Silva  
Orientador

Dr. Álvaro Vilela de Resende  
Coorientador

**LAVRAS – MG**

**2014**

Aos meus pais, Ornélio Luiz Hickmann

e Iria Terezinha Hickmann .....

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Lavras, em especial ao Departamento de Ciência do Solo, por fornecer infraestrutura necessária para o desenvolvimento da pesquisa e pela minha formação profissional.

À Fapemig e Capes, pela concessão da bolsa de estudo e apoio financeiro para realização da pesquisa durante o período do doutorado.

Ao CNPq, processo 308592/2011-5, por financiar parte das ações de pesquisa deste projeto.

À Embrapa Milho e Sorgo, pela oportunidade de desenvolvimento do trabalho de tese no âmbito de projeto da Rede FertBrasil, e pelo apoio na condução dos experimentos.

Ao professor Dr. Carlos Alberto Silva, pelo ensinamento, incentivo, orientação concedida e pelo exemplo de dedicação e seriedade com o qual conduz seus trabalhos.

Ao pesquisador Dr. Álvaro Vilela de Resende, pela orientação, amizade e pelo aprendizado adquirido durante o curso.

Aos proprietários e funcionários da Fazenda Santa Helena, pela cessão da área experimental, insumos e apoio na condução do experimento.

Ao Instituto Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V., em especial aos pesquisadores Dr. Marcos Alberto Lana e Dra. Angelika Wurbs, pelo aprendizado, pela amizade e pelo acolhimento prestado durante minha estadia na Alemanha.

Aos amigos Alexandre, Hugo, Josué, Roneye colegas do Departamento de Ciência do Solo, em especial ao Julian, Breno, Douglas Marques, Douglas Amaral, Rômulo Duarte, Raquel de Oliveira, Amanda, Guilherme Dinali, Eduardo e Daniela, pela amizade e companheirismo.

Aos funcionários do Departamento de Ciência do Solo, pelo auxílio imprescindível nas atividades do cotidiano.

A minha família, pela companhia, pelo amor, pelo apoio e dedicação.

Agradeço a todos que colaboraram de forma direta ou indireta na execução deste trabalho.

## RESUMO GERAL

Em sistemas agrícolas de alta produtividade, a disponibilidade de nutrientes é um dos fatores que mais limita o rendimento de grãos de milho e soja. Existem dúvidas sobre ajustes técnicos e econômicos no manejo da adubação NPK praticada em solos com fertilidade construída sob semeadura direta e sucessão soja-milho. Foi realizado um estudo em campo, numa fazenda localizada no município de Nazareno, na mesorregião dos Campos das Vertentes, MG, e um estudo em casa de vegetação, no Departamento de Ciência do Solo da Universidade Federal de Lavras, MG. O estudo de campo objetivou avaliar a rentabilidade e a eficiência de uso de nutrientes resultantes de diferentes combinações da adubação NPK em três safras sequenciais de milho-soja-milho em semeadura direta, utilizando genótipos de alto potencial produtivo, num Latossolo argiloso com fertilidade construída. Foram comparados quatro níveis de adubação de semeadura e de cobertura, correspondendo a proporções aproximadas de 0,0; 0,5; 1,0 e 1,5 vezes a dose normalmente aplicada pelo agricultor. As fontes de nutrientes variaram conforme os insumos empregados na fazenda em cada safra. Verificou-se que o milho é mais responsivo à adubação do que a soja, sendo os maiores ganhos de produtividade de grãos associados ao fornecimento de N e K, enquanto o P é menos limitante. A combinação mais rentável de nutrientes para o sistema soja-milho envolve incremento nas quantidades de N e K e redução no P em relação à adubação padrão da fazenda, proporcionando lucro de 14% superior e maior eficiência média de uso dos nutrientes fornecidos. No cultivo da soja foi obtido rendimento em grãos acima de 4.000 kg ha<sup>-1</sup>, e no do milho, acima de 11.000 kg ha<sup>-1</sup> na safra que antecedeu a soja, e 13.000 kg ha<sup>-1</sup> de grãos na safra em sucessão à soja. A aplicação de doses de N superiores a 200 kg ha<sup>-1</sup> implica maiores estoques de N mineral no solo, na forma de N-nitrato, até 60 cm de profundidade. O estudo em casa de vegetação objetivou avaliar a interação entre ureias tratadas e resíduos de palhada de soja na superfície do solo sobre a disponibilidade de nitrogênio e eficiência agronômica para o milheto (*Pennisetum glaucum* L.) num Latossolo argiloso. Foram avaliadas as fontes de N: ureia comum (ureia), ureia revestida com S elementar (ureia+S) e as ureias tratadas com inibidores de urease composto-base com B e Cu (ureia+B+Cu) e N-(n-butyl) triamidatofosfórico (ureia+NBPT). Verificou-se que o N mineral disponível no solo com palhada de soja na superfície é maior quando são aplicadas a ureia+S e ureia+NBPT. A eficiência agronômica do N para o milheto é maior para as fontes ureia+S e ureia+NBPT, com ou sem palhada de soja na superfície do solo.

Palavras-chave: Alta produtividade. Economia da adubação. Créditos de N. eficiência de uso de nutrientes. Solo de fertilidade construída. Ureia tratada.



## GENERAL ABSTRACT

In high productivity agricultural systems, nutrient availability is one of the factors that most limit the yield of maize and soy grains. There are doubts on the technical and economic adjustments for the management of NPK fertilization practiced in soils with constructed fertility under direct sowing and soy-maize succession. We conducted a field study in a farm located in the municipality of Nazareno, in the mesoregion of the Campo das Vertentes, MG, Brazil, and a study in greenhouse, in the Department of Soil Science of the Universidade Federal de Lavras, MG. The field study aimed at evaluating the profitability and efficiency of nutrient use resulting from different combinations of NPK fertilization in three sequential harvests of maize-soy-maize in direct sowing, using high productive potential genotypes, in a clayey Oxisol with constructed fertility. We compared four levels of sowing fertilization and top-dressing, corresponding to the approximate proportions of 0.0, 0.5, 1.0 and 1.5 times the dosage normally applied by the farmer. The nutrient sources varied according to the production inputs employed in the farm in each harvest. We verified that the maize is more responsive to fertilization than soy, with the highest grain productivity gains associated to the supplement of N and K, while P is less limiting. The most profitable nutrient combination for the soy-maize system involves the increment of the amounts of N and K and the reduction of P regarding the standard fertilization of the farm, providing a profit 14% superior and higher average efficiency of use for the provided nutrients. In the soy culture, we obtained grain yield above 4,000 kg ha<sup>-1</sup>, and in the maize culture, above 11,000 kg ha<sup>-1</sup> in the harvest preceding the soy, and 13,000 kg ha<sup>-1</sup> of grain in the harvest in succession to the soy. The application of N doses superior to 200 kg ha<sup>-1</sup> implicates in higher mineral N stocks in the soil, in the form of N-nitrate, in up to 60 cm of depth. The study in greenhouse aimed at evaluating the interaction between treated urea and soybean straw residue on the soil surface over the availability of nitrogen and the agronomic efficiency for millet (*Pennisetum glaucum* L.) in a clayey Oxisol. We evaluated the sources of N: common urea (urea), urea overlaid with elemental S (urea+S) and the urea treated with inhibitors of urease base-compound with B and Cu (urea+B+Cu) and N-(n-butyl) triamidatiophosphoric (urea+NBPT). We verified that the availability mineral N available in the soil with soybean straw on the surface is higher when applying urea+S and urea+NBPT. The agronomic efficiency of the N for millet is higher for the urea+S and urea+NBPT sources, with or without soybean straw on the soil surface.

Keywords: High productivity. Fertilization economy. N credits. Nutrient use efficiency. Soil with constructed fertility. Treated urea.

## LISTA DE FIGURAS

### SEGUNDA PARTE ARTIGOS

#### ARTIGO 1

- Figura 1 - Representação das amostragens de solo realizadas em diferentes épocas na sequência soja-pousio-milho. Quantidade de N aplicada nos tratamentos com cultivo do milho ( $\text{kg ha}^{-1}$  de N-semeadura +  $\text{kg ha}^{-1}$  de N-cobertura): T1 (0 Nsem+0Ncob); T2 (28Nsem+66Ncob); T3(28Nsem+198Ncob); T4(57Nsem+ 66Ncob); T5 (57Nsem+ 132Ncob); T6 (57Nsem+ 198Ncob); T7 (83Nsem+ 198Ncob). .....46
- Figura 2 - Precipitações pluviométricas e temperaturas médias mensais observadas durante o período experimental e históricas registradas nos últimos quarenta anos na microrregião de Nazareno, MG ..... 52
- Figura 3 - Estoque de  $\text{N-NH}_4^+$  nas camadas 0-20, 20-40, 40-60 e 0-60 cm, em diferentes épocas de amostragens da sequência da safra de soja 2011/12, pousio, e safra de milho 2012/13. Épocas de amostragem: Out/11 (semeadura da soja); Dez/11 (florescimento da soja); Mar/12 (colheita da soja); Ago/12: (pousio-entressafra); Out/12 (dois dias após semeadura do milho); Nov/12 (17 dias após aplicação de N em cobertura); Jan/13 (enchimento de grãos); Mar/13 (colheita do milho). Tratamentos conforme quantidade de N-fertilizante aplicada na semeadura ( $\text{kg Nsem}$ ) e em cobertura ( $\text{kg Ncob}$ ), no milho cultivado na safra 2012/13. As barras verticais indicam que houve diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo. .... 53

Figura 4 - Estoque de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nas camadas 0-20, 20-40, 40-60 e 0-60 cm, em diferentes épocas de amostragens da sequência da safra de soja 2011/12, pousio e safra de milho 2012/13. Épocas de amostragem: Out/11 (semeadura da soja); Dez/11 (florescimento da soja); Mar/12 (colheita da soja); Ago/12: (pousio-entressafra); Out/12 (dois dias após semeadura do milho); Nov/12 (17 dias após aplicação de N em cobertura); Jan/13 (enchimento de grãos); Mar/13 (colheita do milho). Tratamentos conforme quantidade de N-fertilizante aplicada na semeadura (kg Nsem) e em cobertura (kg Ncob), no milho cultivado na safra 2012/13. As barras verticais indicam que houve diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo. ....55

Figura 5 - Estoque de N mineral nas camadas 0-20, 20-40, 40-60 e 0-60 cm, em diferentes épocas da sequência da safra de soja 2011/12, pousio e safra de milho 2012/13. Épocas de amostragem: Out/11 (semeadura da soja); Dez/11 (florescimento da soja); Mar/12 (colheita da soja); Ago/12: (pousio-entressafra); Out/12 (dois dias após semeadura do milho); Nov/12 (17 dias após aplicação de N em cobertura); Jan/13 (enchimento de grãos); Mar/13 (colheita do milho). Tratamentos conforme quantidade de N-fertilizante aplicada na semeadura (kg Nsem) e em cobertura (kg Ncob), no milho cultivado na safra 2012/13. As barras verticais indicam que houve diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo. ....57

- Figura 6 - Estoque de  $N-NH_4^+$  nas camadas 0-20, 20-40, 40-60 e 0-60 cm, em diferentes épocas em função de tratamentos de adubação nitrogenada na safra de milho 2012/13. Tratamentos conforme as quantidades de N-fertilizante aplicadas na semeadura (kg Nsem) e em cobertura (kg Ncob). As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo..... 59
- Figura 7 - Estoque de  $N-NO_3^-$  nas camadas 0-20, 20-40, 40-60 e 0-60 cm, em diferentes épocas em função de tratamentos de adubação nitrogenada na safra de milho 2012/13. Tratamentos conforme as quantidades de N-fertilizante aplicadas na semeadura (kg Nsem) e em cobertura (kg Ncob). As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey, ao nível 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo..... 61
- Figura 8 - Estoque de N mineral ( $N-NH_4^+ + N-NO_3^-$ ) nas camadas 0-20, 20-40, 40-60 e 0-60 cm, em diferentes épocas em função de tratamentos de adubação nitrogenada na safra de milho 2012/13. Tratamentos conforme as quantidades de N-fertilizante aplicadas na semeadura (kg Nsem) e em cobertura (kg Ncob). As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo. .... 63
- Figura 9 - Teores de N nas folhas e grãos (A) e produtividade de grãos (B) do milho em função de diferentes doses totais de N-fertilizante aplicadas durante o ciclo da cultura. \*,\*\* Significativo ao nível de 5% e 1% de probabilidade pelo teste F..... 69

## ARTIGO 2

- Figura 1.** Teores de K no solo na fase de florescimento e após a colheita, em função de doses de NPK na adubação de semeadura (A e C) e de K<sub>2</sub>O em cobertura (B e D) na cultura da soja. \*,\*\* Significativo no nível de 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F..... 94
- Figura 2.** Produtividade de grãos e quantidade de K exportado em função de níveis de NPK na adubação de semeadura (A e C) e de K<sub>2</sub>O em cobertura (B e D) na cultura da soja. \*,\*\* Significativo ao nível de 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F..... 95

## ARTIGO 3

- Figura 1.** Produtividade de grãos de milho nas safras 2010/2011 (A e B) e 2012/2013 (E e F), e de soja na safra 2011/1012 (C e D), em função de doses de adubação na semeadura e em cobertura. \*\* Significativo no nível de 1% de probabilidade pelo teste F. .... 118
- Figura 2.** Produtividade acumulada de grãos das safras milho-soja-milho em função de doses cumulativas de N (A) e de K<sub>2</sub>O (B) aplicadas no sistema. DMET= dose para máxima eficiência técnica; DMEE= dose para máxima eficiência econômica. \*\* Significativo no nível de 1% de probabilidade pelo teste F. .... 122

#### ARTIGO 4

- Figure 1.** Quantity of N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (A), N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (B) and N-mineral (C) in soil 21 days after application of different types of N sources and with presence and absence of soybean residues on a soil with high moisture surface. Values with same lower case letters do not differ among the N source, while same upper case letters, for each urea source, do not differ in terms of presence or absence of soybean residues, according Scott Knot test at P ≤ 0.05..... 145
- Figure 2.** N accumulated of root (Fig. A), N accumulated of shoot (Fig. B), N accumulated of total plants (Fig. C), root dry mass (Fig. D), shoot dry mass (Fig. E) and total dry mass (Fig. F) of pearl millet plants (g.pot<sup>-1</sup>) cultivated in pots during 59 days. Values with same lower case letters do not differ among the N source, while same upper case letters do not differ from presence or absence of residues according Scott Knot test at 5% of probability. The absence of letters indicates no statistical interaction..... 147
- Figure 3.** (A) Physiological efficiency (g.g<sup>-1</sup>), (B) N accumulated relative efficiency (%) and (C) relative agronomic efficiency (%) of pearl millet plants cultivated during 59 days in pots with different N sources. Values with same lower case letters do not differ among the N source, while same upper case letters do not differ from presence or absence of residues according Scott Knot test at 5% of probability. The absence of letters indicates no statistical interaction..... 152

## LISTA DE TABELAS

### SEGUNDA PARTE – ARTIGOS

#### ARTIGO 1

- Tabela 1 - Caracterização química e textura do solo da área experimental, na profundidade de 0 a 20 cm, após a semeadura da soja 2011/12..... 41
- Tabela 2 - Produtividade de grãos e massa seca da parte aérea (MSPA), em função da quantidade total de nutrientes N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O aplicados na semeadura e em cobertura potássica, nos tratamentos investigados no cultivo da soja, no ano agrícola 2011/12..... 44
- Tabela 3 - Quantidade de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O aplicada na semeadura e em cobertura, em função dos tratamentos investigados no cultivo do milho em sucessão à soja, no ano agrícola 2012/13..... 45
- Tabela 4 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os estoques de N-NH<sub>4</sub><sup>-</sup>, N-NO<sub>3</sub>, e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>+ N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no solo, os 17 dias após aplicação de N-fertilizante em cobertura, teor foliar de N no florescimento, a produtividade de grãos, o teor de N nos grãos e a exportação do nutriente pelo milho 2012/13 ..... 67
- Tabela 5 - Estimativa do balanço de N para o sistema soja/milho, calculado pela diferença entre a entrada (N-residual da palhada da soja, fertilizante aplicado e FBN) e a saída de N (exportado via grãos e perdas no sistema solo-planta) ..... 70

## ARTIGO 2

- Tabela 1.** Caracterização química e física do solo da área experimental, na profundidade de 0 a 20 cm, antes da adubação de cobertura com potássio.....90
- Tabela 2.** Resumo da análise de variância para os teores de K no solo, nas folhas e nos grãos, K total exportado e produtividade da soja em função de adubações NPK na semeadura e da cobertura potássica .....92
- Tabela 3.** Teores de K ( $\text{g kg}^{-1}$ ) nas folhas e nos grãos da soja, em função de doses de NPK na adubação de semeadura e de  $\text{K}_2\text{O}$  em cobertura.....93
- Tabela 4.** Rentabilidade decorrente dos tratamentos de adubação NPK na semeadura e de cobertura potássica na soja. ....101

## ARTIGO 3

- Tabela 1.** Atributos químicos, textura e densidade do Latossolo Vermelho-Amarelo, na camada de 0 a 20 cm de profundidade, antes da implantação do experimento .....112
- Tabela 2.** Quantidades de fertilizantes aplicados na semeadura (SEM) e em cobertura (COB) e total de nutrientes fornecidos a cada safra, conforme os tratamentos de adubação\* .....114
- Tabela 3.** Resumo da análise de variância para a produtividade de grãos em função de doses de adubação na semeadura e em cobertura na rotação milho-soja-milho.....117
- Tabela 4.** Rentabilidade e eficiência de uso de nutrientes (EUN) na resposta cumulativa ao fornecimento de N,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{K}_2\text{O}$  no sistema milho-soja-milho .....126



**ARTIGO 4**

**Table 1.** Characterization of the Ferralsol used in the experiment..... 139

**Table 2.** Nutrients accumulated ( $\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$ ) in shoot of pearl millet plants cultivated in pots with presence or absence of soybean residues on soil surface. .... 148

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b>	
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> ..... 18
	<b>REFERÊNCIAS</b> ..... 28
<b>SEGUNDA PARTE – ARTIGOS</b> ..... 32	
	<b>ARTIGO 1</b> Dinâmica de nem solo e planta e sua relação com o rendimento de grãos de milho em sucessão à soja, em função da aplicação de Npk em Latossolo de fertilidade construída..... 32
	<b>ARTIGO 2</b> Resposta da soja de alta produtividade à adubação em solo com elevado teor de potássio ..... 83
	<b>ARTIGO 3</b> Rentabilidade e eficiência da adubação num sistema milho-soja-milho em Latossolo de fertilidade construída ..... 107
	<b>ARTIGO 4</b> Urea sources-soybean residues interaction: effect on the soil mineral nitrogen and n agronomic efficiency use by pearl millet in a Brazilian Ferralsol ..... 132

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO

A agricultura brasileira consumiu 3, 4; 4,3 e 4,8 milhões de toneladas de nutrientes N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, respectivamente, no ano de 2012. Somente as culturas da soja e do milho, as que consomem mais fertilizantes no país, foram responsáveis por 32,5 e 19,9% do montante consumido, respectivamente. No mesmo ano, o Brasil importou 80,2% de N; 53,3% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 93,6% de K<sub>2</sub>O dos nutrientes utilizados (INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION, 2012). A perspectiva é de aumento anual na demanda dos nutrientes em cerca de 4,3% para N e K<sub>2</sub>O, e de 4,5% para o P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, até o ano 2020 (LOPES et al., 2010). Apesar de as reservas mundiais dos três principais macronutrientes parecerem adequadas para o futuro previsível, a extração vai se tornando mais cara à medida que as reservas mais viáveis de exploração se esgotam. Isso torna importante a implementação de estratégias do manejo de fertilizantes que promovam aumento na eficiência de uso dos nutrientes.

O conceito de eficiência do uso de fertilizantes (EUF), que relaciona o aumento da produção das culturas por unidade de nutriente aplicado (LOPES; GUILHERME, 2000), vem adquirindo importância cada vez maior na agricultura brasileira, em decorrência da elevação dos custos de produção e da necessidade de redução do impacto ambiental gerado na produção agrícola. O aumento da EUF depende do conjunto de fatores associados ao sistema de manejo do solo, com destaque para o mínimo revolvimento do solo na operação da semeadura, adoção da rotação de culturas e manutenção da palhada na superfície do solo. Esses componentes de manejo interferem na ciclagem de nutrientes, na manutenção ou aumento da matéria orgânica do solo (MOS) e, por conseguinte, na melhoria das características físicas, químicas e biológicas do

solo, que resultarão no aumento da produtividade de grãos das culturas (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2010).

É cada vez mais comum encontrar talhões de produção comercial de grãos em Latossolos do Cerrado com elevada disponibilidade de P e K remanescente, devido ao efeito residual das adubações aplicadas nos cultivos, ao longo dos anos, sob sistema plantio direto (SPD) (MATIAS et al., 2009; LOURENTE et al., 2011; SANTOS et al., 2013; WILDA, 2014). No entanto, apesar de o nível de fertilidade do solo ser interpretado como alto em muitas lavouras, os agricultores continuam adubando com quantidades fixas de N, P e K, por temerem redução das produtividades e desejarem altos rendimentos com a aplicação de doses extras de nutrientes. Essa prática tem resultado em adubações desnecessárias ou superdimensionadas, com baixa EUF, o que pode levar ao desperdício de quantidades consideráveis de fertilizantes (Benites et al., 2010) e redução de lucro.

As produções da soja e de milho alcançaram 82,4 e 86,7 milhões de toneladas de grãos, respectivamente, no ano agrícola 2013/14, em áreas cultivadas equivalentes a 30,1 milhões de hectares (ha) para a soja, e 15,7 milhões de ha para o milho. A média nacional em produtividade de grãos ficou em 2,9 t ha<sup>-1</sup> para a soja e 5,1 t ha<sup>-1</sup> para o milho (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS, 2014). Apesar dessa produtividade média de milho no Brasil situar-se abaixo da média estimada de 10 t ha<sup>-1</sup> nos Estados Unidos - o maior produtor mundial de milho e soja - a produtividade brasileira de soja foi superior às 2,7 t ha<sup>-1</sup> estimadas naquele país (UNITED STATES DEPARTMT OF AGRICULTURE, 2014). Isso demonstra que o Brasil possui um sistema produtivo de soja competitivo com os maiores produtores mundiais da oleaginosa. No caso do milho, o potencial produtivo da safra de verão em lavouras tecnificadas é muito maior que a produtividade média nacional, sendo comuns colheitas acima de 12 t ha<sup>-1</sup>, quando as condições climáticas são

favoráveis. Juntas, as culturas de milho e soja representam atualmente cerca de 80% da produção brasileira de grãos (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS, 2014).

Com o avanço da tecnologia no aumento da eficiência do sistema produtivo de grãos, a introdução da soja em rotação ou sucessão com o milho tornou-se uma alternativa viável, pelo benefício que o N residual pode proporcionar para o milho cultivado em sequência. Resultados de pesquisa destacam a importância dos créditos de N ofertados pela soja no suprimento da demanda do milho, permitindo, em alguns casos, até dispensar sua aplicação nos cultivos em sucessão (MASCARENHAS et al., 1993; ALVES et al., 2006). Entretanto, muitos estudos foram conduzidos em condições de solo revolvido e com suprimento de pequenas doses de N via fertilizantes, não abrangendo a nova realidade da agricultura moderna de altas produtividades. No cenário atual, a maioria dos solos agricultáveis se encontra sob SPD e apresentam considerável reserva de nutrientes, resultantes de um conjunto de fatores que envolveram a correção da acidez do solo e aplicações sucessivas de adubação de manutenção e reposição de nutrientes no longo prazo, ou seja, em construção da fertilidade do solo (RESENDE et al., 2012).

A quantidade de N ofertada pela soja como crédito de N para a cultura subsequente é decorrente da alta capacidade acumuladora do nutriente apresentada pelas leguminosas, atribuída à fixação biológica (FBN), que pode representar cerca de 85% do N acumulado na fitomassa (AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002). A baixa relação C/N e o alto teor de N na palhada dessas espécies faz com que a disponibilidade de N tenha efeito imediato para a safra seguinte, decorrente da rápida decomposição e mineralização dos resíduos culturais. Essa liberação rápida do nutriente é indesejável para o aumento da eficiência de utilização de nitrogênio (EUN), devido ao assincronismo gerado entre a oferta do N e a absorção pelas plantas da safra seguinte, em regiões

tropicais com restrições climáticas associadas a períodos de déficit hídrico (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

Entre os nutrientes de maior uso na agricultura brasileira, o N apresenta maior complexidade, associada ao seu manejo e dinâmica complexa no sistema solo-planta. Sob condições naturais, o N do compartimento solo é resultado da fixação biológica e/ou da decomposição dos resíduos animais e vegetais e da matéria orgânica do solo (MOS). A maior fração do N total está contida na MOS, que é relativamente estável e não diretamente disponível para as plantas. Esse N torna-se disponível ao ser mineralizado pelos microrganismos presentes no solo. Entretanto, a quantidade de N liberada é pequena, dado que a taxa de mineralização da MOS é da ordem de 1 a 3% ao ano, e varia conforme as práticas de manejo do solo e das condições ambientais (BELOW, 2002). Como resultado disso, é necessária a adição de N via fertilizantes, para otimizar o crescimento e o rendimento das culturas, sobretudo gramíneas. Na definição das doses de N-fertilizante mineral, é preciso considerar, assim, os teores de MOS, o esquema de rotação, o aporte de N pela cultura anterior (AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002) e, ainda muito pouco estudado no Brasil, a disponibilidade de N mineral no solo, ao longo do ciclo de crescimento do milho.

Atualmente existem no mercado várias opções de fertilizantes nitrogenados convencionais, como é o caso das formas amídicas (ureia), amoniacal ou nítrica, e os denominados fertilizantes estabilizados de liberação lenta ou controlada (CANTARELLA, 2007). No entanto, esta classe de fertilizantes tem aumentado a eficiência de uso somente em situações específicas de manejo, onde há condições favoráveis de perdas de nitrato por lixiviação, e poucos resultados expressivos têm sido alcançados quanto ao aumento de produtividade das culturas (ZAVASCHI et al., 2014). Há interesse crescente no uso, como consequência da necessidade de aumentar a eficiência de uso do N e

reduzir o impacto ambiental das atividades agrícolas, apesar de o preço de mercado ser mais alto por unidade de N do que o dos fertilizantes convencionais (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

O N pode ser absorvido pelas plantas por duas formas: nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ) ou amônio ( $\text{N-NH}_4^+$ ). Os fertilizantes nitrogenados podem conter relações variadas entre essas duas formas ou mesmo imprimir em solo razões diferenciadas das formas amoniacal e nítrica. Porém, em solos tropicais, as altas temperaturas e o solo mais arejado favorecem a rápida oxidação do  $\text{N-NH}_4^+$  para  $\text{N-NO}_3^-$ , o que torna o  $\text{N-NO}_3^-$  a forma mais disponível no solo e, por conseguinte, a mais absorvida pelas plantas, independentemente da fonte aplicada (CANTARELLA, 2007). Por ser suscetível às perdas por erosão superficial e lixiviação em profundidade, o  $\text{N-NO}_3^-$  também está associado às maiores perdas de N no solo, podendo alcançar as águas superficiais e do lençol freático. A Organização Mundial da Saúde estipulou um teto de  $50 \text{ mg L}^{-1}$  de  $\text{NO}_3^-$  para a água considerada potável. Teores acima desse valor na água consumida teriam ligação com o aparecimento de vários casos de metahemoglobinemia em crianças e cânceres de estômago em pessoas adultas (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2011). Por outro lado, o  $\text{N-NO}_3^-$  também tem papel importante na eutrofização de águas superficiais e estuários, constatados em países do hemisfério norte. Em regiões com lençol freático superficial e intenso uso de N-fertilizante, como ocorre nos Estados Unidos e na União Europeia, as medidas de controle dos níveis de  $\text{N-NO}_3^-$  na água têm provocado mudanças no manejo do solo e da adubação, e a busca por métodos efetivos para prever a disponibilidade de N no solo (HOWARTH; MARINO, 2006).

Entretanto, o risco de contaminação do lençol freático por lixiviação de  $\text{N-NO}_3^-$  é considerado baixo na agricultura brasileira (OLIVEIRA; VILELA; AYARZA, 2000; CABEZAS; SOUZA, 2008). Condições pouco favoráveis à

lixiviação do  $\text{N-NO}_3^-$  e imobilização temporária do N do fertilizante pela microbiota do solo, em sistemas com alta atividade microbiana, colaboram para reter o N na camada superficial (CANTARELLA, 2007). Esse autor reuniu dados de vários experimentos onde se avaliou a lixiviação de  $\text{N-NO}_3^-$ , os quais foram realizados com fertilizantes marcados por  $^{15}\text{N}$ , de modo que se observou que as quantidades de  $\text{N-NO}_3^-$  lixiviadas no Brasil são reduzidas. Segundo o autor, a aplicação de baixas doses de fertilizantes nitrogenados e o manejo tradicional, na maioria das culturas que envolvem o parcelamento de fertilizantes, reduzem as perdas de  $\text{N-NO}_3^-$  por lixiviação.

À medida que a agricultura se intensifica com o lançamento de novos genótipos de milho no mercado, o consumo de N tende a aumentar, em razão da maior exigência dessas cultivares de alta produtividade. Com isso, o manejo da adubação nitrogenada se torna mais complexo, demandando aprimoramentos para aumentar sua eficiência de uso, considerando-se a influência das culturas componentes dos sistemas de produção regionais. A EUN é inversamente proporcional às doses aplicadas (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

Devido ao baixo efeito residual, elevada dinâmica complexa, exigência das culturas e à aplicação de altas doses de N-fertilizante aplicadas nas lavouras, o manejo do nutriente demanda o parcelamento das adubações, em maior número de vezes que dos outros nutrientes. Dentre os fatores que tornam o N o principal nutriente limitante à cultura do milho, pode ser citado a sua participação em enzimas essenciais que estimulam o crescimento e desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular, na fotossíntese, no aumento do teor de proteínas e no ganho de peso por espiga (FANCELLI; DOURATO NETTO, 2000).

Ao contrário do N, o P e K têm a sua dinâmica mais conhecida e menos complexa no sistema solo-planta. A disponibilidade de P e K em muitos talhões de solos argilosos com fertilidade construída, muito possivelmente, permitiria



reduzir o fornecimento de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  na adubação de manutenção, por uma ou mais safras, sem perda de produtividade. Os efeitos do manejo do solo no SPD aumentaram a eficiência de recuperação do P e K concentrados na camada de 0-10 cm (RESENDE et al., 2012). A principal razão é atribuída ao aumento dos estoques de MOS e, por conseguinte, o aumento da CTC, que resulta na redução da adsorção de ânions  $H_2PO_4^-$  e o aumento da adsorção eletrostática do cátion  $K^+$  na fase sólida do solo, o que implica aumento da disponibilidade de P e K para as plantas (MIELNICZUK, 2005; OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2010). Segundo Zancanaro e Kappes (2013), o conceito de fertilidade de solo construído é atribuído aos solos que no início do seu cultivo apresentavam limitações ao crescimento e desenvolvimento das culturas de interesse e que, devido ao manejo adotado ao longo de um tempo, passam a apresentar condições físicas, biológicas e químicas adequadas, o que permite às culturas expressarem o seu potencial produtivo no ambiente considerado.

São bem conhecidos os níveis críticos de P e K nos solos das principais regiões agrícolas do Brasil. Com o aumento dos seus teores acima do nível crítico, não se espera respostas em produtividade que possam gerar ganhos econômicos para milho e soja, bastando repor somente a quantidade de nutrientes exportada com a colheita, considerando-se as perdas (SOUSA; LOBATO, 2004; PAULETTI et al., 2010). Mesmo assim, essas premissas precisam ser aferidas para as condições dos sistemas de produção implantados nas diferentes regiões produtoras do Brasil.

A recomendação de fertilizantes em doses fixas muitas vezes é motivada pela desatualização das tabelas de adubação. Com o avanço do SPD nas últimas décadas no Brasil Central, há relatos de produtividades de grãos de soja e milho superiores a  $4.000 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $12.000 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente, em lavouras comerciais com solo de fertilidade já construída. Em Minas Gerais, as recomendações oficiais de fertilizantes NPK limitam-se a produtividades

esperadas de até 3 t ha<sup>-1</sup> para o cultivo da soja (NOVAIS, 1999), e de 8 t ha<sup>-1</sup> para o milho (ALVES et al., 1999), e foram estabelecidas a partir de sistemas de semeadura convencional. Nesse contexto, é preciso aprimorar as recomendações regionalmente, uma vez que a reserva de nutrientes construída nos solos ao longo do tempo depende das condições edafoclimáticas e histórico de uso e condições de manejo do solo (AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002).

Outro aspecto importante nos sistemas produtivos modernos é a sua viabilidade econômica, geralmente associada a estreitas margens de lucro, mesmo quando manejados adequadamente. No cultivo de grãos, os custos contemplam todos os gastos relacionados direta ou indiretamente com a cultura, tais como sementes, fertilizantes, corretivos, defensivos, combustíveis e mão-de-obra. No entanto, a adubação é o fator de maior peso, representando cerca de 27% do custo total de produção de milho ou soja de alta tecnologia na região sudeste do Brasil (INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA, 2014). O conhecimento da contabilidade de custos da adubação, associado aos aspectos agrônomico e ambiental, pode auxiliar o técnico na definição da melhor quantidade de fertilizantes a ser aplicada.

O conceito de milho e soja de alta tecnologia se aplica à adoção conjunta de fatores relacionados à melhoria no manejo do solo (adoção do sistema plantio direto e rotação de culturas), aumento do uso eficiente de fertilizantes, emprego de cultivares transgênicas e adoção de genótipos com maior potencial de rendimento de grãos, resultado de ajustes no arranjo espacial de plantas (espaçamento e população), seleção de cultivares de baixo porte e com baixa inserção de espigas (CRUZ et al., 2010). Além dessas características, a seleção de plantas de maior proporção de grãos, em relação à matéria seca de colmos, resultou em plantas mais produtivas e com menor índice de acamamento, portanto, mais adaptadas à colheita mecânica, tornando possível a mudança de patamares para altas produtividades de grãos (CRUZ et al., 2010).

A mesorregião Campo das Vertentes, MG, vem se consolidando como um dos polos importantes de produção de grãos no estado. Nessa região, o uso de cultivares de soja precoce de hábito de crescimento indeterminado, no qual o crescimento vegetativo ocorre simultaneamente com o desenvolvimento dos estádios reprodutivos da floração, frutificação e granação (CÂMARA, 2014) configuram-se como opção promissora para a rotação com milho em SPD, além de viabilizar outras culturas em segunda safra. A cultura foi introduzida recentemente na região, ocupando somente 4,5% das lavouras de grãos em 2012, enquanto o cultivo milho, principal componente de rotação com soja, representou 60% das áreas agrícolas (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS, 2014). Assim, são requeridos estudos locais visando ao manejo eficiente de nutrientes, dadas as particularidades de solo, clima, sistemas de cultivo, níveis de adubação e materiais genéticos utilizados nas lavouras. Justificam-se estudos mais particularizados, visando identificar níveis de adubação e práticas econômicas de manejo que conciliem alta produtividade de grãos, retorno, uso eficiente de fertilizantes e manutenção da fertilidade do solo ao longo do tempo.

Diante do exposto, neste trabalho, buscou-se gerar informações de manejo da adubação para um sistema de produção de grãos de soja e milho em semeadura direta na região dos Campos das Vertentes – MG, por meio de experimentos conduzidos com os seguintes objetivos: i) avaliar a influência do cultivo de soja e de doses de adubação NPK na disponibilidade de N no solo e balanço do nutriente numa sequência de safras soja-milho; ii) verificar se a soja de hábito de crescimento indeterminado responde à adubação com P e K em solo de fertilidade construída; iii) avaliar a produtividade e a rentabilidade resultantes de diferentes combinações de adubação NPK e a eficiência de uso de nutrientes em safras consecutivas de milho-soja-milho e iv) avaliar, em casa de vegetação, a eficiência agrônoma da aplicação de ureia comum, ureia revestida com S

elementar e ureias tratadas com inibidores de urease (NBPT e componentes a base de B e Cu) para o milheto, com ou sem resíduos de palhada de soja na superfície do solo. No sentido de alcançar os objetivos, foram realizados quatro estudos descritos a seguir na forma de artigos.

## REFERÊNCIAS

ALVES V. M. C. et al. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: SBSC, 1999.

ALVES, B. J. R. et al. Fixação biológica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 449-456, mar. 2006.

AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 241-248, jan./mar. 2002.

BELOW, F. E. **Fisiologia, nutrição e adubação nitrogenada do milho**. Piracicaba: Potafos, 2002. (Informações Agronômicas, 99).

BENITES, V. M.; POLIDORO, J. C.; RESENDE, A. V. Oportunidades para a inovação tecnológica no setor de fertilizantes no Brasil. **Boletim Informativo da SBSC**, Viçosa, p. 18-21, set./dez. 2010. Disponível em: <<http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/907432>>. Acesso em: 20 nov. 2014.

CABEZAS, W. A. R. L.; SOUZA, A. M. Volatilização de amônia, lixiviação de nitrogênio e produtividade de milho em resposta à aplicação de misturas de uréia com sulfato de amônio ou com gesso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2331-2342, Nov./dez. 2008.

CÂMARA, G. M. S. **Fixação biológica de nitrogênio em soja**. Piracicaba: IPNI, 2014. (Informações agronômicas, 147).

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.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: IPNI, 2010. p. 05-46.

CRUZ, J. C. et al. **Sistema de produção, 1**. 6. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2010. Disponível em: <[http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho\\_6\\_ed/manejo\\_milho.htm](http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/manejo_milho.htm)>. Acesso em: 10 nov. 2014.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000.

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

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home>>. Acesso em: 29 set. 2014.

INSTITUTO MATO-GROSSENSE DE ECONOMIA AGROPECUÁRIA. **Custo de produção do milho e soja em setembro de 2013**. Mato Grosso: IMEA, 2014. Disponível em: <[http://www.imea.com.br/upload/publicacoes/arquivos/R410\\_2013\\_01\\_CPMilho.pdf](http://www.imea.com.br/upload/publicacoes/arquivos/R410_2013_01_CPMilho.pdf)>. Acesso em: 29 set. 2014.

INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION. **Nitrogen, phosphate and potassium statics**. Paris: IFA, 2012. Disponível em: <<http://www.fertilizer.org/Statistic>>. Acesso em: 29 set. 2014.

LOPES, A. S. et al. Suprimento e extensão das reservas de nutrientes no Brasil. In: PROCHNOW, L.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: IPNI, 2010. p. 283-307.

LOPES, A.; GUILHERME, L. Uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas: aspectos agrônômicos. **Boletim Técnico**, São Paulo, n. 4, p. 72, set. 2000.

LOURENTE, E. R. P. et al. Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 20-28, jan./mar. 2011.

MASCARENHAS, H. A. A. et al. Sistemas de rotação de culturas de milho, algodão e soja e seu efeito sobre a produtividade. **Bragantia**, Campinas, v. 52, n. 1, p. 53-61, jan./jul. 1993.

MATIAS, M. C. B. et al. Propriedades químicas em Latossolo Amarelo de Cerrado do Piauí sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 40, n. 3, p. 356-362, jul./set. 2009.

- MIELNICZUK, J. Manejo conservacionista da adubação potássica. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. (Ed.). **Potássio na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2005. p. 165-178.
- NOVAIS, R. F. Soja. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V. V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 323-324.
- OLIVEIRA JÚNIOR, A. et al. Soja. In: PROCHNOW, L.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: IPNI, 2010. p. 283-307.
- OLIVEIRA, J. R. A.; VILELA, L.; AYARZA, M. A. Adsorção de nitrato em solos de cerrado do Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 6, p. 1199-1205, jun. 2000.
- PAULETTI, V. et al. Yield response to fertilization strategies in no-tillage soybean, corn and common bean crops. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 53, n. 3, p. 563-574, maio/jun. 2010.
- RESENDE, A. V. et al. **Fertilidade do solo e manejo da adubação NPK para alta produtividade de milho no Brasil Central**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2012. (Circular Técnica, 181).
- SANTOS, L. P. D. et al. Doses de nitrogênio na cultura do milho para altas produtividades de grãos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 12, n. 3, p. 270-279, 2013.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Calagem e adubação para culturas anuais e semiperenes. In: SOUSA, D. M. G. LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 283-315.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Foreign agriculture service**. [S.l.], USDA, 2014. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/data/oilseeds-world-markets-and-trade>>. Acesso em: 29 set. 2014.
- WILDA, R. L. M. **Amostragem georreferenciada e aplicação à taxa variável de corretivos e fertilizantes: dinâmica da fertilidade do solo em lavoura de grãos do cerrado**. 2014. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking-water quality**. 4. ed. Washington: WHO, 2011.

ZACANARO, L.; KAPPES, C. **Manejo da adubação em solos com fertilidade construída**. 2013. Palestra. Disponível em: <[http://cbcs2013.com.br/palestras/S15a\\_Leandro%20Zancanaro.pdf](http://cbcs2013.com.br/palestras/S15a_Leandro%20Zancanaro.pdf)>. Acesso em: 24 nov. 2014.

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.



**SEGUNDA PARTE – ARTIGOS**

**ARTIGO 1 Dinâmica de nem solo e planta e sua relação com o rendimento de grãos de milho em sucessão à soja, em função da aplicação de Npk em Latossolo de fertilidade construída**

Clério Hickmann<sup>\*1</sup>

Carlos Alberto Silva<sup>1</sup>

Álvaro Vilela de Resende<sup>2</sup>

Julian Junior Jesus Lacerda<sup>1</sup>

Antonio Eduardo Furtini Neto<sup>1</sup>

**Artigo formatado de acordo com a NBR 6022 (ABNT, 2003), segundo as exigências do manual de normalização de trabalhos acadêmicos da UFLA.**

---

<sup>\*.1</sup> Universidade Federal de Lavras, Caixa Postal 3037, CEP 37.200-000, Lavras, MG, Brasil, [clerioh@gmail.com](mailto:clerioh@gmail.com), [csilva@dcs.ufla.br](mailto:csilva@dcs.ufla.br), [julianlacerda@gmail.com](mailto:julianlacerda@gmail.com)

<sup>2</sup> Embrapa Milho e Sorgo, Caixa Postal 285, CEP 35.701-970, Sete Lagoas, MG, Brasil, [alvaro.resende@embrapa.br](mailto:alvaro.resende@embrapa.br)

## RESUMO

Devido à complexidade da dinâmica do nitrogênio (N) no sistema solo-planta, ainda existem dúvidas quanto à recomendação da adubação nitrogenada visando à alta produtividade de grãos em solos de fertilidade construída em semeadura direta. Nesse sentido, objetivou-se estimar a contribuição do cultivo da soja na disponibilidade de N mineral no solo, a dinâmica das formas  $\text{N-NH}_4^+$  e  $\text{N-NO}_3^-$  e o balanço de N para um sistema soja-pousio-milho em semeadura direta, sob influência de doses de adubação NPK, na região dos Campos das Vertentes, Minas Gerais. Foram comparados sete tratamentos com diferentes níveis de adubação de semeadura e de cobertura, correspondendo a proporções aproximadas de 0,0; 0,5; 1,0 e 1,5 vezes à dose normalmente aplicada pelo agricultor nos cultivos do milho e da soja. As fontes de nutrientes variaram conforme os insumos empregados na fazenda a cada safra. Foram coletadas amostras de solo em diferentes épocas e profundidades para quantificar o N mineral no solo, e amostras de folhas no florescimento e grãos na colheita para quantificação dos teores de N. Foram estimados os estoques de N mineral no solo, determinadas suas relações com o estado nutricional e a produtividade das culturas, e compatibilizadas as informações para estimativa do balanço de N no sistema solo-planta. O  $\text{N-NO}_3^-$  é a forma de N mineral disponível que predomina no solo até 60 cm de profundidade, independentemente da época de coleta de solo na sequência soja-pousio-milho. A absorção do nutriente pelas culturas promove sensível redução nos estoques de N-mineral no perfil nas fases de florescimento e enchimento de grãos. O N mineral no solo quantificado aos 17 dias após a adubação de cobertura, em especial a forma  $\text{N-NO}_3^-$ , regula os teores de N em folhas e grãos, a produtividade de milho e a exportação do nutriente na colheita, podendo servir como índice complementar para refinamento do manejo da adubação nitrogenada para a cultura. O rendimento de grãos de milho é maior conforme o aumento da dose de N-fertilizante, com estimativa de máximo retorno econômico para aplicações de cerca de  $160 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. O cultivo de soja pode acrescentar um crédito de  $31 \text{ kg ha}^{-1}$  de N no sistema solo-planta, mas o balanço no cultivo do milho foi negativo nas doses de adubação abaixo de  $189 \text{ kg ha}^{-1}$  e positivo para doses maiores do que  $226 \text{ kg ha}^{-1}$  de N-fertilizante. A aplicação de doses acima de  $190 \text{ kg ha}^{-1}$  de N-fertilizante pode resultar em perdas de  $\text{N-NO}_3^-$  para camadas profundas de solo sem alcance do sistema radicular das culturas, o que representa risco de

contaminação ambiental e de redução da eficiência de uso de fertilizantes nitrogenados.

Palavras-chave: Créditos de N. Balanço de N. Rotação de culturas. Rendimento de grãos. Eficiência de uso de N.

## 1 INTRODUÇÃO

Em sistemas agrícolas de alta produtividade, o estande de plantas e a disponibilidade de nitrogênio (N) são os fatores que mais limitam o rendimento da cultura do milho (RESENDE et al., 2012). Em épocas com condições climáticas favoráveis para o cultivo, o requerimento de N pela cultura pode superar  $200 \text{ kg ha}^{-1}$ , para expectativa de produtividade acima de  $12 \text{ t ha}^{-1}$  (RESENDE et al., 2012). Nas condições edafoclimáticas de Minas Gerais, essa demanda de N não pode ser suprida exclusivamente pelo solo. No entanto, é conveniente que se busquem ajustes locais das doses para o cultivo do milho de alto rendimento, considerando-se as características do sistema de produção utilizado. Além disso, o uso de altas doses de N pode requerer aplicações parceladas (DUETE et al., 2008).

Altas produtividades de grãos são alcançadas em lavouras onde o solo teve a fertilidade construída sob plantio direto com rotação de culturas. Com esse histórico, há no sistema outros aportes de N que precisam ser contabilizados, notadamente, o N oriundo da matéria orgânica do solo (MOS), da palhada da cultura anterior, da fixação biológica de N (FBN) e de outros compartimentos ainda não completamente mensurados (AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002). Assim, ao se recomendar N, é preciso considerar todos os compartimentos e aportes que a cultura do milho poderia aproveitar, para que a eficiência de uso do fertilizante nitrogenado (EUN) seja maximizada, com o mínimo impacto ambiental. Com essa perspectiva, é oportuno conhecer melhor a dinâmica do N mineral no solo, que se

apresenta em formas solúveis e propensas à lixiviação, principalmente em condições de elevadas precipitações concentradas em curto intervalo de tempo.

Apesar de o efeito de doses de N ser bastante difundido em vários estudos, o balanço de massa e de compartimentos que suprem o nutriente para a cultura do milho ainda não foi completamente elucidado nas condições de cultivo do Brasil, principalmente quando altas produtividades são almejadas. Em estudo realizado na região do Alto Paranaíba, MG, observou-se teores de N nas folhas de cerca de  $35 \text{ g kg}^{-1}$  no milho híbrido Pioneer P3646H cultivado em Latossolo Vermelho argiloso, em cultivo que se adotou elevado nível tecnológico no manejo do solo e tratos culturais para o cultivo de milho safrinha, com produtividade acima de  $7.400 \text{ kg ha}^{-1}$  (GOTT et al., 2014). Em outro trabalho realizado na mesma região e classe de solo, Santos et al. (2013) avaliaram o desempenho do milho híbrido Pioneer P30F53H com aplicação de doses crescentes de N, até  $370 \text{ kg ha}^{-1}$ , para o cultivo da safra de verão. Os autores observaram que as doses para máxima produtividade física e econômica foram de  $316$  e  $228 \text{ kg ha}^{-1}$  de N aplicado, que resultaram, respectivamente, em  $14.552$  e  $14.279 \text{ kg ha}^{-1}$  de grãos. Entretanto, os teores foliares foram de  $29,7$  e  $28,3 \text{ g kg}^{-1}$  nas respectivas produtividades de grãos, sendo menores que o observado por Gott et al. (2014), ao aplicarem somente  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. No Sul do Brasil, Ferreira et al. (2009) avaliaram diferentes genótipos de milho em Latossolo Vermelho de elevada fertilidade e obtiveram a máxima produtividade de grãos igual a  $10.593 \text{ kg ha}^{-1}$ , ao aplicarem  $168 \text{ kg ha}^{-1}$  de N-fertilizante, com máximo teor foliar de N igual a  $30 \text{ g kg}^{-1}$ , na dose de  $225 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. Verifica-se,

portanto, que as respostas do milho à adubação nitrogenada variam de uma região para outra.

Com a crescente adoção do SPD nos últimos anos no Brasil Central, o suprimento de N para culturas não leguminosas se tornou bastante complexo. A principal razão se deve à quantidade e à qualidade do resíduo remanescente das culturas anteriores, que podem disponibilizar ou imobilizar N no solo para as culturas seguintes. Há também efeito do aumento gradual dos estoques de MOS em sistemas não revolvidos, o que acentua o papel do solo como fonte natural de N para as plantas (AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002; WENDLING et al., 2007). Esses aspectos tornam fundamental a adequação no fornecimento de N para as espécies não leguminosas, com impactos econômicos e ambientais, em razão da alta resposta à aplicação desse nutriente e da facilidade de perdas pelos processos de volatilização e lixiviação (AITA et al., 2004; GABEZAS et al., 2005; PEREIRA et al., 2009).

Trabalhos realizados no Brasil confirmam a importância da rotação de culturas gramíneas/leguminosas para aumentar o potencial de disponibilidade de N no sistema solo-planta (AITA et al., 2001; AITA et al., 2004; GIACOMINI et al., 2004). As vantagens consistem na capacidade das leguminosas em fixarem N<sub>2</sub> atmosférico em simbiose com o rizóbio (FBN) e pela estreita relação C/N dos seus restos culturais, o que confere uma rápida mineralização e tem como consequência sobre o aumento da disponibilidade do N na cultura em sucessão (AITA et al., 2004). No Cerrado, a combinação mais utilizada consiste no uso da soja em rotação com o milho sob SPD. Ao longo de anos, essa prática tem aumentado o grau de fertilidade de solo na camada superficial, o que

eleva a oferta de N, assim como de outros nutrientes derivados de fertilizantes, da ciclagem de nutrientes e da correção do solo (ALLEONI; CAMBRI; CAIRES, 2005; PAVINATO; MERLIN; ROSOLEM, 2009).

Nos Estados Unidos, o sistema de recomendação de N no cultivo do milho leva em consideração os créditos de N adicionados pela soja antecessora (BELOW, 2002). Segundo este autor, pode ser considerado um crédito de N da soja da ordem de  $17 \text{ kg ha}^{-1}$  de N por tonelada de grãos produzida, ou até  $45 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, que seria disponível para o milho cultivado posteriormente. No Brasil, também foram alcançados avanços significativos na recomendação de N para o milho, considerando-se a disponibilidade de N residual da cultura antecessora, em conjunto com o teor de MOS (AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002; SOUSA; LOBATO, 2004).

Entretanto, nem sempre o cultivo da soja resulta em créditos de N no sistema produtivo. A introdução de cultivares modernas, sobretudo as de hábito de crescimento indeterminado resulta em elevada exportação de N via grãos, como efeito do alto potencial produtivo associado a essas cultivares. Nesse cenário, o alto índice de colheita é equivalente ao N derivado da FBN, que resulta em balanço de N próximo a zero quando a soja é introduzida pela primeira vez em sucessão ao milho (ALVES et al., 2006).

Por outro lado, o aumento gradual do uso de fertilizantes nitrogenados nas últimas décadas, associado à baixa EUN em ambientes tropicais, tem aumentado a preocupação com possíveis impactos negativos gerados no ambiente com consideráveis perdas de nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ) para os lençóis freáticos em anos com intensa precipitação e perdas

de óxido nitroso para a atmosfera, um dos principais gases de efeito estufa (AITA; GIACOMINI, 2008; CERRI et al., 2009). Nesse contexto, necessita-se de constante aperfeiçoamento nos sistemas de recomendação e, para isso, é importante considerar a dinâmica da disponibilidade de N ao longo do ciclo da cultura em função dos aportes de N oriundos da adição de fertilizantes minerais num dado ambiente de produção, com vistas à redução dos impactos ambientais e aumento na eficiência de uso do fertilizante. Outro aspecto relevante para o manejo eficiente é a determinação do melhor esquema de parcelamento no fornecimento do N em lavouras de grande demanda pelo nutriente, caso do milho de alta produtividade.

Todas essas demandas por informações são recorrentes, à medida que se modificam os padrões tecnológicos dos sistemas de produção adotados pelos agricultores, tal como vem acontecendo na região dos Campos das Vertentes em Minas Gerais, onde se constata clara intensificação do uso da terra, com cultivos rotacionados em SPD, elevados investimentos em insumos e níveis crescentes de produtividade das lavouras.

Dada a dinâmica complexa e alta variabilidade das formas nitrogenadas no solo, poucos estudos abordam o uso dos teores de N mineral, sobretudo de  $N-NO_3^-$ , como indicadores complementares da disponibilidade do nutriente para o milho em SPD no Brasil. Além disso, normalmente, são avaliados os teores de N mineral apenas nos primeiros 20 cm do solo, o que geralmente subestima os teores do nutriente disponíveis no sistema solo-planta, como também omite o potencial poluidor do  $N-NO_3^-$  perdido para camadas profundas de solo pelo



processo de lixiviação. Nesse sentido, o presente estudo teve como objetivos: 1) avaliar a contribuição da soja na disponibilidade de N para o milho cultivado na safra seguinte; 2) estimar o balanço de N, tendo como aportes para a cultura o N-fertilizante, o N-palhada e o N-solo; e 3) monitorar a dinâmica da disponibilidade de N mineral em diferentes épocas e camadas de solo, até 60 cm de profundidade, numa sequência soja-pousio-milho sob influência da aplicação de doses de adubação NPK em Latossolo de fertilidade construída, na região dos Campos das Vertentes, MG.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na Fazenda Santa Helena, situada a 21° 15' 40'' de latitude Sul e 44° 30' 30'' de longitude Oeste, no município de Nazareno, mesorregião dos Campos das Vertentes, MG. A altitude do local é 1.020 m. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, com textura argilosa (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2013). A fertilidade do solo do experimento foi considerada de média a elevada, de acordo com as classes de interpretação da fertilidade indicadas por Alvarez et al. (1999) (Tabela 1). A área já vinha sendo cultivada há cerca de vinte anos com as culturas da batata inglesa, cenoura e do milho. Nos últimos dez anos, o perfil tecnológico da propriedade caracteriza-se pelo elevado investimento, sendo o solo manejado sem preparo ao longo de oito safras consecutivas de milho, permanecendo em pousio nas entressafras. Nesse período, somente no ano 2007 foi cultivado o girassol como cultivo de segunda safra.

Tabela 1 - Caracterização química e textura do solo da área experimental, na profundidade de 0 a 20 cm, após a semeadura da soja 2011/12

pH em água	P*	K*	Zn	Mn	B	S-SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	H+Al	Al	T	P-rem	V
5,7	8	103	5	16	2	37,7	2,3	0,6	5,5	0,1	8,8	5	36
Areia			Silte			Argila			Matéria Orgânica				
17			25			58			4,9				

\*Extrator: Mehlich-1.

Foram avaliadas duas safras de grãos, na sequência soja/milho, com pousio na entressafra, em condições de sequeiro, nos anos agrícolas 2011/12 e 2012/13. Os cultivares utilizados foram a soja Nidera NA5909 RR, tipo de crescimento indeterminado, e o milho Pioneer P30F53 H. A data da semeadura da soja foi 21/10/2011, e do milho, 15/10/2012, utilizando-se semeadora de tração mecanizada (com nove linhas de semeadura espaçadas de 0,6 m). Os tratos fitossanitários (aplicação de herbicidas, inseticidas e fungicidas) foram realizados quando necessário, conforme o protocolo da fazenda (época, quantidade e tipo de produto a ser aplicado). A população de plantas estimada na colheita foi de 380 mil plantas ha<sup>-1</sup> para soja e 75 mil plantas ha<sup>-1</sup> para o milho. Para monitorar as variações climáticas no período experimental, foi instalada uma estação meteorológica com registro automático de dados, a cerca de 1.000 m do experimento. Os dados do registro histórico do clima foram obtidos em INMET (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, 2014).

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com três repetições. Os tratamentos consistiram na aplicação de diferentes doses de NPK nas culturas da soja e do milho, considerando-se como referência as adubações aplicadas na fazenda. As fontes utilizadas na safra da soja foram o formulado NPK 02-30-10 na semeadura e cloreto de potássio (KCl) em cobertura e, para o milho, os formulados NPK 18-38-00 na semeadura e NPK 22-00-20, em cobertura. Na definição dos tratamentos no presente estudo, omitiu-se o efeito da adubação nitrogenada na soja e do P e K no milho. A justificativa se deve ao fato de as pequenas doses de N-fertilizante não surtirem efeitos significativos no desempenho da leguminosa frente ao N fixado em simbiose com o

*Bradyrhizobium* (MENDES; HUNGRIA; VARGAS, 2003; MENDES et al., 2008). Já no milho, pelo fato de o N ser considerado o nutriente mais absorvido e o de maior efeito resposta no rendimento de grãos (AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002; SOUSA; LOBATO, 2004), como também, o efeito resposta em produtividade de milho ao P e K disponível em solos com consideráveis reservas desses nutrientes, ficar na dependência da quantidade de N aplicada ou disponível (FANCELLI, 2010). As sementes da soja foram inoculadas com *Bradyrhizobium brasiliensis* (1 mL = 5 bilhões de bactérias).

As aplicações dos fertilizantes foram realizadas em sulco na semeadura e em filete, nas entrelinhas em cobertura, no estágio V2 da soja e V3-V4 do milho. A referência para a definição das doses aplicadas foi a adubação normalmente utilizada na fazenda (tratamento T5). Nos demais tratamentos visou-se testar possíveis respostas no rendimento das culturas e disponibilidade de N mineral ao aplicar-se doses combinadas na semeadura x cobertura, em proporções cerca de 0,5 e 1,5 vezes a adubação da fazenda. Também foi avaliado um tratamento sem aplicação de fertilizantes nas duas safras. Na Tabela 2, constam as doses de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O que definiram os tratamentos aplicados na safra da soja 2011/12, e os componentes de rendimento da cultura utilizados no cálculo do balanço de N no sistema solo-planta. Na Tabela 3, são apresentadas as doses de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O que definiram os tratamentos aplicados na safra de milho 2012/13.

Tabela 2 - Produtividade de grãos e massa seca da parte aérea (MSPA), em função da quantidade total de nutrientes N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O aplicados na semeadura e em cobertura potássica, nos tratamentos investigados no cultivo da soja, no ano agrícola 2011/12

Tratamentos <sup>1</sup>	Nutrientes aplicados	Produtividade de grãos	MSPA
	N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O		
		kg ha <sup>-1</sup>	
T1	0-0-0	3.190	2.552
T2	4-58-34	3.500	2.800
T3	4-58-64	3.857	3.085
T4	6-95-47	3.461	2.769
T5	6-95-62	3.680	2.944
T6	6-95-77	3.943	3.154
T7	10-146-94	4.098	3.279

<sup>1</sup> O tratamento T5 equivale às quantidades de nutrientes normalmente aplicadas na fazenda. O Cálculo da MSPA foi realizado com base em índice disponibilizado em Herzog, Levien e Trein (2004)

Tabela 3 - Quantidade de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O aplicada na semeadura e em cobertura, em função dos tratamentos investigados no cultivo do milho em sucessão à soja, no ano agrícola 2012/13

Tratamentos <sup>1</sup>	Adubação		
	Semeadura (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Cobertura (N-K <sub>2</sub> O)	Total (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----		
T1	0-0	0-0	0-0-0
T2	28-59	66-60	94-59-60
T3	28-59	198-180	226-59-180
T4	57-120	66-60	123-120-60
T5	57-120	132-120	189-120-120
T6	57-120	198-180	255-120-180
T7	83-173	198-180	281-176-180

<sup>1</sup> O tratamento T5 equivale às quantidades de nutrientes normalmente aplicadas na fazenda.

Para quantificar o N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, foram realizadas oito amostragens de solo em diferentes épocas, na sequência soja-pousio-milho (Figura 1).

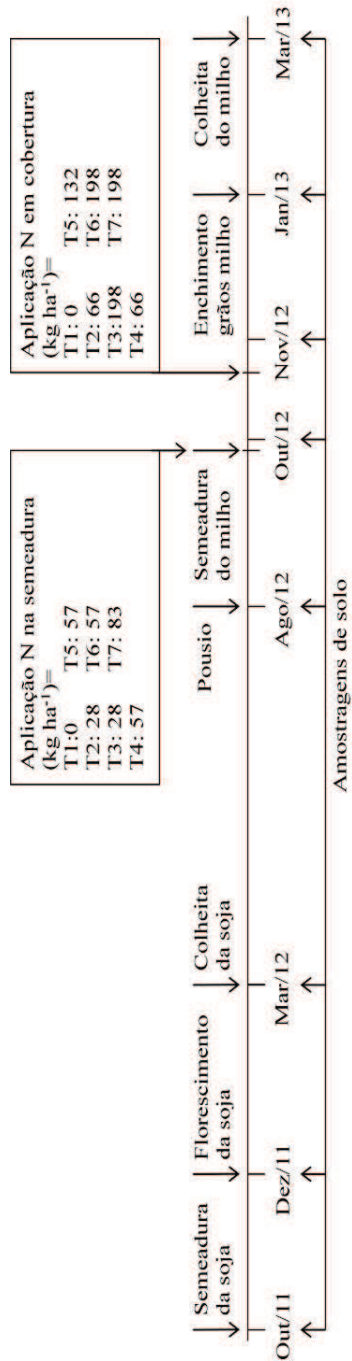


Figura 1 - Representação das amostragens de solo realizadas em diferentes épocas na sequência soja-pousio-milho. Quantidade de N aplicada nos tratamentos com cultivo do milho (kg ha<sup>-1</sup> de N-semeadura + kg ha<sup>-1</sup> de N-cobertura): T1 (0 Nsem+0Ncob); T2 (28Nsem+66Ncob); T3(28Nsem+ 198Ncob); T4(57Nsem+ 66Ncob); T5 (57Nsem+ 132Ncob); T6 (57Nsem+ 198Ncob); T7 (83Nsem+ 198Ncob)

Foram coletadas cinco amostras simples por parcela, que deram origem à amostra composta, com o uso de trado tipo calador, em camadas de 0-20, 20-40 e 40-60 cm, nas seguintes épocas: outubro de 2011 (semeadura da soja); dezembro de 2011 (florescimento da soja); março de 2012 (colheita da soja); agosto de 2012 (pousio-entressafra); outubro de 2012 (dois dias após semeadura do milho); novembro de 2012 (17 dias após aplicação de N em cobertura); janeiro de 2013 (enchimento de grãos); março de 2013 (colheita do milho). As amostras foram secas ao ar imediatamente após a coleta (visando reduzir a ocorrência de alterações das formas de N no solo), passadas em peneira de malha de 2 mm de diâmetro e armazenadas em refrigerador sob temperatura abaixo de 1°C (MATTOS JÚNIOR; CANTARELLA; VAN RAIJ, 1995).

A determinação de N-amônio (N-NH<sub>4</sub><sup>-</sup>) e N-nitrato (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) foi realizada pelo método de destilação por arraste de vapores semi-micro *Kjeldahl* (TEDESCO; VOLKWEISS; BOHNEN, 1995). Foi calculado o estoque de N mineral somando-se o N-NH<sub>4</sub><sup>-</sup> e N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. No final da safra de milho, foram coletadas amostras indeformadas de solo com anel volumétrico (volume aproximado em 10 cm<sup>-3</sup>) para calcular a densidade do solo por camada amostrada. Os estoques de N-NH<sub>4</sub><sup>-</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e N mineral foram calculados a partir dos seus respectivos teores no solo, considerando-se a densidade e a espessura da camada do solo, conforme a equação 1 (FERNANDES; FERNANDES, 2009).

$$E = \rho \cdot h \cdot N \quad (\text{Equação 1})$$



Em que: E é o estoque de N mineral ( $\text{N-NH}_4^-$ ,  $\text{N-NO}_3^-$  e  $\text{N-NH}_4^- + \text{N-NO}_3^-$ ) do solo ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );  $\rho$  a densidade do solo; h a espessura da camada amostrada e; N o teor de N mineral do solo.

Em razão de a densidade do solo na área do experimento ter variado entre as camadas, foi utilizado o método da massa equivalente proposta por Ellert e Bettany (1995) (Equação 2), utilizando-se a densidade do solo de uma floresta adjacente ao experimento como referência (mesma classe de solo). Este método evita superestimar o acúmulo de N mineral e seus componentes nos tratamentos de maior densidade do solo, originada das práticas de manejo do solo e tratos culturais (FERNANDES; FERNANDES, 2009).

$$EN = \sum^{n-i} E + [M_{ai} - (\sum^n M_a - \sum^n M_r)] \cdot (N_i) \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: EN é o estoque corrigido de N mineral ( $\text{N-NH}_4^-$ ,  $\text{N-NO}_3^-$  ou  $\text{N-NH}_4^- + \text{N-NO}_3^-$ ) pela massa de solo da área de referência ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );  $\sum^{n-i} E$  é o somatório dos estoques das camadas, sem a última camada amostrada (40-60 cm);  $M_{ai}$  é a massa de solo da última camada de solo amostrado;  $\sum^n M_a$  é o somatório da massa total de solo amostrada;  $\sum^n M_r$  é o somatório da massa de solo da área de referência e;  $N_i$  é o teor de N mineral na última camada amostrada.

Para avaliar o teor foliar de N foram realizadas amostragens foliares no estágio R2 da soja (aos 47 dias após semeadura - DAS) e no florescimento feminino no milho (91 DAS). Na cultura da soja, foram

coletados 15 trifólios por parcela, retirando-se o terceiro ou quarto trifólio completamente expandido a partir do ápice da planta. Na cultura do milho foram coletadas 15 folhas por parcela, no lado oposto e abaixo da espiga. A análise de N foliar foi realizada pelo método *Kjeldahl* (TEDESCO; VOLKWEISS; BOHNEN, 1995). As avaliações de produtividade de grãos foram feitas colhendo-se três linhas de 4 m por parcela após a maturação fisiológica das culturas. Após a debulha mecânica, foi determinada a produtividade de grãos, ajustando-se o teor de água para  $130 \text{ g kg}^{-1}$ . A partir da quantificação dos teores de N nos grãos, na qual utilizou-se o mesmo método da análise foliar (TEDESCO; VOLKWEISS; BOHNEN, 1995), estimou-se a exportação de N multiplicando-se o teor nos grãos pela massa total de grãos.

Os dados foram submetidos à análise de variância e, quando encontradas diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste F no nível de 5% de probabilidade, ajustaram-se modelos de regressão em função da relação de doses de N aplicadas com as variáveis avaliadas no estudo. Os dados de estoques de  $\text{N-NH}_4^+$ ,  $\text{N-NO}_3^-$  e N mineral ( $\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$ ) no solo na sequência soja-pousio-milho foram avaliadas separadamente, por épocas e camadas de solo, sendo as médias comparadas pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. Utilizou-se o programa estatístico Sisvar (FERREIRA, 2011).

Foi estimado o balanço de N nas safras da soja e do milho. Para a soja, considerou-se que cerca de 82% do N acumulado na parte aérea da planta era derivado da FBN. Esse valor teve como referência o trabalho de Alves et al. (2006). A massa seca da parte aérea (MSPA) foi estimada multiplicando-se a produtividade de grãos pelos coeficientes 0,8 para soja

e 1,2, para o milho, obtidos na relação entre produtividade de grãos/MSPA para as condições de cerrado (ARAÚJO; FERREIRA; CRUZ, 2004; HERZOG; LEVIEN; TREIN, 2004). No cálculo da eficiência de uso do fertilizante nitrogenado (EUFN), foi considerado que 45% do total de N aplicado via fertilizantes foram absorvidos e acumulados na parte aérea das plantas, 25% foram recuperados no solo até 60 cm de profundidade, e 30% não foram recuperados. Essas informações foram obtidas a partir dos trabalhos de Alves et al. (2006) e Gava et al. (2006). No cálculo do N residual da palhada de soja disponível para a cultura do milho, considerou-se que a constante de decomposição da MSPA foi de  $0,0075 \text{ g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ , ajustada pelo modelo exponencial decrescente, obtido no trabalho de Fabian (2009). No modelo do presente trabalho, considerou-se que 100% da MSPA estavam mantidas na superfície do solo a partir da colheita da soja, 229 dias antes da semeadura do milho (Tabela 2). No cálculo do N acumulado na parte aérea da soja, multiplicou-se o teor foliar de N pela MSPA. As referências para completar as variáveis de entradas e saídas do balanço de N, tanto para a cultura da soja quanto do milho, foram obtidas em Araújo, Ferreira e Cruz (2004); Herzog, Levien e Trein (2004); Alves et al. (2006); Gava et al. (2006) e Fabian (2009).

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **3.1 Condições climáticas no período experimental**

Apesar de a ocorrência de chuvas ter sido abaixo da média histórica durante o ciclo da soja, não houve registro de estresse hídrico a ponto de afetar o rendimento da cultura. Na safra de milho do ano seguinte, a precipitação média mensal ocorreu dentro da normalidade da região nos estádios fenológicos de maior demanda hídrica (BERGAMASCHI et al., 2006). Entretanto, foi registrado um volume acumulado de chuvas cerca de 200 mm acima do normal previsto para janeiro de 2013. Esse excesso hídrico provavelmente contribuiu para a lixiviação de  $N-NO_3^-$  no perfil do solo, uma vez que ocorreu, no período após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura (AITA et al., 2004). A temperatura média manteve o padrão normal de oscilação (inverno-verão) no período avaliado (Figura 2).

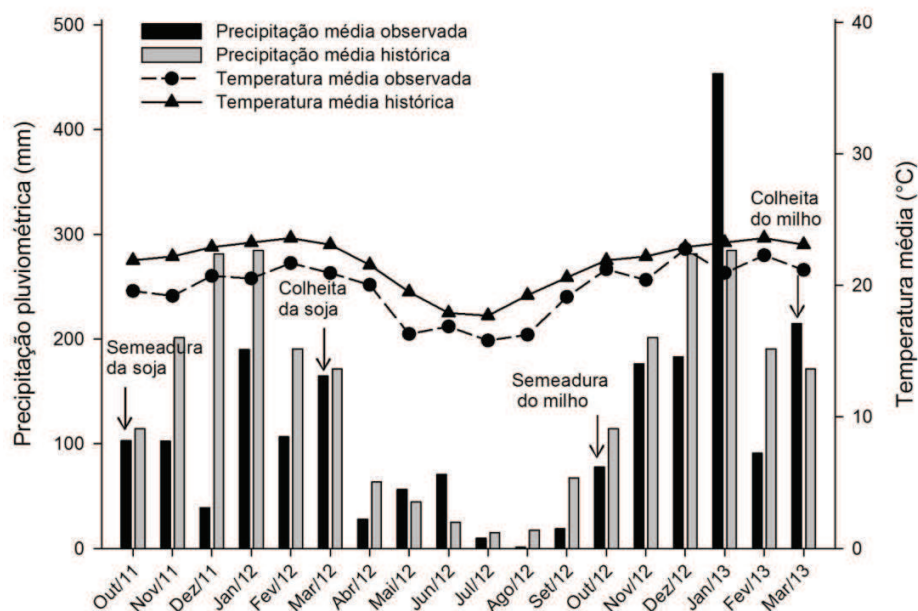


Figura 2 - Precipitações pluviométricas e temperaturas médias mensais observadas durante o período experimental e históricas registradas nos últimos quarenta anos na microrregião de Nazareno, MG

### 3.2 Dinâmica do N mineral no solo na sequência soja-pousio-milho

A variação de  $N-NH_4^+$  entre os tratamentos não foi significativa ( $P \leq 0,05$ ) no ciclo da soja para as épocas e camadas de solo avaliadas. No ciclo de cultivo do milho, os maiores estoques foram observados 17 dias após a aplicação de N-fertilizante em cobertura. Naquele momento a quantidade de  $N-NH_4^+$  atingiu estoque próximo de 120 e 50  $kg\ ha^{-1}$  nas camadas 0-20 e 40-60 cm, respectivamente, no tratamento que recebeu 83 e 198  $kg\ ha^{-1}$  de N na semeadura e cobertura, a maior dose de N aplicada (T7). Na camada 20-40 cm não houve variação contrastante na sequência

soja-pousio-milho; os estoques variaram entre 5 e 10 kg ha<sup>-1</sup> de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. O acúmulo total no perfil avaliado até 60 cm atingiu máximo de 164 kg ha<sup>-1</sup> N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no tratamento T7 (Figura 3).

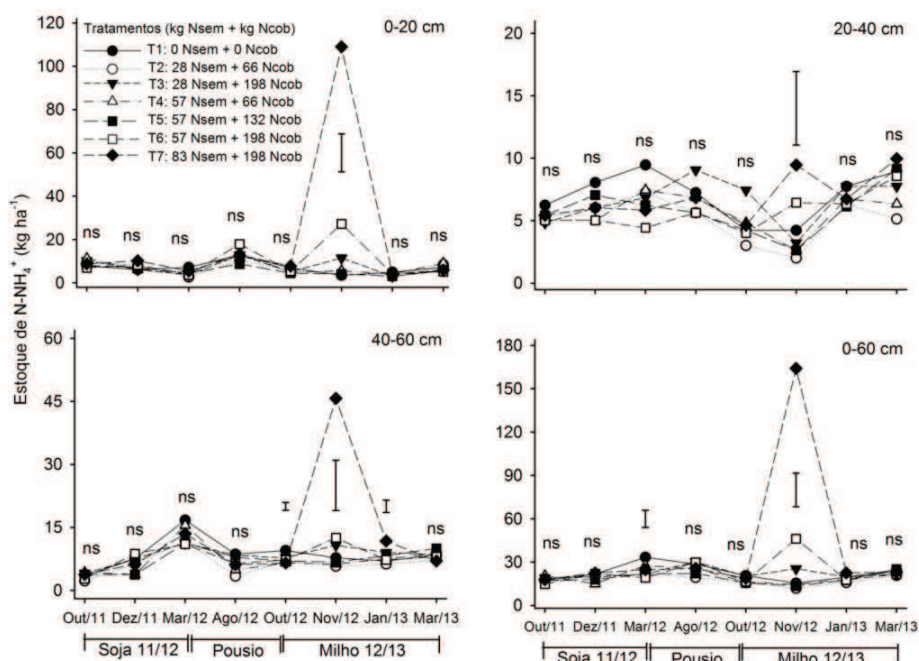


Figura 3 - Estoque de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nas camadas 0-20, 20-40, 40-60 e 0-60 cm, em diferentes épocas de amostragens da sequência da safra de soja 2011/12, pousio, e safra de milho 2012/13. Épocas de amostragem: Out/11 (semeadura da soja); Dez/11 (florescimento da soja); Mar/12 (colheita da soja); Ago/12: (pousio-entressafra); Out/12 (dois dias após semeadura do milho); Nov/12 (17 dias após aplicação de N em cobertura); Jan/13 (enchimento de grãos); Mar/13 (colheita do milho). Tratamentos conforme quantidade de N-fertilizante aplicada na semeadura (kg Nsem) e em cobertura (kg Ncob), no milho cultivado na safra 2012/13. As barras verticais indicam que houve diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo

Diferentemente do  $\text{N-NH}_4^+$ , para o  $\text{N-NO}_3^-$  houve variações significativas ( $P \leq 0,05$ ) no ciclo da soja. Em geral, houve menor estoque de  $\text{N-NO}_3^-$  na época do florescimento pleno (Dez/11), nos primeiros 40 cm do perfil, estágio considerado de maior demanda de N pela leguminosa (SIQUEIRA NETO et al., 2010). Considerando a média entre os tratamentos avaliados, a variação nos estoques de  $\text{N-NO}_3^-$  foi de  $35 \text{ kg ha}^{-1}$  entre a semeadura e o florescimento pleno da soja. Entretanto, no final na safra (Mar/12), houve recuperação dos  $30 \text{ kg}$  de  $\text{N-NO}_3^-$  presentes nos primeiros 40 cm, e dos  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{N-NO}_3^-$  presentes até 60 cm de profundidade, quando a cultura havia sido semeada. Na safra do milho, a avaliação aos 17 dias após a aplicação de N-fertilizante em cobertura apresentou as maiores quantidades de  $\text{N-NO}_3^-$ . Os três tratamentos que receberam  $198 \text{ kg}$  de N-ureia em cobertura apresentaram os maiores estoques na camada 0-20 cm, o que refletiu em maiores acúmulos, considerando-se o somatório das três camadas (Figura 4).

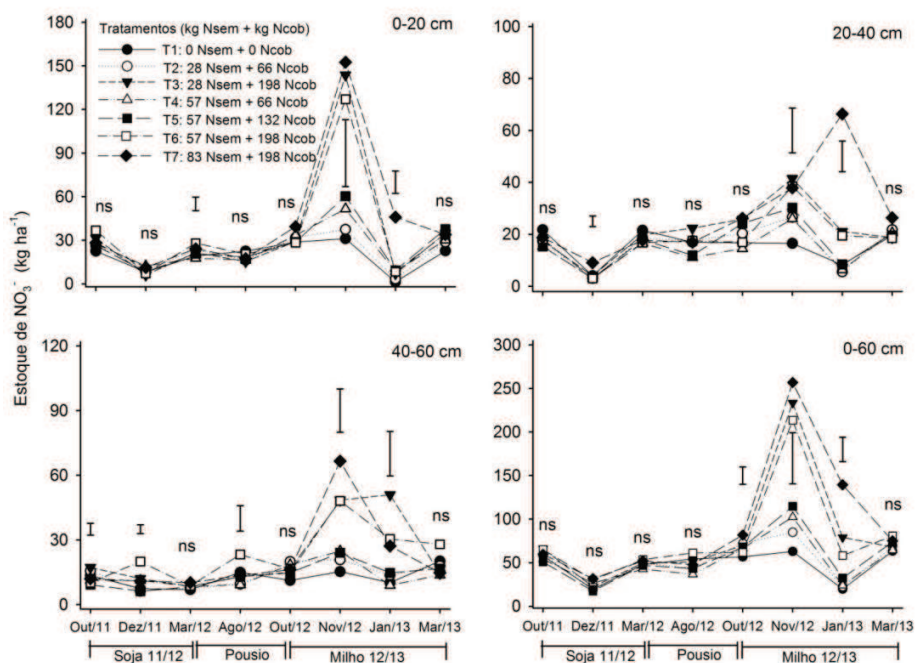


Figura 4 - Estoque de  $\text{N-NO}_3^-$  nas camadas 0-20, 20-40, 40-60 e 0-60 cm, em diferentes épocas de amostragens da sequência da safra de soja 2011/12, pousio e safra de milho 2012/13. Épocas de amostragem: Out/11 (semeadura da soja); Dez/11 (florescimento da soja); Mar/12 (colheita da soja); Ago/12: (pousio-entressafra); Out/12 (dois dias após semeadura do milho); Nov/12 (17 dias após aplicação de N em cobertura); Jan/13 (enchimento de grãos); Mar/13 (colheita do milho). Tratamentos conforme quantidade de N-fertilizante aplicada na semeadura (kg Nsem) e em cobertura (kg Ncob), no milho cultivado na safra 2012/13. As barras verticais indicam que houve diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo

O somatório das duas formas de N mineral avaliadas segue o mesmo padrão constatado para o  $\text{N-NO}_3^-$ , quanto à distribuição temporal e nas camadas de solo. Isso se deve ao predomínio dessa forma de N



mineral no solo, o que indica grande capacidade de o sistema promover a oxidação do  $\text{N-NH}_4^+$  a  $\text{N-NO}_3^-$ . Não houve diferença significativa dentro das épocas de coleta, nos estoques de N mineral da camada 0-20 cm e no somatório das três camadas (0-60 cm), desde a semeadura da soja até dois dias após a semeadura do milho. Assim como para a disponibilidade de  $\text{N-NH}_4^+$  e  $\text{N-NO}_3^-$ , o N mineral foi maior entre os dois tratamentos que receberam as maiores doses somadas de N na semeadura e cobertura do milho (T6 e T7). Este último (T7) também apresentou os maiores estoques de N mineral na fase de enchimento de grãos. Àquela época, o estoque total disponível no solo até 60 cm neste tratamento foi de  $422 \text{ kg ha}^{-1}$ , e de  $260 \text{ kg ha}^{-1}$  nos tratamentos T3 e T6. Esses três tratamentos receberam dose de cobertura nitrogenada cerca de 0,5 vez superior à adubação aplicada na fazenda (Figura 5).

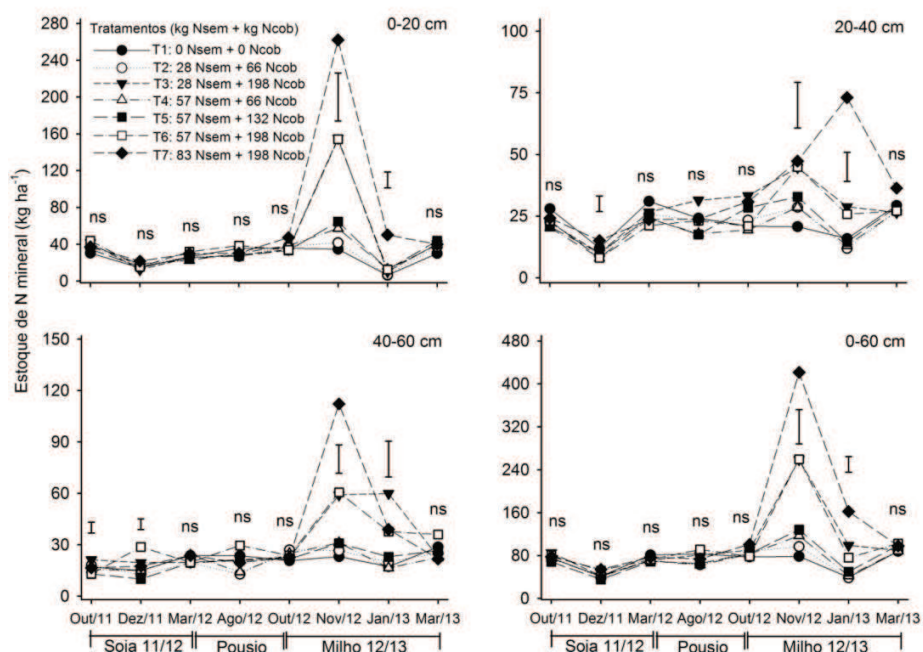


Figura 5 - Estoque de N mineral nas camadas 0-20, 20-40, 40-60 e 0-60 cm, em diferentes épocas da sequência da safra de soja 2011/12, pousio e safra de milho 2012/13. Épocas de amostragem: Out/11 (semeadura da soja); Dez/11 (florescimento da soja); Mar/12 (colheita da soja); Ago/12: (pousio-entressafra); Out/12 (dois dias após semeadura do milho); Nov/12 (17 dias após aplicação de N em cobertura); Jan/13 (enchimento de grãos); Mar/13 (colheita do milho). Tratamentos conforme quantidade de N-fertilizante aplicada na semeadura (kg Nsem) e em cobertura (kg Ncob), no milho cultivado na safra 2012/13. As barras verticais indicam que houve diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo

### 3.3 Dinâmica de N mineral durante o cultivo do milho

Neste tópico, optou-se por representar somente o estoque das formas de N mineral em perfil do solo no ciclo do milho. A justificativa se deve ao fato de, apesar de ter sido aplicado N via fertilizantes no

cultivo da soja, isso não possibilitou grandes variações entre as camadas avaliadas.

O estoque de  $\text{N-NH}_4^+$  disponível no perfil do solo não sofre grandes variações até a aplicação de N em cobertura (Figura 6). Entretanto, 17 dias após a aplicação em cobertura, a disponibilidade aumenta consideravelmente, tanto na camada 0-20 cm, quanto na porção de 40-60 cm, obtendo-se próximo de  $110 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{N-NH}_4^+$  nos primeiros 20 cm de profundidade. Nessa mesma época, a disponibilidade não se altera na camada de 20-40 cm. Na fase de enchimento de grãos, o estoque de  $\text{N-NH}_4^+$  é reduzido e volta aos mesmos patamares observados antes da adubação de cobertura. Entre os tratamentos, com exceção da avaliação realizada logo após a semeadura, os maiores estoques foram detectados no tratamento que recebeu a máxima dose de N avaliada (281 kg) (Figura 6).

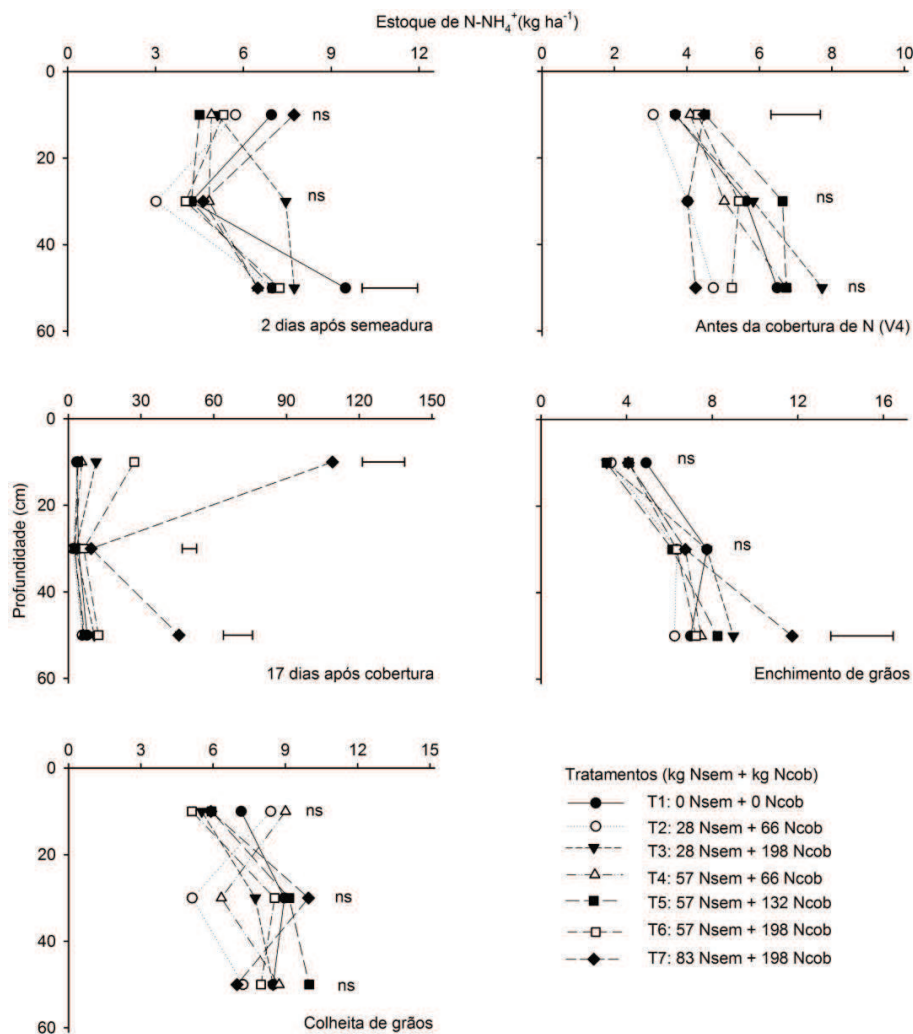


Figura 6 - Estoque de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> nas camadas 0-20, 20-40, 40-60 e 0-60 cm, em diferentes épocas em função de tratamentos de adubação nitrogenada na safra de milho 2012/13. Tratamentos conforme as quantidades de N-fertilizante aplicadas na sementeira (kg Nsem) e em cobertura (kg Ncob). As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo

Os estoques de  $\text{N-NO}_3^-$  foram maiores do que os de  $\text{N-NH}_4^+$  nas diferentes épocas e camadas de perfil avaliadas. A dinâmica seguiu um padrão parecido ao do  $\text{N-NH}_4^+$  nas avaliações realizadas 17 dias após a aplicação de N em cobertura e no enchimento de grãos. Os tratamentos que receberam 198 kg de N em cobertura (T3, T6 e T7) apresentaram os maiores estoques de  $\text{N-NO}_3^-$  na camada 0-20 cm, diferindo significativamente dos demais tratamentos. Nessa época, esses três tratamentos apresentaram maior acúmulo de  $\text{N-NO}_3^-$  na camada 40-60 cm do que na camada 20-40 cm (Figura 7).

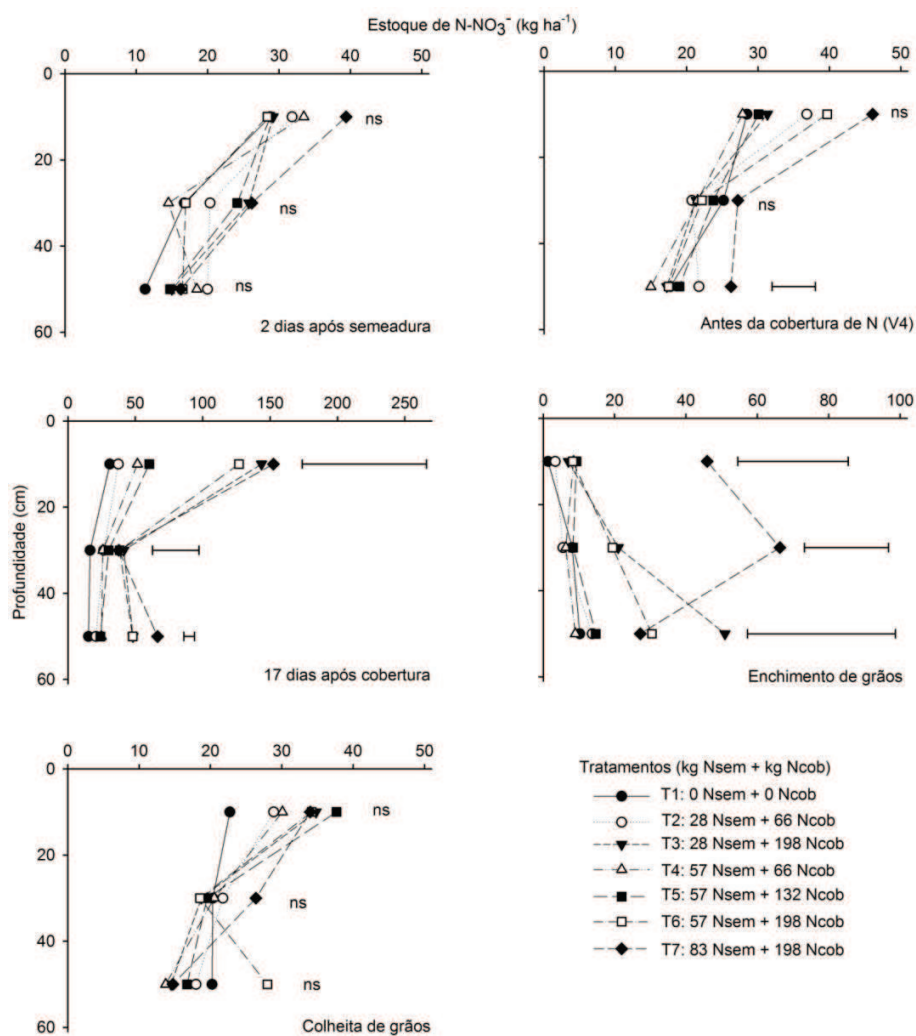


Figura 7 - Estoque de  $N-NO_3^-$  nas camadas 0-20, 20-40, 40-60 e 0-60 cm, em diferentes épocas em função de tratamentos de adubação nitrogenada na safra de milho 2012/13. Tratamentos conforme as quantidades de N-fertilizante aplicadas na sementeira (kg Nsem) e em cobertura (kg Ncob). As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey, ao nível 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo

As variações nos estoques de N mineral ( $\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$ ) no perfil durante o ciclo do milho foram predominantemente vinculadas à dinâmica do  $\text{N-NO}_3^-$ , sendo o maior estoque observado na camada superficial no tratamento T7. Os estoques atingiram 47, 50, 260 e 50  $\text{kg ha}^{-1}$  de N mineral aos dois dias após a semeadura, antes da cobertura, aos 17 dias após a cobertura nitrogenada e no enchimento de grãos, respectivamente. No mesmo tratamento foram obtidos 112  $\text{kg ha}^{-1}$  na camada 40-60 cm, na avaliação feita 17 dias após aplicação de N em cobertura. Observam-se oscilações nas quantidades de N-mineral ao longo do tempo. No enchimento de grãos, uma das fases de maior requerimento de N pelo milho (SANGOI et al., 2002), há sensível decréscimo nos estoques na camada superficial do solo para a maioria dos tratamentos, com certa reposição desses estoques ao final do ciclo do milho, o que possivelmente se deve à continuidade do processo de mineralização de formas orgânicas de N presentes no solo e concomitante redução da absorção pela cultura com a senescência das plantas na maturação (Figura 8).

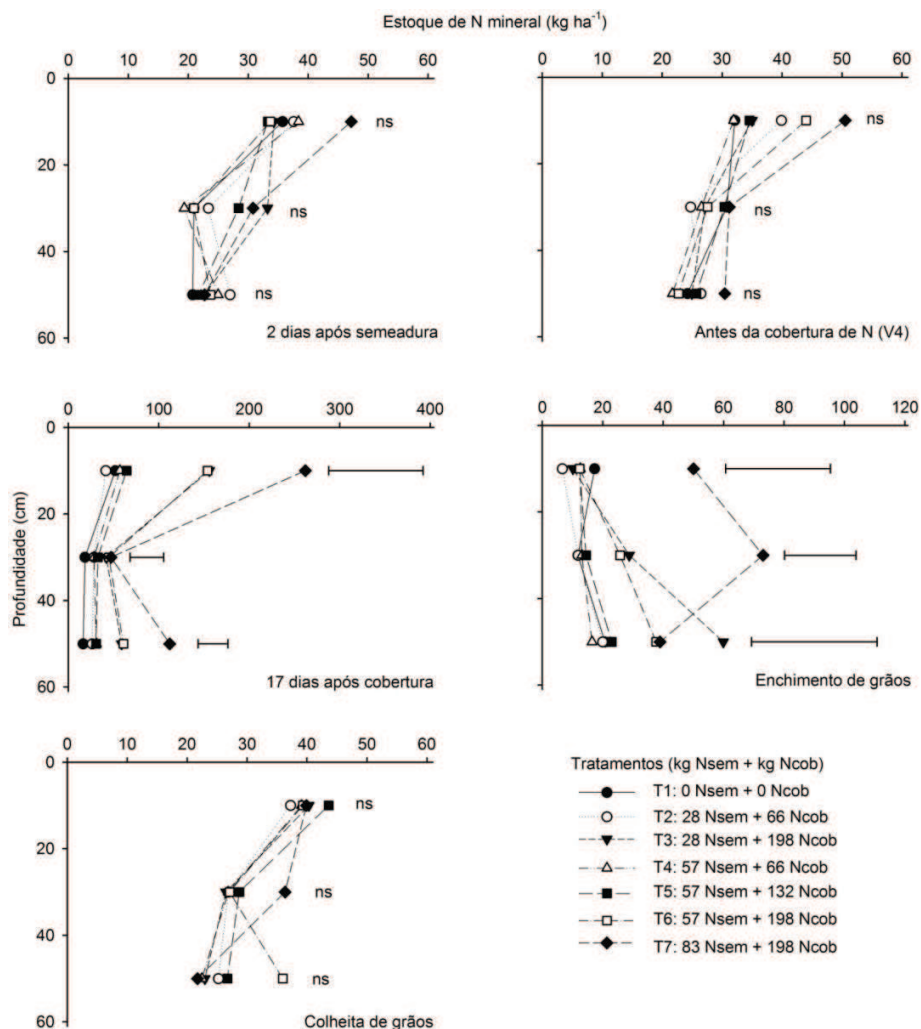


Figura 8 - Estoque de N mineral ( $N-NH_4^- + N-NO_3^-$ ) nas camadas 0-20, 20-40, 40-60 e 0-60 cm, em diferentes épocas em função de tratamentos de adubação nitrogenada na safra de milho 2012/13. Tratamentos conforme as quantidades de N-fertilizante aplicadas na semeadura (kg Nsem) e em cobertura (kg Ncob). As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey, ao nível de 5% de probabilidade. <sup>ns</sup> Não significativo



Os estoques de N mineral no solo permitem deduzir que elevadas doses de N aplicadas via fertilizantes em cobertura oferecem boa oferta do nutriente no ciclo do milho, quando é requerida a maior quantidade de N (V6-V8 e enchimento de grãos). Observa-se que o  $\text{N-NO}_3^-$  é a espécie de N mineral predominante no perfil do solo, até 60 cm de profundidade.

Os elevados coeficientes de variação, maiores que 11% em todas as épocas e camadas avaliadas, provavelmente explicam a ausência de significância ( $P \leq 0,05$ ) verificada entre as formas de  $\text{N-NH}_4^-$  e  $\text{N-NO}_3^-$  disponíveis na maioria das épocas e camadas avaliadas em função dos tratamentos, como também observado por Rambo et al. (2007) e Behling et al. (2009).

Ao final do ciclo da soja houve recuperação parcial do  $\text{N-NO}_3^-$  disponível na camada 0-20 cm, na semeadura. Os valores médios de  $\text{N-NO}_3^-$  entre os tratamentos oscilaram na faixa de  $28 \text{ kg ha}^{-1}$  na semeadura (Out/11),  $8 \text{ kg ha}^{-1}$  no florescimento (Dez/11) e  $22 \text{ kg ha}^{-1}$  na colheita da soja (Mar/12) (Figura 4). A decomposição do sistema radicular e nódulos presentes nas raízes, já na fase de senescência das plantas, contribuem para aumentar a disponibilidade do  $\text{N-NO}_3^-$  no solo no final do ciclo da soja (CÂMARA, 2014).

A literatura aponta que elevadas doses de N mineral aplicadas em superfície, combinadas com altas temperaturas e precipitações, influenciam o deslocamento de  $\text{N-NO}_3^-$  em camadas mais profundas (AITA; GIACOMINI, 2008; COSTA et al., 2008). No presente estudo, observou-se que, no ciclo do milho, o período que apresentou grande quantidade  $\text{N-NO}_3^-$  deslocado em profundidade (17 dias após a aplicação de N em cobertura) coincide com o registro de 48 mm de chuva um dia

após aplicação da adubação em cobertura. Gollany et al. (2004) ao estudarem doses de N em solos argilosos encontraram valores médios de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> lixiviado, de 32 e 78 Kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, quando avaliaram a aplicação de doses de 20 e 200 kg ha<sup>-1</sup> de N em milho, respectivamente. Costa et al. (2008) observaram em Latossolo vermelho localizado no Cerrado que, após três anos de aplicação de elevadas doses de N-fertilizante em pastagens, houve deslocamento de cerca de 30 mgkg<sup>-1</sup> de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> da camada 0-20 cm para 20-40 cm.

O deslocamento de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> da camada 0-20 cm para 40-60 cm, sem retenção significativa observada na camada 20-40 cm (Figura 3), pode ser associado a algumas hipóteses com fatores que influenciam simultaneamente sua dinâmica no perfil. Phillips e Burton (2005) observaram que há tendência de retenção do cátion NH<sub>4</sub><sup>+</sup> em camada inferior do solo e justificaram o fato pela retenção preferencial de cátions multivalentes pela matéria orgânica. O N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> também pode ter sido absorvido pelo sistema radicular das plantas, diminuindo o estoque na camada de 20-40 cm (ALVES et al., 2006), uma vez que, aos 17 dias após a cobertura nitrogenada, a cultura já se encontrava no estágio V8-9, apresentando concentração significativa de raízes ativas nessa posição intermediária do perfil de solo (SILVA et al., 2012).

### **3.4 Correlação N mineral-índices fitotécnicos em função do N-cobertura**

Os estoques disponíveis de N amoniacal nas camadas até 60 cm do perfil do solo não se correlacionaram significativamente com os teores

foliares, a produtividade de grãos e teores de N nos grãos e a exportação do nutriente pelo milho (Tabela 4). No entanto, os coeficientes ajustados para as mesmas variáveis foram elevados e todos significativos em relação às quantidades disponíveis de N nítrico. Para a soma das duas formas de N, as correlações com as demais variáveis somente não foram significativas para a camada de 40-60 cm e com a produtividade de grãos na camada 0-20 cm. Embora não significativos, os coeficientes são relativamente altos frente aos padrões encontrados por Rambo et al. (2007) ao estabelecer relações entre N mineral do solo com N acumulado na cultura do milho em diferentes estádios de desenvolvimento e produtividade de grãos (Tabela 4).

Tabela 4 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os estoques de N-NH<sub>4</sub><sup>-</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>+ N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no solo, os 17 dias após aplicação de N-fertilizante em cobertura, teor foliar de N no florescimento, a produtividade de grãos, o teor de N nos grãos e a exportação do nutriente pelo milho 2012/13

Camada de solo (cm)	N-folha	N-grão	Produtividade de grãos	N exportado nos grãos
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>				
0-20	0,62 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>	0,52 <sup>ns</sup>
20-40	0,38 <sup>ns</sup>	0,47 <sup>ns</sup>	0,38 <sup>ns</sup>	0,45 <sup>ns</sup>
40-60	0,58 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>	0,46 <sup>ns</sup>	0,49 <sup>ns</sup>
0-60	0,60 <sup>ns</sup>	0,51 <sup>ns</sup>	0,48 <sup>ns</sup>	0,51 <sup>ns</sup>
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>				
0-20	0,76*	0,86*	0,81*	0,85**
20-40	0,86**	0,94**	0,93**	0,94**
40-60	0,78*	0,82*	0,78*	0,82*
0-60	0,79*	0,87**	0,83*	0,86**
N-mineral (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> + NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )				
0-20	0,76*	0,78*	0,73 <sup>ns</sup>	0,77*
20-40	0,87**	0,81**	0,90**	0,93**
40-60	0,67 <sup>ns</sup>	0,71 <sup>ns</sup>	0,67 <sup>ns</sup>	0,71 <sup>ns</sup>
0-60	0,77*	0,78*	0,74*	0,78*

\*\*, \*\*, <sup>ns</sup> Significativo a 1%, 5 % e não significativo pelo teste T.

A elevada correlação significativa do N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no solo após a adubação de cobertura com os teores de N no tecido foliar e nos grãos permite sugerir sua possível utilização como critério complementar de avaliação da disponibilidade de N para o milho e também como índice de risco para contaminação ambiental. Nos Estados Unidos são utilizados testes de intensidade, sendo o teste de pré-aplicação de adubação nitrogenada em cobertura o mais difundido e o de maior precisão. O teste consiste na avaliação da quantidade de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> que se encontra no solo até 30 cm de profundidade, no estágio V6 do milho (RAMBO et al., 2004). O

método preconiza que, nesta fase, o  $\text{N-NO}_3^-$  presente no solo é resultado da interação do conjunto de fatores climáticos com o manejo da adubação. Além disso, grande parte do N-solo seria mineralizado em período que se estende desde a semeadura, até pouco antes da avaliação, sendo então disponível ao alcance do rápido crescimento do sistema radicular da cultura. No sul do Brasil, Rambo et al. (2007) estimaram um nível crítico de  $\text{N-NO}_3^-$  no solo em  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  no estágio V6 para rendimento relativo de 93% de grãos de milho. Os autores calcularam ser necessário aplicar 50 kg de N no solo (adubação mineral ou orgânica, e considerar o N da MOS e reciclagem de resíduos) para cada unidade de  $\text{N-NO}_3^-$  abaixo no nível crítico, sendo dispensada a adubação nitrogenada em condição de solo acima desse teor crítico.

Foram ajustados modelos lineares crescentes para os teores de N nas folhas e nos grãos do milho em função das diferentes doses de N-fertilizante na adubação (Figura 9A). A produtividade de grãos aumentou de forma quadrática de acordo com as doses aplicadas (Figura 9B).

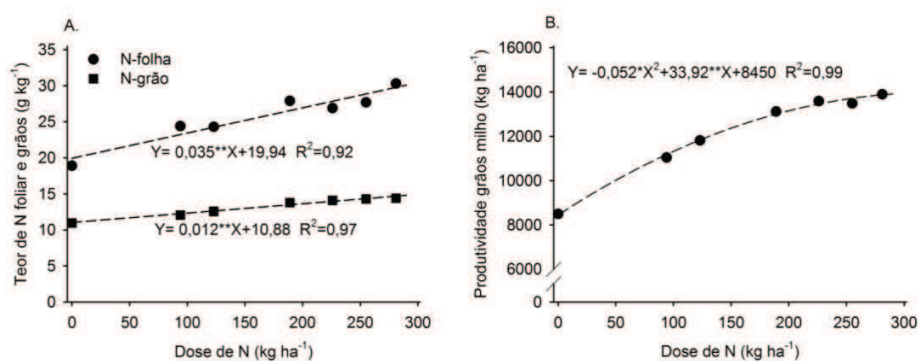


Figura 9 - Teores de N nas folhas e grãos (A) e produtividade de grãos (B) do milho em função de diferentes doses totais de N-fertilizante aplicadas durante o ciclo da cultura. \*,\*\* Significativo ao nível de 5% e 1% de probabilidade pelo teste F

Para cada kg de N aplicado como fertilizante, houve aumento de 0,012 e 0,035 g kg<sup>-1</sup> de N nas folhas e grãos. Houve acréscimo de 5.402 kg ha<sup>-1</sup> de grãos com a maior dose de N aplicada na semeadura e em cobertura (281 kg). Considerando-se o máximo retorno econômico em 90% da produtividade física, a dose ótima de N seria 162 kg ha<sup>-1</sup>.

### 3.5 Estimativa do balanço de N no sistema solo-planta nas culturas soja e do milho

A soja proporcionou, na média dos sete tratamentos, um crédito de 31 kg ha<sup>-1</sup> de N no final do ciclo. No cálculo, considerou-se que a FBN foi responsável por 82% do N na parte aérea da planta, com base nas informações obtidas do trabalho de Alves et al. (2006), num cenário onde a soja é introduzida pela primeira vez em rotação com o milho em Latossolo localizado na região tropical. Esse valor pode ser subestimado, uma vez que não foi considerado o N presente no sistema radicular da

cultura, que pode acumular de 5% do N total da planta, ao se considerar somente as raízes ativas (ARAUJO, 2004), até 30%, quando também for incluído o N mineralizado das raízes mortas e dos exsudatos radiculares (PEOPLES; HERRIDGE, 2000). No milho cultivado na safra seguinte, somente as doses acima de 200 kg apresentaram um saldo positivo de N no final do ciclo, que variou de 7 a 43 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 5).

Tabela 5 - Estimativa do balanço de N para o sistema soja/milho, calculado pela diferença entre a entrada (N-residual da palhada da soja, fertilizante aplicado e FBN) e a saída de N (exportado via grãos e perdas no sistema solo-planta)

Tratamentos	Entrada (A)			Saída (B)		Balanço <sup>(3)</sup>
	N-palhada <sup>(1)</sup>	N-Fertilizante	FBN	N-exportado	N-perdas <sup>(2)</sup>	(A-B)
Soja 2011/12 (kg ha <sup>-1</sup> )						
Média	-	-	224	193	-	31 (6,44)
Milho 2012/13 (kg ha <sup>-1</sup> )						
T1	13	0	-	80	0	-67 (7,66)
T2	13	94	-	115	28	-36 (3,01)
T3	14	226	-	165	68	7 (6,52)
T4	13	123	-	128	37	-29 (14,61)
T5	15	189	-	156	57	-9 (4,49)
T6	16	255	-	165	77	30 (5,71)
T7	18	281	-	172	84	43 (3,12)

<sup>(1)</sup> Considerou-se 18% de N residual da parte aérea da planta de soja (com o teor de 26 g kg<sup>-1</sup>) disponível na semeadura do milho em sequência à soja-pousio com base no trabalho de Fabian (2009). <sup>(2)</sup> Considerou-se que 25% do N-fertilizante permaneceram no solo (até 60 cm) e 45% foram aproveitados pela parte aérea da planta, e que são desprezíveis as perdas de N derivadas da FBN até a colheita da soja. <sup>(3)</sup> Valores entre parênteses representam o desvio padrão da média. <sup>(3)</sup> Valores positivos indicam ganho de N, e negativos, perda de N no sistema. Tratamentos (kg ha<sup>-1</sup> de N na semeadura + kg ha<sup>-1</sup> de N em cobertura): T1 (0Nsem+ 0Ncob); T2 (28Nsem+ 66Ncob); T3 (28Nsem+ 198Ncob); T4(57Nsem+ 66Ncob); T5 (57Nsem+ 132Ncob); T6 (57Nsem+ 198Ncob); T7 (83Nsem+ 198Ncob).

A alta contribuição da FBN para as plantas de soja compensou as exportações de N nos grãos, garantiu produtividade relativamente elevada de grãos e manteve um balanço positivo de N no solo. Isso reforça a ideia de que na soja o inoculante aplicado nas sementes é suficiente para potencializar o processo simbiótico da FBN, o que garante o atendimento da demanda de N para o desenvolvimento das plantas. Além disso, em solos mais férteis, como o da área experimental, a boa quantidade de MOS acumulada na camada superficial (Tabela 1) é considerada como fonte adicional de N mineral ao sistema, uma vez que dificilmente a FBN garante 100% da demanda de N requerida quando a soja é cultivada pela primeira vez em rotação com milho em solos tropicais (ALVES et al., 2006).

Entretanto, a tendência é de perda de parte do N fixado durante o cultivo de soja até a safra seguinte de milho, o que depende da qualidade do resíduo da colheita (relação C/N), condições climáticas e do intervalo entre as safras (GIACOMINI et al., 2004). No presente estudo, considerando a taxa de decomposição do resíduo da parte aérea da soja em  $0,0075 \text{ g g}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  em condição de Latossolo tropical (FABIAN, 2009), somente 18% de N-palhada adicionada no sistema ficaram disponíveis para o milho semeado depois de 229 dias de pousio (Tabela 5). Isso reforça a importância da introdução de culturas de cobertura na entressafra, e por conseguinte, o aproveitamento mais eficiente da reciclagem de nutrientes ofertados pela cultura leguminosa antecessora.

O balanço negativo observado nos tratamentos que receberam as menores doses de N-fertilizante se deve às elevadas produtividades de grãos de milho e, por conseguinte, à intensa exportação de N via grãos.



No entanto, o híbrido de milho testado parece ser mais eficiente no uso de N do que normalmente é observado em estudos divulgados na literatura. No tratamento sem fertilizante, a exportação de N foi de 9,6 kg t<sup>-1</sup> de grãos produzidos, e na maior dose aplicada, 12,3 kg t<sup>-1</sup> de grãos, para produtividades de 8.496 e 13.898 kg ha<sup>-1</sup> de grãos, respectivamente. Em estudo realizado por Alves et al. (2006), num Latossolo do cerrado de MS, a exportação média de N nos grãos de duas safras de milho em rotação com soja foi 13,5 kg t<sup>-1</sup> de grãos produzidos. Resende et al. (2012) verificaram média de 16,1 kg de N exportado para cada tonelada de grãos produzidos, em revisão feita com vários trabalhos publicados no Brasil e Estados Unidos.

O rendimento de grãos obtido confirma o elevado potencial produtivo do genótipo de milho testado. Entretanto, o manejo da adubação nitrogenada praticada na fazenda (189 kg ha<sup>-1</sup> de N-fertilizante) ainda resulta em balanço negativo aproximado de 9 kg ha<sup>-1</sup> de N mensurado na colheita de grãos. Nesse cálculo, foi considerada uma média de 70% de eficiência de uso dos fertilizantes nitrogenados no sistema solo-planta, levando-se em conta que o N estocado até 60 cm de profundidade é passível de aproveitamento pelo sistema radicular (ALVES et al., 2006; GAVA et al., 2006).

Apesar da obtenção de resposta positiva à doses crescentes de N-fertilizante, constatou-se acúmulo de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> na camada 40-60 cm aos 17 dias após aplicação de doses de N-ureia 50% superiores à utilizada na fazenda (Figura 6). Provavelmente, parte desse N acaba sendo recuperada pela cultura em sucessão, uma vez que aproximadamente 80% do sistema radicular das culturas anuais se concentram até 40 cm (ALVES et al.,

2006). Uma possibilidade para reduzir as perdas por lixiviação seria parcelar a adubação de cobertura em duas aplicações, em até 40 dias após a semeadura do milho (DUETE et al., 2008). Outra opção seria otimizar o uso dos componentes de entrada no sistema solo-planta. O uso de culturas de cobertura na entressafra é uma alternativa para favorecer o balanço positivo de N no sistema e reduzir a necessidade do uso de N-fertilizante no milho cultivado em sequência (SILVA et al., 2008). Por fim, cabe mencionar que há tendência de balanços mais positivos em sistema sequencial de soja/milho estabelecido há mais tempo (BELOW, 2002; CANTARELLA, 2007).

Mesmo com todas as dificuldades operacionais e metodológicas envolvidas no monitoramento da dinâmica de N no solo (MATTOS JÚNIOR; CANTARELLA; VAN RAIJ, 1995), foi possível identificar tendências relevantes no presente estudo, em especial após a realização da adubação de cobertura nitrogenada no milho, as quais sinalizam para a possibilidade de novos estudos direcionados à otimização da adubação nitrogenada em sistemas de produção de grãos e indicação de critérios de manejo para melhor controle dos riscos ambientais associados.

## 4 CONCLUSÕES

O  $\text{N-NO}_3^-$  é a forma de N mineral disponível que predomina no solo até 60 cm de profundidade, independentemente da época de coleta de solo na sequência soja-pousio-milho. A absorção do nutriente pelas culturas promove sensível redução nos estoques de N-mineral no perfil nas fases de florescimento e enchimento de grãos.

O N mineral no solo estocado aos 17 dias após a adubação de cobertura, em especial a forma  $\text{N-NO}_3^-$ , regula os teores de N em folhas e grãos, a produtividade de milho e a exportação do nutriente na colheita, podendo servir como índice complementar para refinamento do manejo da adubação nitrogenada para a cultura.

As cultivares de soja e de milho apresentam elevado potencial produtivo. A soja pode produzir acima de  $4.000 \text{ kg ha}^{-1}$  e o milho acima de  $13.000 \text{ kg ha}^{-1}$  de grãos nas condições dos Campos das Vertentes, MG. O rendimento de grãos de milho é maior conforme o aumento da dose de N-fertilizante, com estimativa de máximo retorno econômico para aplicações de cerca de  $160 \text{ kg ha}^{-1}$  de N.

O cultivo de soja pode acrescentar um crédito de  $31 \text{ kg ha}^{-1}$  de N no sistema solo-planta, mas o balanço no cultivo do milho foi negativo nas doses de adubação abaixo de  $189 \text{ kg ha}^{-1}$  e positivo para doses maiores do que  $226 \text{ kg ha}^{-1}$  de N-fertilizante.

A aplicação de doses acumuladas (semeadura e cobertura) acima de  $190 \text{ kg ha}^{-1}$  de N-fertilizante pode resultar em perdas de  $\text{N-NO}_3^-$  para camadas profundas de solo sem alcance do sistema radicular das culturas, o que representa risco de contaminação ambiental e de redução da

eficiência de uso de fertilizantes nitrogenados em lavouras dos Campos das Vertentes, MG.

### **AGRADECIMENTOS**

À FAPEMIG e ao CNPq, pelo auxílio financeiro e concessão de bolsas de estudo. À Embrapa Milho e Sorgo pelo auxílio financeiro e apoio na condução do experimento. Aos proprietários e funcionários da Fazenda Santa Helena, pela cessão da área experimental e insumos, e apoio na condução do experimento.

**Nitrogen dynamics in soil and plants and its relationship with corn grain yield in succession to soybean in an Oxisol with high built fertility**

**ABSTRACT**

Due to the complexity of the nitrogen (N) dynamics in the soil-plant system, there are doubts about nitrogen fertilization recommendation when high-yielding corn are grown in a soybean-corn sequence. The aim of this work was to quantify the contribution of soybean cultivation on N availability for corn grown in succession, the N balance and the availability of N-mineral in a soybean/fallow/corn sequence in a Oxisol with high built fertility under the influence of different NPK rates, in a farm located in the Campos das Vertentes region, Minas Gerais State, Brazil. Seven treatments were compared with different fertilizer levels applied at sowing and in topdressing; NPK rates corresponded to approximately 0.0; 0.5; 1.0 and 1.5 times the rate that the farmer normally applied for corn and soybeans crops. The nutrients sources varied according the inputs used in the farm in each agricultural season. Soil samples were collected at different times and depths to quantify N-mineral; leaf samples were collected to quantify N in soybeans and corn shoots. Soybean and corn plants were harvested at the end of the crops cycle to assess the grain yield. The N-mineral regulates the N content in the leaf and corn grain and the  $\text{N-NO}_3^-$  is correlated with the grain yield, N exported and the N content in the leaf and corn grain, which may serve as additional index of nitrogen fertilization management for corn crop. The soybean and corn cultivars have high potential productive. The soybean yield is above  $4.000 \text{ kg ha}^{-1}$  and the corn, above  $13.000 \text{ kg ha}^{-1}$ . The corn grain yield increases as the N-fertilizer rate is elevated, being the dose of maximum economic return of  $160 \text{ kg ha}^{-1}$  of N. The soybean adds a credit of  $31 \text{ kg ha}^{-1}$  of N in the plant-soil system as N in harvested grain; the N balance was negative in the plant-soil system in N-fertilizer rates below  $189 \text{ kg ha}^{-1}$  and positive for N-fertilizer rates greater than  $226 \text{ kg ha}^{-1}$ . The application of cumulative N rates above  $190 \text{ kg ha}^{-1}$  increase the fertilizer cost and result in  $\text{N-NO}_3^-$  loss below 40 cm deep, which reduces the use efficiency of N-fertilizer in the crop field located in the Campos das Vertentes region, MG.

Key words: N credits. N balance. Crop rotation. Soil organic matter. N use efficiency.

## REFERÊNCIAS

- AITA, C. et al. Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto: I-Dinâmica do nitrogênio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 739-749, jul./ago. 2004.
- AITA, C. et al. Plantas de cobertura de solo como fontes de nitrogênio ao milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p. 157-165, jan./mar. 2001.
- AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Nitrato no solo com a aplicação de dejetos líquidos de suínos no milho em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 2101-2111, set./out. 2008.
- ALLEONI, L. R. F.; CAMBRI, M. A.; CAIRES, E. F. Atributos químicos de um Latossolo de cerrado sob plantio direto, de acordo com doses e formas de aplicação de calcário. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 923-934, Nov./dez. 2005.
- ALVAREZ V. V. H. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.
- ALVES, B. J. R. et al. Fixação biológica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 449-456, mar. 2006.
- AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 241-248, jan./mar. 2002.

ARAÚJO, E. S. **Estimativa da quantidade de N acumulada pelo sistema radicular da soja e sua importância para o balanço de N do solo**. 2004. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

ARAÚJO, L. A. N.; FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. da. Adubação nitrogenada na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 8, p. 771-777, ago. 2004.

BEHLING, M. et al. Nodulação, acúmulo de nitrogênio no solo e na planta, e produtividade de soja em solo tratado com lodo de estação de tratamento de resíduos industriais. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 2, p. 453-462, abr./jun. 2009.

BELOW, F. E. **Fisiologia, nutrição e adubação nitrogenada do milho**. Piracicaba: Potafos, 2002. (Informações Agronômicas, 99).

BERGAMASCHI, H. et al. Déficit hídrico e produtividade na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 8, p. 243-249, ago. 2006.

CABEZAS, W. A. R. L. et al. Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 215-226, maio/abr. 2005.

CÂMARA, G. M. S. **Fixação biológica de nitrogênio em soja**. Piracicaba: IPNI, 2014. (Informações agronômicas, 147).

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.

CERRI, C. C. et al. Brazilian Green house gase missions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 6, p. 831-843, nov./dez. 2009.

COSTA, K. A. P. et al. Doses e fontes de nitrogênio em pastagem de capim-marandu: I-alterações nas características químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1591-1599, jul./ago. 2008.

DUETE, R. R. C. et al. Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (<sup>15</sup>N) pelo milho em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 1, p. 161-171, jan./fev. 2008.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic mass and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, n. 4, p. 529-538, nov. 1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa Produção de Informação, 2013.

FABIAN, A. J. **Plantas de cobertura: efeitos nos atributos do solo e na produtividade do milho e soja em rotação**. 2009. 83 p Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2009.

FANCELLI, A. L. Milho. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: IPNI, 2010. Cap. 2, p. 43-96.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. **Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo**. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2009. (Comunicado Técnico, 69).

FERREIRA, A. O. et al. Desempenho de genótipos de milho cultivados com diferentes quantidades de palha de aveia-preta e doses de nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, n. 2, p. 173-179, fev. 2009.

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



GAVA, G. D. C. et al. Balanço do nitrogênio da ureia (15 N) no sistema solo-planta na implantação da semeadura direta na cultura do milho. **Bragantia**, Campinas, v. 65, n. 3, p. 477-486, ago./out. 2006.

GIACOMINI, S. J. et al. Consorciação de plantas de cobertura antecedendo o milho em plantio direto. II-Nitrogênio acumulado pelo milho e produtividade de grãos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 4, p. 751-762, jul./ago. 2004.

GOLLANY, H. T. et al. Nitrogen leaching and denitrification in continuous corn as related to residue management and nitrogen fertilization. **Environmental Management**, New York, v. 33, n. 1, p. 289-298, Jan. 2004.

GOTT, R. M. et al. Fontes e épocas de aplicação de nitrogênio no milho safrinha. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 13, n. 1, p. 24-34, jan./abr. 2014.

HERZOG, R. D. S.; LEVIEN, R.; TREIN, C. R. Produtividade de soja em semeadura direta influenciada por profundidade do sulcador de adubo e doses de resíduo em sistema irrigado e não irrigado. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 3, p. 771-780, set./dez. 2004.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: [≤http://www.inmet.gov.br/portal/](http://www.inmet.gov.br/portal/)>. Acesso em: 10 set. 2014.

MATTOS JÚNIOR, D.; CANTARELLA, H.; VAN RAIJ, B. Manuseio e conservação de amostras de solo para preservação do nitrogênio inorgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 3, p. 423-431, jul./dez. 1995.

MENDES, I. C. et al. Adubação nitrogenada suplementar tardia em soja cultivada em Latossolos do Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 8, p. 1053-1060, ago. 2008.

MENDES, I. C.; HUNGRIA, M.; VARGAS, M. A. T. Soybean response to starter nitrogen and Bradyrhizobium inoculation on a Cerrado Oxisol under no-tillage and conventional tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 81-87, 2003.

PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Disponibilidade de cátions no solo alterada pelo sistema de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 4, p. 1031-1040, jul./ago. 2009.

PEOPLES, M. B.; HERRIDGE, D. F. Quantification of biological nitrogen fixation in agricultural systems. In: PEDROSA, F. O. et al. (Ed.). **Nitrogen fixation: from molecules to crop productivity**. Dordrecht: Kluwer Academic, 2000. p. 519-524.

PEREIRA, H. S. et al. Ammonia volatilization of urea in the out-of-season corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1685-1694, nov./dez. 2009.

PHILLIPS, I.; BURTON, E. Nutrient leaching in undisturbed cores of an acidic sandy Podsol following simultaneous potassium chloride and diammonium phosphate application. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 73, n. 1, p. 1-14, 2005.

RAMBO, L. et al. Testes de nitrato no solo como indicadores complementares no manejo da adubação nitrogenada em milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 4, p. 1279-1287, jul./ago. 2004.

RAMBO, L. et al. Teor de nitrato como indicador complementar da disponibilidade de nitrogênio no solo para o milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 4, p. 731-738, jul./ago. 2007.

RESENDE, A. V. et al. **Fertilidade do solo e manejo da adubação NPK para alta produtividade de milho no Brasil Central**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo. 2012. (Circular Técnica, 181).

SANGOI, L. et al. Bases morfofisiológicas para maior tolerância dos híbridos modernos de milho a altas densidades de plantas. **Bragantia**, Campinas, v. 61, n. 2, p. 101-110, maio/ago. 2002.

SANTOS, L. P. D. et al. Doses de nitrogênio na cultura do milho para altas produtividades de grãos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 12, n. 3, p. 270-279, 2013.

SILVA, D. F. et al. Nitrogen dynamics in soils cultivated with maize and fertilized with pig Slurry. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 7, n. 1, p. 9-23, 2012.

SILVA, E. C. et al. Utilização do nitrogênio da palha de milho e de adubos verdes pela cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, nesp., p. 2853-2861, out./dez. 2008.

SIQUEIRA NETO, M. et al. Mineralização e desnitrificação do nitrogênio no solo sob sistema plantio direto. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 4, p. 923-936, dez. 2010.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Adubação com nitrogênio. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p. 129-144.

TEDESCO, M. J.; VOLKWEISS, S. J.; BOHNEN, H. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. (Boletim Técnico, 5).

WENDLING, A. et al. Recomendação de adubação nitrogenada para trigo em sucessão ao milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 985-994, set./out. 2007.

**ARTIGO 2    Resposta da soja de alta produtividade à adubação em solo  
com elevado teor de potássio**

Clério Hickmann<sup>1</sup>, Álvaro Vilela de Resende<sup>2</sup>, Carlos Alberto Silva<sup>3</sup>,  
Julian Junio de Jesus Lacerda<sup>3</sup>, Antonio Eduardo Furtini Neto<sup>3</sup> e Silvino  
Guimarães Moreira<sup>4</sup>

**Artigo formatado de acordo com a Revista Trópica: Ciências Agrárias e  
Biológicas**

---

<sup>1</sup> Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras (UFLA) - Campus  
Universitário - Caixa Postal 3037 - CEP 37200-000 - Lavras, MG - Brasil. E-mail:  
[clerioh@gmail.com](mailto:clerioh@gmail.com) \*autor para correspondência;

<sup>2</sup> Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Milho e Sorgo/CNPMS -  
Rod. MG 424 KM 65 - Caixa postal 151 - CEP 35701-970 - Sete Lagoas, MG -  
Brasil. E-mail: [alvaro.resende@embrapa.br](mailto:alvaro.resende@embrapa.br) ;

<sup>3</sup> Departamento de Ciência do Solo, Universidade Federal de Lavras (UFLA) - Campus  
Universitário - Caixa Postal 3037- CEP 37200-000 - Lavras, MG - Brasil. E-mail:  
[csilva@dcs.ufla.br](mailto:csilva@dcs.ufla.br), [julianlacerda@gmail.br](mailto:julianlacerda@gmail.br), [julianlacerda@gmail.br](mailto:julianlacerda@gmail.br),  
[afurtini@dcs.ufla.br](mailto:afurtini@dcs.ufla.br) .

<sup>4</sup> Universidade Federal de São João Del Rei (UFSJ) - Campus Sete Lagoas (CSL) -  
Rod. MG 424 KM 47 - Caixa postal 56 - CEP 35701-970 - Sete Lagoas, MG - Brasil.  
E-mail: [silvino@ufsj.edu.br](mailto:silvino@ufsj.edu.br) .

**Resumo** - A introdução de cultivares de soja de hábito indeterminado ampliou as possibilidades de cultivos em rotação ou sucessão em áreas produtoras da região do Cerrado, mas representa uma componente menos conhecido no manejo da fertilidade do solo. O objetivo deste trabalho foi verificar a resposta da soja de hábito indeterminado às variações na adubação NPK de semeadura e cobertura potássica em Latossolo Vermelho de fertilidade construída dos Campos das Vertentes, MG. O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com parcelas subdivididas, em três repetições. Nas parcelas, os tratamentos consistiram de doses de 315 e 485 kg ha<sup>-1</sup> do formulado NPK 02-30-10 no sulco de semeadura e, nas subparcelas, testou-se a aplicação de 0, 15, 30 e 45 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O em cobertura, aos 21 dias após a semeadura. Não há efeito da adubação de semeadura com NPK, mas a produtividade aumenta linearmente em razão do aporte adicional de potássio em cobertura. Assim, a cultivar de soja requer mais K para expressar potencial produtivo próximo de 4 t há<sup>-1</sup>. Com disponibilidade inicial de K<sup>+</sup> acima de 100 mg dm<sup>-3</sup>, maior produtividade é alcançada com suprimento de 93 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, o que é garante também maior rentabilidade da prática.

**Palavras-chave:** potássio, soja de hábito indeterminado, agricultura de alto investimento.

### **High yield soybean response to fertilization in a soil with high potassium availability**

**Abstract** - The introduction of soybean cultivars with indeterminate habit increased the option of crop rotation and succession in grain production areas of the Cerrado region, but represent one lesser-known component in soil fertility management. The aim of this work was to verify if soybean of indeterminate habit respond to variation in sowing NPK fertilizer levels and to top dressing K fertilization in a Red Oxisol with high fertility located in the Campos das Vertentes, MG region. The treatments tested consisted of two rates of 315 and 485 kg ha<sup>-1</sup> of NPK 02-30-10 at sowing, and, in the subplots, it was tested 0, 15,30 and 45 kg ha<sup>-1</sup> of topdressing K<sub>2</sub>O, which were added to soils 21days after sowing. There is no significant difference in the response of soybean to sowing fertilization, but the grain yield increases linearly as the topdressing K levels added in soil is increased. The soybean cultivar requires more K<sub>2</sub>O to express grain yield potential next to 4 t ha<sup>-1</sup>. When initial soil K availability is above to 100 mg dm<sup>-3</sup>, higher productivity is achieved when 93 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O are supplied to plants, which is also a practice that increase fertilization profitability.

**Key-words:** potassium, indeterminate habit soybean, high input agriculture.

## **INTRODUÇÃO**

Em solos com teores de nutrientes acima dos níveis críticos, não se espera que incrementos adicionais na adubação de manutenção possam resultar em ganhos de produtividade que sejam compensadores economicamente. Entretanto, a definição do teor de K correspondente ao nível crítico parece depender das condições locais. As adubações contínuas associadas ao efeito residual dos fertilizantes potássicos nos solos de textura argilosa deram origem a uma condição de boa disponibilidade de potássio (K) em lavouras sob cultivo no longo prazo, em sistema plantio direto (SPD) (Foloni & Rosolem, 2008; Resende,

2011). De acordo com Alvarez V. et al. (1999), o nível crítico de K para solos de Minas Gerais é de  $70 \text{ mg dm}^{-3}$ , enquanto Vilela et al. (2004) consideram a faixa de 50 a  $80 \text{ mg dm}^{-3}$  como adequada para solos argilosos do Cerrado. Na região sul do Brasil foi estabelecido novo nível crítico de K para a cultura da soja, em lavouras sob plantio direto (CQFSRS/SC, 2004; Brunetto et al., 2005). Verificou-se que o nível crítico antes estabelecido em  $80 \text{ mg dm}^{-3}$  deveria ser atualizado para  $60 \text{ mg dm}^{-3}$ , pois a soja não respondia à adubação em solos com disponibilidade acima desse valor. Para solos originários de basalto cultivados sob semeadura direta e rotação de culturas no Paraná, Oliveira Júnior et al. (2010) e Embrapa (2011) não recomendam a adubação potássica para a soja quando a disponibilidade inicial de K no solo era maior que  $117 \text{ mg dm}^{-3}$ , pois o teor crítico para a cultura é de  $78 \text{ mg dm}^{-3}$ .

Em Minas Gerais, as recomendações oficiais de fertilizantes NPK para a soja (Novais, 1999) foram estabelecidas a partir de sistemas de plantio convencional. Para uma disponibilidade de K entre 71 e  $120 \text{ mg dm}^{-3}$  e produtividade esperada de até  $3 \text{ t ha}^{-1}$ , a recomendação seria de  $40 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ . Uma questão a ser respondida é se essa indicação ainda é válida para áreas de produção que adotam elevado nível tecnológico relacionado ao manejo da fertilidade e uso de cultivares de potencial produtivo cada vez maior em SPD.

A mesorregião dos Campos das Vertentes vem se consolidando como uma grande produtora de grãos e a soja é utilizada como opção de rotação no SPD. O uso de cultivares precoces de hábito indeterminado apresenta-se como estratégia promissora, inclusive para viabilizar outras culturas em segunda safra. Esses genótipos apresentam uma série de

vantagens agronômicas, com destaque para a antecipação da época de semeadura, precocidade, elevado índice de colheita, crescimento ereto e folíolos pequenos, o que facilita o manejo de insetos-pragas e doenças, e flexibilidade de arranjos espaciais de plantas (Oliveira Júnior et al., 2013; Procópio et al., 2013).

Embora haja relatos de lavouras muito produtivas, ainda se conhece pouco sobre as exigências nutricionais desse novo tipo de cultivar (Borges et al., 2013). Neste trabalho, objetivou-se verificar se a soja de hábito indeterminado responde às variações na adubação NPK de semeadura e cobertura potássica em solo de fertilidade construída, na região dos Campos das Vertentes, MG.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

O experimento foi conduzido entre outubro de 2011 e março de 2012, na Fazenda Santa Helena, situada a 21°15' 40'' de latitude sul e 44° 30'30'' de longitude oeste, em Nazareno, MG. A altitude do local é de 1020 m. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico, com textura argilosa (Embrapa, 2013), e possui histórico de manejo com elevado investimento tecnológico para produção de grãos. A área era manejada sem preparo do solo por oito safras de cultivo de milho, permanecendo em pousio com vegetação espontânea nas entressafras. Nesse período, somente em um ano foi utilizada a cultura de safrinha com girassol.

A soja cultivar Nidera NA 5909 RR, de hábito indeterminado, foi semeada com uso de semeadora de tração mecanizada (com nove linhas de semeadura espaçadas de 0,6 m) em rotação ao milho, no dia 21 de



outubro de 2011, com população final estimada de 380 mil plantas ha<sup>-1</sup>. O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, com parcelas subdivididas, em três repetições. As parcelas consistiram de nove linhas espaçadas de 0,6 m e com 40 m de comprimento. Nessas parcelas, foram comparadas aplicações de 315 e 485 kg ha<sup>-1</sup> do formulado NPK 02-30-10 (32 e 49 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O), distribuído no sulco de semeadura com 5 cm de profundidade. A menor dose correspondeu à adubação normalmente empregada na fazenda e a maior dose visou possibilitar possíveis respostas da soja ao incremento na adubação de semeadura, e equivale a cerca de 50% acima da dose de 315 kg ha<sup>-1</sup> do formulado NPK 02-30-10 aplicada na fazenda na semeadura da soja. Nas subparcelas com 10 m de comprimento, foram comparadas doses de 0, 15, 30 e 45 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O na forma de cloreto de potássio (KCl) adubação de cobertura. As doses foram aplicadas manualmente em filete, nas entrelinhas, no estágio V2 (21 dias após semeadura (DAS)). Foram aplicados, conforme recomendações técnicas dos fabricantes e fornecedores, os herbicidas glifosato e dicloreto de paraguat, para dessecação e controle de ervas daninhas; os inseticidas flubendiamida, clorpirifós, lufenuron e tiametoxam + lambdacialotrina, para o controle de percevejos, lagartas e ácaros; e os fungicidas trifloxistrobina + proclorazoxolol e trifloxistrobina + ciproconazol, para o controle de fungos. As sementes foram inoculadas com *Bradyrhizobium brasiliensis* (1 mL = 5 bilhões de bactérias), e no tratamento de sementes foi utilizado o inseticida fipronil, para proteção das plântulas contra ação de pragas de sementes. Também foram aplicados os micronutrientes boro, na semeadura, na dose de 2 kg ha<sup>-1</sup> de octaborato de sódio, em mistura com o fertilizante NPK, cobalto e

molibdênio, via foliar; aplicaram-se também 96 mL ha<sup>-1</sup> do composto nutricional QuimifolCoMo Plus<sup>R</sup>, que continha 1% de cobalto e 6% de molibdênio nas formas de sulfato de cobalto quelatizado e molibdato de sódio.

Antes da aplicação dos tratamentos de cobertura potássica, foi realizada uma amostragem de solo nas entrelinhas da soja, para caracterização das condições gerais de fertilidade na área experimental (Tabela 1). Destaca-se a disponibilidade de K acima dos níveis críticos (70 a 80 mg dm<sup>-3</sup>) estabelecidos para o nutriente (Alvarez V. et al., 1999; Vilela et al., 2004). No florescimento pleno e ao final do ciclo da cultura, foram realizadas outras amostragens de solo nas subparcelas, coletando-se nove amostras simples, sendo três nas linhas de semeadura e seis nas entrelinhas da soja. No florescimento também foi feita amostragem foliar, composta de 15 trifólios por subparcela, retirando-se o terceiro ou quarto trifólio completamente expandido a partir do ápice da planta. As análises de solo e de tecido vegetal foram realizadas conforme métodos especificados em Silva (2009).

**Tabela 1.** Caracterização química e física do solo da área experimental, na profundidade de 0 a 20 cm, antes da adubação de cobertura com potássio

pH <sub>água</sub>	P*	K*	S	Zn	Fe	Mn	Cu	P-rem	V	Ca	Mg	H+Al	T
			----- mg dm <sup>-3</sup> -----					mg L <sup>-1</sup>	%		---cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ---		
5,7	8	103	34	5	38	16	2	5	36	2,3	0,6	5,5	8,8
	Areia		Silte			Argila			Matéria Orgânica				
	-----dag kg <sup>-1</sup> -----												
	17		25			58			4,9				

\*Extrator: Mehlich-1.

Aos 131 DAS, foram colhidas plantas em três linhas de 4 m de comprimento, na área central das subparcelas. Após a debulha mecânica, foi determinada a produtividade de grãos, ajustando-se o teor de água desses para 130 g kg<sup>-1</sup>. A partir da quantificação dos teores de nutrientes nos grãos, conforme Silva (2009), estimou-se a exportação de K pela soja, considerando-se o conteúdo do nutriente nos grãos multiplicado pela massa seca total de grãos.

Os dados foram submetidos à análise de variância. As médias dos tratamentos de adubação na semeadura foram comparadas pelo teste F e ajustaram-se modelos de regressão para as variáveis dependentes, em função das doses de K<sub>2</sub>O aplicadas em cobertura. Utilizou-se o programa estatístico Sisvar (Ferreira, 2011).

Efetou-se uma análise econômica com base nos custos dos fertilizantes e de aplicação do KCl em cobertura, dados esses que foram confrontados com a receita gerada pela venda dos grãos. Os preços pagos por kg de fertilizante foram de R\$ 0,99 e R\$ 1,06 para o formulado NPK 02-30-10 e o KCl, respectivamente. O custo de aplicação mecanizada da

cobertura potássica foi estimado em R\$ 10,00 por hectare (considerando-se o custo operacional total médio da fazenda), sendo as demais despesas com a cultura consideradas constantes. O valor de comercialização da saca de 60 kg de soja foi de R\$ 52,42. Calculou-se a rentabilidade dos tratamentos de adubação em relação ao manejo padrão da fazenda (aplicação de 315 kg ha<sup>-1</sup> de NPK 02-30-10 na semeadura, sem cobertura potássica). Como referência monetária, a cotação do dólar americano em 30 de março de 2012 era de R\$ 1,8262.

### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Não houve efeito significativo da adubação NPK na semeadura e sua interação com a cobertura potássica nas variáveis estudadas. Entretanto, foi observada influência significativa da aplicação de K em cobertura nos teores de K no solo à época do florescimento e após a colheita, na produtividade da soja e no K exportado (Tabela 2).

**Tabela 2.** Resumo da análise de variância para os teores de K no solo, nas folhas e nos grãos, K total exportado e produtividade da soja em função de adubações NPK na semeadura e da cobertura potássica

Fonte de variação	GL	Quadrado Médio						Produtividade
		K <sub>Mehlich-1</sub> no solo			K <sub>Mehlich-1</sub> na planta			
		Florescimento	Final do ciclo	K-folha	K-grão	K-exportado	K-grão	
Bloco	2	409 <sup>ns</sup>	269 <sup>ns</sup>	0,059 <sup>ns</sup>	0,134 <sup>ns</sup>	98,65 <sup>ns</sup>	223026 <sup>ns</sup>	
NPK semeadura (S)	1	26 <sup>ns</sup>	1097 <sup>ns</sup>	0,032 <sup>ns</sup>	1,307 <sup>ns</sup>	20,70 <sup>ns</sup>	203320 <sup>ns</sup>	
Erro 1	2	359	351	0,031	1,382	42,45	67628	
K cobertura (C)	3	1522*	1291*	0,018 <sup>ns</sup>	1,247 <sup>ns</sup>	178,99*	444911*	
S x C	3	167 <sup>ns</sup>	134 <sup>ns</sup>	0,026 <sup>ns</sup>	0,036 <sup>ns</sup>	2,09 <sup>ns</sup>	5328 <sup>ns</sup>	
Erro 2	12	312	251	0,041	0,653	44,69	95303	
Total	23							
CV 1 (%)		19,9	20,6	6,9	6,0	9,0	7,0	
CV 2 (%)		18,6	17,4	8,0	4,1	9,2	8,4	

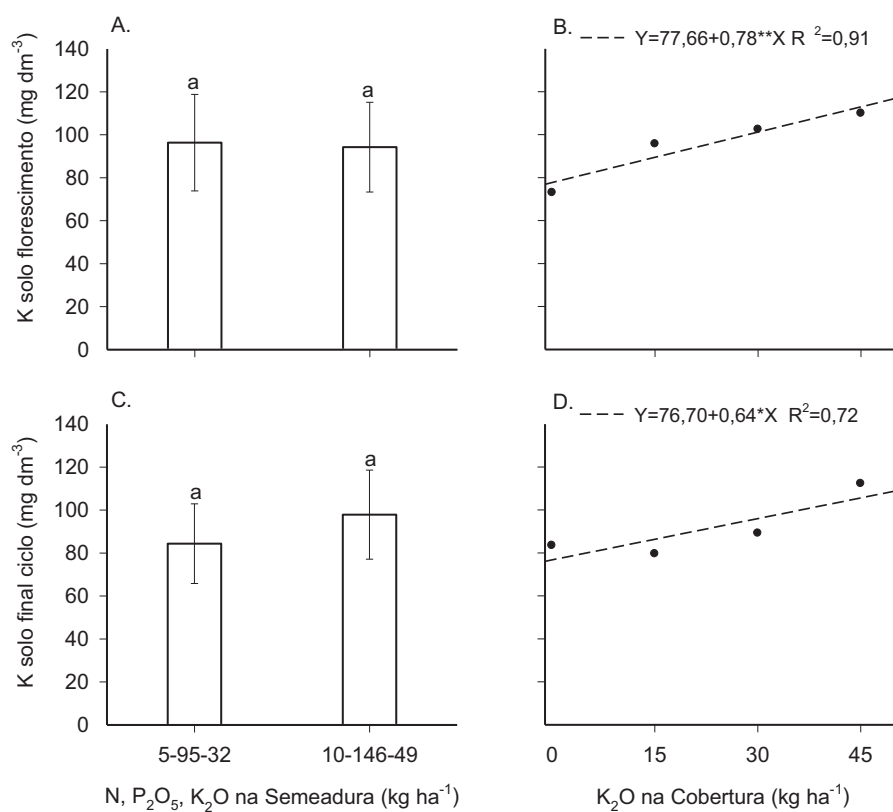
\*. <sup>ns</sup> Significativo e não significativo, respectivamente, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F. Extrator: Mehlich-1. CV: Coeficiente de Variação.

Embora as quantidades fornecidas em cobertura tenham sido relativamente pequenas (Petter et al., 2014), constatou-se aumento linear na disponibilidade de K no solo avaliado na época do florescimento, efeito esse observado também na amostragem realizada após a colheita da soja (Figura 1). As variações de disponibilidade de K no solo, conforme os tratamentos, não refletiram nos teores de K nas folhas e nos grãos (Tabela 3), mas influenciaram a produtividade e, por consequência, a exportação do nutriente com a colheita (Figura 2).

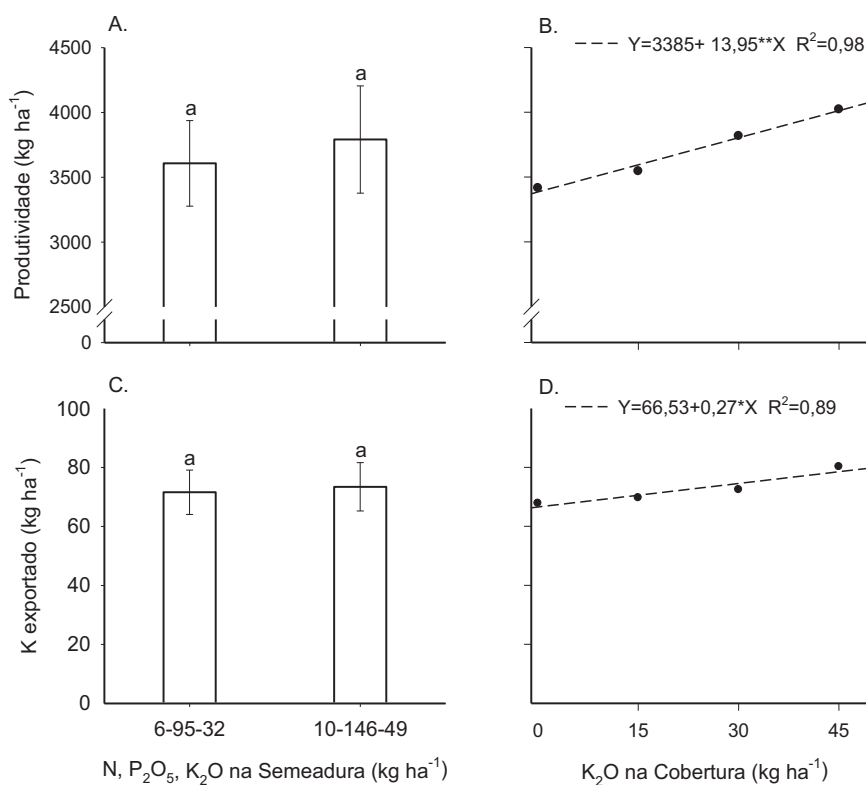
**Tabela 3.** Teores de K ( $\text{g kg}^{-1}$ ) nas folhas e nos grãos da soja, em função de doses de NPK na adubação de semeadura e de  $\text{K}_2\text{O}$  em cobertura

Adubação de semeadura <sup>1</sup> ( $\text{kg ha}^{-1}$ )			Adubação de cobertura <sup>2</sup> ( $\text{kg ha}^{-1}$ )				Média
N	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{K}_2\text{O}$	0	15	30	45	
			K-folha				
6	95	32	25,7	24,8	25,2	24,3	25,0
10	146	49	25,2	24,5	26,8	26,4	25,7
Média			25,5	24,7	26,0	25,3	25,4
			K-grão				
6	95	32	20,0	19,9	19,2	20,3	19,8
10	146	49	19,7	19,3	18,7	19,7	19,3
Média			19,8	19,6	18,9	20,0	19,5

<sup>1, 2</sup> Efeito não significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F. Interação não significativa entre as fontes de variação ao nível de 5% de probabilidade.



**Figura 1.** Teores de K no solo na fase de florescimento e após a colheita, em função de doses de NPK na adubação de sementeira (A e C) e de K<sub>2</sub>O em cobertura (B e D) na cultura da soja. \*,\*\* Significativo no nível de 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.



**Figura 2.** Produtividade de grãos e quantidade de K exportado em função de níveis de NPK na adubação de sementeira (A e C) e de K<sub>2</sub>O em cobertura (B e D) na cultura da soja. \*, \*\* Significativo ao nível de 5% e 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

O teor de 103 mg dm<sup>-3</sup> de K no início do ciclo da soja pode ser considerado relativamente elevado, o que, associado à disponibilidade dos outros nutrientes (Tabela 1), caracteriza uma condição de solo de fertilidade construída. Adicionalmente, esperava-se que o tamponamento desse solo constituído de 58 dag kg<sup>-1</sup> de argila seria suficiente para garantir a expressão do potencial produtivo da soja, mesmo sob menores



níveis de adubação. Esse tamponamento parece ter se confirmado, parcialmente, pela ausência de respostas à variação na adubação NPK de semeadura, onde houve aporte diferencial desses nutrientes, com destaque para o fósforo. Todavia, os dados da Figura 1 evidenciam que a maior dose da adubação de cobertura com K foi necessária para a manutenção do nível inicial do nutriente no solo até o final do ciclo de cultivo da soja, comprovando que a reserva de K disponível no Latossolo estudado pode baixar de forma relativamente rápida (Oliveira Júnior et al., 2013). Na ausência da cobertura potássica, houve uma redução na disponibilidade de K em cerca de  $20 \text{ mg dm}^{-3}$ , situando-a próximo a  $80 \text{ mg dm}^{-3}$ , mas, ainda assim, permanecendo na faixa considerada adequada por Alvarez V et al. (1999) e Vilela et al. (2004).

Para repor a quantidade de K exportada pela soja, é preciso fornecer 20 kg de  $\text{K}_2\text{O}$  por tonelada de grãos colhida (Embrapa, 2011; Oliveira Júnior et al., 2013). Nas combinações de tratamentos, a produtividade absoluta variou de 3,3 a  $4,1 \text{ t ha}^{-1}$ , o que representa valores de exportação entre 66 e  $82 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ , enquanto as quantidades fornecidas ficaram entre 31 e  $93 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$ . Assim, as produtividades (Figura 2) e os teores do nutriente no solo (Figura 1), crescentes com as doses da cobertura potássica, confirmam que essa adubação foi importante para complementar a quantidade de K aplicada na semeadura. À medida que se incrementou a adubação de cobertura, ofertou-se K acessível às plantas no início da fase de absorção mais intensa da cultura, o que causou ganhos de produtividade (Lana et al., 2002). Os maiores aportes do nutriente foram efetivos em garantir o acúmulo de nutrientes nos grãos para

produtividades mais elevadas, sem que houvesse depleção da fertilidade do solo (Figura 1).

Esses aspectos são relevantes, pois indicam que o tamponamento de K num Latossolo argiloso pode não ser tão forte, estando sujeito às oscilações de disponibilidade em curto prazo, decorrentes do balanço entre as adubações realizadas e a demanda para cultivos de grande exigência nutricional (Oliveira Júnior et al., 2013). A soja extrai cerca de 38 kg de  $K_2O$  por tonelada de grãos produzida e a exportação representa 53% do absorvido durante o ciclo (Embrapa, 2011). Por isso, pode haver comprometimento da fertilidade do solo para a cultura em sucessão, quando a adubação de manutenção é feita em doses subótimas. Wendling et al. (2008) indicam que, para solos com elevada disponibilidade de K (até duas vezes o teor crítico), a adubação de manutenção deve ser realizada para repor a quantidade exportada mais as eventuais perdas do nutriente no sistema. Conforme os autores, a recomendação é de que se aplique uma quantidade 25% acima da exportação.

O presente trabalho evidenciou o elevado potencial produtivo de um genótipo moderno de soja, que atingiu patamares de produtividade acima dos tetos observados até alguns anos atrás em Minas Gerais. As produtividades alcançadas e a correspondente exportação de K foram mais elevadas do que os valores modais da cultura, à época da definição das recomendações de Novais (1999), para a adubação da soja no estado. De acordo com esse autor, a aplicação de  $40 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $K_2O$  seria suficiente para produzir até  $3 \text{ t ha}^{-1}$  de grãos em solos de fertilidade construída. Na nova realidade que se apresenta, com rendimento de grãos próximos a  $4 \text{ t ha}^{-1}$ , a manutenção de ambientes de alto potencial

produtivo requer maior atenção não só em repor o K exportado nas colheitas, mas em conservar os teores do nutriente no solo em níveis condizentes com a intensidade de cultivos no sistema de rotação.

Essa ponderação encontra respaldo no balanço de K em sistemas de produção estabelecido por Oliveira Junior et al. (2010), tendo como base as recomendações para o cultivo de soja em solos de fertilidade construída nos estados do Paraná, São Paulo e no Cerrado. As doses sugeridas para uma expectativa de produtividade de 3 t ha<sup>-1</sup> nessas regiões são de 50 a 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, a partir das quais os autores constataram haver risco de um balanço negativo, ou seja, déficit nos estoques do nutriente nos solos, com prejuízo para as culturas componentes dos sistemas de produção. De fato, a obtenção de produtividades máximas variando de 3,3 a 4,1 t ha<sup>-1</sup> em Latossolos dos estados de São Paulo (Foloni & Rosolem, 2008) e do Piauí (Petter et al., 2012) foi associada ao fornecimento de doses entre 85 e 97 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O.

É importante ressaltar ainda que, a despeito da resposta à adubação em cobertura obtida neste estudo, interessa mais a quantidade total de K fornecida do que a época de aplicação. Opções de se aplicar o K em épocas diversas, antes ou após a semeadura da soja, já tiveram sua efetividade demonstrada (Foloni & Rosolem, 2008; Petter et al., 2012, 2014). Para evitar problemas do efeito salino do fertilizante sobre a germinação da soja, a aplicação no sulco de semeadura deve ser limitada a 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (Vilela et al., 2004; Oliveira Junior et al., 2010) e o restante da dose de manutenção distribuído em pré-semeadura ou em cobertura.

Os teores de K nas folhas na época do florescimento e nos grãos mantiveram-se relativamente constantes entre os tratamentos (Tabela 3). Isso pode ser explicado pelo ganho contínuo de produtividade com o aumento no suprimento do nutriente, de modo que os incrementos de absorção foram prontamente mobilizados para atender à demanda fisiológica para a crescente produção de grãos (Lana et al., 2002), permanecendo estáveis as concentrações presentes em cada órgão da planta. Os teores foliares variaram entre 24 e 27 g kg<sup>-1</sup>, enquadrando-se nas faixas de interpretação consideradas adequadas para diferentes regiões produtoras do País (Embrapa, 2011), mas bem acima do valor de referência ou nível crítico proposto para a cultura em Minas Gerais (Martinez et al. 1999). Santos et al. (2008) e Oliveira et al. (2013) apontam a necessidade de maiores teores de K-foliar na soja para se obter produtividades elevadas em solos argilosos do Cerrado e para cultivares de hábito indeterminado. Dessa maneira, não houve consumo de luxo e, como não se atingiu um ponto de máxima na curva de resposta (Figura 2), é possível que a cultivar utilizada apresentasse produtividades ainda mais elevadas se recebesse maiores doses de K. Outros trabalhos comprovam haver situações de solo e de manejo da adubação que promovem o consumo de luxo, podendo culminar em maiores taxas de exportação do nutriente (Foloni & Rosolem, 2008, Petter et al., 2012).

As concentrações de K nos grãos variaram pouco entre os tratamentos (Tabela 3), fazendo com que as quantidades exportadas fossem diretamente relacionadas à produtividade, chegando a cerca de 80 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O (Figura 2). Fica claro que patamares de produtividade mais elevados têm forte impacto na dinâmica de K no sistema solo-planta,

reforçando a necessidade de o agricultor monitorar constantemente o *status* de fertilidade do ambiente de cultivo. Nas condições experimentais deste trabalho, a análise de solo permitiu detectar variações na disponibilidade de K associadas às diferenças de produtividade, o que não foi possível com a análise foliar.

Não houve diferença significativa na produtividade entre as plantas de soja que receberam a adubação NPK normalmente utilizada pela fazenda na semeadura ou a dose aumentada (Figura 2). Por outro lado, o fornecimento adicional de K durante o ciclo proporcionou ganho absoluto de até 756 kg ha<sup>-1</sup> de grãos, partindo do pior cenário (aplicação de apenas 33 kg ha<sup>-1</sup> na semeadura) para o melhor (48 + 45 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O em semeadura + cobertura). A análise econômica confirmou não haver vantagem em aumentar a adubação NPK na semeadura, mas obteve-se maior rentabilidade à medida que se incrementou o aporte de potássio (Tabela 4). Constata-se a viabilidade econômica do investimento em adubação potássica nas condições do solo estudado, porém, com a resposta linear ao nutriente, não foi possível identificar a dose para máxima produtividade econômica.

**Tabela 4.** Rentabilidade decorrente dos tratamentos de adubação NPK na semeadura e de cobertura potássica na soja.

Tratamento de adubação		Incremento <sup>1</sup>		
Semeadura NPK 02-30-10	Cobertura KCl	Produtividade de grãos kg ha <sup>-1</sup>	Produtividade Receita	Custo Lucro
	0	3342	-	-
315	25	3461	103,97	36,60
	50	3680	295,30	63,20
	75	3943	525,07	89,79
	0	3485	124,93	168,97
485	25	3627	249,00	205,57
	50	3952	532,94	232,16
	75	4098	660,49	258,76

<sup>1</sup> Incrementos observados em relação ao manejo padrão da fazenda (aplicação de 315 kg ha<sup>-1</sup> de NPK 02-30-10, sem cobertura potássica). Preço por kg de fertilizante: NPK 02-30-10 = R\$ 0,99; KCl = R\$ 1,06. Custo da aplicação mecanizada de KCl em cobertura: R\$ 10,00 por hectare. Valor da saca de 60 kg de soja: R\$ 52,42. Cotação do dólar americano em 30 de março de 2012 = R\$ 1,8262.

Numa análise geral dos resultados obtidos, compreende-se que a cultivar de soja de hábito indeterminado utilizada no experimento permite atingir elevados tetos de produtividade, mas requer maior suprimento de K em cobertura. Assim, os níveis de disponibilidade no solo tidos como adequados na literatura (Alvarez V. et al., 1999, Vilela et al., 2004) podem não ser compatíveis ou as doses de manutenção recomendadas (Novais 1999, Sousa e Lobato 2004) podem não ser suficientes para garantir a demanda dessas cultivares com maior massa vegetal e mais produtivas.

A situação observada nos Campos das Vertentes diverge inclusive das recomendações mais recentes que contemplam o manejo de solos associados à vegetação de Cerrado (Sousa & Lobato, 2004). Esses autores sugerem que, para uma disponibilidade inicial de K acima de  $80 \text{ mg dm}^{-3}$ , a aplicação de  $40 \text{ a } 50 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  possibilitaria produzir entre  $3 \text{ a } 4 \text{ t ha}^{-1}$  de soja. Essa expectativa não se confirmou no presente estudo, onde somente com a dose total de  $93 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{K}_2\text{O}$  ( $48 \text{ kg}$  na semeadura e  $45 \text{ kg}$  em cobertura) foi possível alcançar  $4 \text{ t ha}^{-1}$  de grãos colhidos e repor a exportação em grãos, preservando o nível inicial de K disponível no solo. Portanto, há indicações que sinalizam para a necessidade de mais experimentação, para se definir novos índices de demanda nutricional de e níveis críticos do nutriente no solo e na planta, com vistas à obtenção de alta produtividade de grãos e máximo retorno econômico da adubação.

### CONCLUSÕES

Não há diferença significativa da produtividade de soja em função da variação da adubação de semeadura, mas a produtividade aumenta

linearmente pelo aporte adicional de potássio em cobertura, em solo de fertilidade construída.

Os teores de K nas folhas e nos grãos permanecem constantes e a exportação do K total é proporcional à produtividade de grãos, independentemente da adubação potássica.

A cultivar de soja avaliada requer mais K na adubação de manutenção para expressar potencial produtivo próximo de 4 t ha<sup>-1</sup>. Com disponibilidade inicial de K no solo acima de 100 mg dm<sup>-3</sup>, maior produtividade é alcançada com suprimento de 93 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, o que é garante maior rentabilidade da prática de adubação.

#### **AGRADECIMENTOS**

À FAPEMIG, pelo apoio financeiro e concessão de bolsas de estudo. Ao CNPq, pela concessão de bolsa de pesquisa e financiamento de parte das ações deste projeto de pesquisa. À Fazenda Santa Helena, pela cessão da área experimental e auxílio na condução e manutenção do experimento. À Embrapa Milho e Sorgo, pelo auxílio de campo, laboratório e pelo financiamento de parte das ações do estudo. Ao DCS/UFLA, por permitir a realização das análises de solo e pelo suporte para realização do estudo.



## REFERÊNCIAS

ALVAREZ V, V. H.; NOVAIS, R. D.; BARROS, N. D.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S.; RIBEIRO, A. C. & GUIMARÃES, P. T. G. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (eds.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.

BORGES, W. L. B.; MATEUS, G. P.; FREITAS, R. S.; LAZARINI, E.; CAZENTINI FILHO, G.; HIPÓLITO, J. L.; TOKUDA, F. S.; TOMAZINI, N. R.; GASPARINO, A. C.; FINOTO, E. L. Avaliação regional de cultivares de soja no noroeste paulista - safras 2011/12 e 2012/13. **Nucleos**, edição especial, p.23-41, 2013.

BRUNETTO, G., GATIBONI, L. C., SANTOS, D. R. D., SAGGIN, A. & KAMINSKI, J. Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em um Argissolo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.569-571, 2005.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFSRS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre, 2004. 400p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 312p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja: Região central do Brasil 2012 e 2013**. Londrina: Embrapa Soja - Sistemas de Produção, n.15, 2011. 261p.

FERREIRA, D. F. **SISVAR: um programa para análises e ensino de estatística**. Revista Symposium. Lavras, v.6, p.36-41, 2008.

FOLONI, J. S. S. & ROSOLEM, C.A. Produtividade e acúmulo de potássio na soja em função da antecipação da adubação potássica no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.1549-1561, 2008.

KUMAR, R.; KARMAKAR, S.; KUMARI, S.; SARKAR, A.K.; DUTTA, S.K. & MAJUMDAR, K. Improving productivity and profitability of the maize-wheat system in Jharkhand. **Better Crops**, v. 97, n.4, p.29-31, 2013.

LANA, R. M. Q.; HAMAWAKI, O. T.; DE LIMA, L. M. L.; JUNIOR, L. A. Z. Resposta da soja a doses e modos de aplicação de potássio em solo de cerrado. **Bioscience Journal**, v.18. p.17-23, 2002.

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

NOVAIS, R. F. Soja. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. p. 323-324.

OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C.; KLEPKER, D.; OLIVEIRA, F. A. Soja. In: PROCHNOW, L.I.; CASARIN, V.; STIP, S.R. (eds.). **Boas práticas para o uso eficiente de fertilizantes: culturas**. Piracicaba: IPNI, 2010. v.3, p.1-38.

OLIVEIRA JUNIOR, A.; CASTRO, C.; OLIVEIRA, F. A.; JORDAO, L,T. **Adubação potássica da soja: cuidados no balanço de nutrientes**. Piracicaba: IPNI, 2013. n°143, p.1-10.

PETTER, F. A.; DA SILVA, J. A.; DE ALCANTARA NETO, F.; PACHECO, L. P.; ALMEIDA, F. A.; GUIMARÃES SANTOS, G. & BORGES DE LIMA, L. Productivity and yield components of soybeans under dose and potassium application period in PiauÍ savannah. **Journal of Agricultural Science**, v.4, p.173-171, 2012.

PETTER, F. A., ALVES, A. U., DA SILVA, J. A., DE ALMEIDA CARDOSO, E., ALIXANDRE, T. F., DE ALMEIDA, F. A., & PACHECO, L. P. Produtividade e qualidade de sementes de soja em função de doses e épocas de aplicação de potássio no cerrado piauiense. **Semina: Ciências Agrárias**, v.35, p.89-100, 2014.

PROCÓPIO, S.O.; JÚNIOR, A. A. B.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; PANISON, F. Plantio cruzado na cultura da soja utilizando uma cultivar de hábito de crescimento indeterminado. **Revista de Ciências Agrárias/Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Science**, v.56, p. 319-325, 2013.

RESENDE, A. V. **O sistema plantio direto proporciona maior eficiência no uso de fertilizantes**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011. (Documentos, 118).

SANTOS, F. C., NOVAIS, R. F., NEVES, J. C. L., FOLONI, J. M., DE ALBUQUERQUE FILHO, M. R., & KER, J. C. Produtividade e aspectos nutricionais de plantas de soja cultivadas em solos de cerrado com diferentes texturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p. 2015-2025, 2008.

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

SOUSA, D. M. G. & LOBATO, E. Calagem e adubação para culturas anuais e semiperenes. In: SOUSA, D. M. G. & LOBATO, E. (eds.). **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 283-315.

VILELA, L.; SOUSA, D. M. G.; SILVA, J.E. Adubação com potássio. In: SOUSA, D. M. G. & LOBATO, E. (eds.). **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 147-168.

WENDLING, A.; ELTZ, F.L.F.; CUBILLA, M.M.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J. Recomendação de adubação potássica para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1929-1939, 2008.

**ARTIGO 3 Rentabilidade e eficiência da adubação num sistema milho-soja-milho em Latossolo de fertilidade construída**

Clério Hickmann<sup>1</sup>, Álvaro Vilela de Resende<sup>2</sup>, Carlos Alberto Silva<sup>1</sup>, Julian Junio de Jesus Lacerda<sup>1</sup>, Silvino Guimarães Moreira<sup>3</sup> e Otávio Prates Conceição<sup>3</sup>

**Artigo formatado de acordo com a Revista Brasileira de Milho e Sorgo.**

---

<sup>1</sup> Universidade Federal de Lavras, Caixa Postal 3037, CEP 37.200-000, Lavras, MG, Brasil, [clerioh@gmail.com](mailto:clerioh@gmail.com), [csilva@dcs.ufla.br](mailto:csilva@dcs.ufla.br), [julianlacerda@gmail.com](mailto:julianlacerda@gmail.com)

<sup>2</sup> Embrapa Milho e Sorgo, Caixa Postal 285, CEP 35.701-970, Sete Lagoas, MG, Brasil, [alvaro.resende@embrapa.br](mailto:alvaro.resende@embrapa.br)

<sup>3</sup> Universidade Federal de São João Del Rei, Caixa Postal 56 CEP 35.701-970, Sete Lagoas, MG, Brasil: [silvino@ufsj.edu.br](mailto:silvino@ufsj.edu.br) [otavio\\_prates@hotmail.com](mailto:otavio_prates@hotmail.com)

**RESUMO**– Atualmente existem dúvidas quanto ao dimensionamento da adubação visando altas produtividades de grãos em solos de fertilidade construída com sistemas de culturas rotacionadas. Nesse sentido, objetivou-se avaliar a produtividade e a rentabilidade resultantes de diferentes combinações de adubação NPK e a eficiência de uso desses nutrientes em safras sequenciais de milho-soja-milho, num Latossolo de fertilidade construída, em fazenda dos Campos das Vertentes, MG. Foram comparados quatro níveis de adubação de semeadura e de cobertura, correspondendo a proporções aproximadas de 25, 50, 100 e 150% da dose normalmente aplicada pelo agricultor. As fontes de nutrientes variaram conforme os insumos empregados na fazenda a cada safra. Na condição de solo com fertilidade construída, o milho é mais responsivo à adubação do que a soja, sendo os maiores ganhos de produtividade de grãos associados ao fornecimento de N e K, enquanto o P mostra-se menos limitante. A combinação mais rentável de nutrientes para o sistema envolve incremento nas quantidades de N e K e redução no P em relação à adubação padrão da fazenda, proporcionando lucro 14,3% superior e maior eficiência média de uso dos nutrientes fornecidos.

**Palavras-chave:** uso eficiente de fertilizantes, rotação de culturas, alta produtividade de grãos, agricultura de alto investimento.

**Profitability and fertilization efficiency of a corn/soybean/corn  
sequence grown in a high fertility latosol**

**Abstract**–Currently, there are doubts regarding nutrient management for high grain yield in soils with improved fertility under no till cropping systems. We aimed to evaluate the yield and profitability resulting from different combinations of NPK fertilizer and the efficiency use of these nutrients for a sequence of corn / soybean / corn grown in an high fertility Oxisol from the Campos das Vertentes region, MG, Brazil. Four levels of fertilization at sowing and four at topdressing were tested, corresponding to about 25, 50, 100 and 150% of the fertilizer rate normally applied by the farmer. Nutrient sources varied according to the farm planning for each crop. Under improved soil fertility conditions, corn is more responsive to fertilization than soybean. High grain yields are associated with the supply of N and K, while P is less limiting. The most cost effective combination of nutrients to the crop system involves increased

amounts of N and K and reduced P in relation to the farm fertilization rates, providing a profit 14.3% higher and a better average nutrient use efficiency.

**Key words:** fertilizer use efficiency, crop rotation, high grain yield; high input agriculture.

### Introdução

O uso intensivo de tecnologias nas lavouras de grãos, com novas cultivares, aplicação de corretivos e fertilizantes, mecanização e rotação de culturas fez com que algumas regiões de Minas Gerais se destacassem entre as de maior potencial produtivo do País. Recentemente, a mesorregião Campo das Vertentes vem se consolidando como um dos polos importantes de produção de grãos no estado.

Nessa região, o uso de cultivares de soja precoce e de hábito de crescimento indeterminado configura-se como opção promissora para a sequência com milho em sistema plantio direto (SPD), além de viabilizar outras culturas em segunda safra. A soja associa-se a bactérias que fixam nitrogênio (N) atmosférico e agregam esse nutriente à palhada, que, ao se decompor, libera o N para o cultivo em sucessão (Almeida et al., 2008; Torres et al., 2008). Estudos de longo prazo mostram que maiores produtividades de milho podem ser alcançadas em rotação com soja mesmo sob restrita disponibilidade de nutrientes, em comparação ao monocultivo com adequada oferta nutricional (Katsvairo & Cox, 2000; Stanger & Lauer, 2008).

O avanço na consolidação de sistemas de produção nos solos brasileiros só foi possível com a introdução de práticas de manejo do solo

que envolvem correção da acidez e aplicação de fertilizantes para melhoria da fertilidade. Ao se priorizar a construção da fertilidade do solo e as adubações de manutenção ao longo de cultivos sucessivos, o residual dos fertilizantes originou considerável reserva de nutrientes, sobretudo nos solos mais argilosos (Almeida et al., 2005; Gatiboni et al., 2007). Nesse cenário, a introdução do SPD trouxe vantagens adicionais, incluindo a maior conservação e eventual aumento dos estoques de matéria orgânica do solo, com benefícios às características químicas, físicas e biológicas do solo. Esses fatores aumentaram o potencial produtivo dos ambientes de cultivo (Resende et al., 2012). É cada vez mais comum encontrar teores de fósforo (P - Mehlich1) e potássio (K) acima de 15 e 120 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente, em talhões de produção com solos argilosos, o que caracteriza elevada fertilidade, muito próxima às tradicionais áreas produtoras de milho dos Estados Unidos. Nessa situação, tornam-se mais complexas a interpretação da análise de solo e a recomendação de adubação, devido à falta de dados de pesquisa sobre a resposta das culturas à aplicação de fertilizantes visando alta produtividade nesses solos de fertilidade já construída. Muitos agricultores simplesmente aumentam a adubação com fórmulas NPK fixas, o que pode resultar em baixa eficiência de uso dos fertilizantes.

Os critérios que definem as doses de N para as culturas são a expectativa de produtividade, o histórico do cultivo anterior ou a cultura de cobertura antecedente, os teores de matéria orgânica do solo e as culturas utilizadas no esquema de rotação (Amado et al., 2002). Em solos com teores de P e K acima do nível crítico não se espera respostas em produtividade que possam gerar ganhos econômicos da adubação para

milho e soja, devido aos incrementos nas doses de fertilizantes na adubação de manutenção. Basta repor somente a quantidade de nutrientes exportada com a colheita (Sousa & Lobato, 2004; Pauletti et al., 2010). De acordo com Alvarez V. et al. (1999), os níveis críticos para P e K em solos argilosos de Minas Gerais seriam de 12 e 70 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente.

Em função do que foi dito, justificam-se estudos mais particularizados geograficamente, visando identificar níveis de adubação que conciliem alta produtividade de grãos, uso eficiente de fertilizantes e manutenção da fertilidade do solo ao longo do tempo. Objetivou-se, neste trabalho, avaliar a produtividade e a rentabilidade resultantes de diferentes combinações de adubação NPK e a eficiência de uso de nutrientes em safras sequenciais de milho-soja-milho, num Latossolo argiloso em fazenda dos Campos das Vertentes, MG.

### **Material e Métodos**

O estudo foi realizado em área de lavoura na Fazenda Santa Helena, situada a 21°15' 40'' de latitude Sul e 44° 30'30'' de longitude Oeste, no município de Nazareno, mesorregião Campo das Vertentes, MG. A altitude do local é de 1.020 m. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, com textura argilosa. O grau de fertilidade do solo no início do experimento (Tabela 1) foi considerado de médio a elevado, de acordo com as classes de interpretação da fertilidade indicadas por Alvarez V. et al. (1999). A área já vinha sendo cultivada há cerca de vinte anos e o histórico dos últimos dez anos caracteriza-se pelo elevado investimento tecnológico, sendo o solo manejado sem preparo ao



longo de consecutivas safras de milho, permanecendo em pousio nas entressafras. Nesse período, somente num ano (2007), foi cultivado o girassol como segunda safra.

**Tabela 1.** Atributos químicos, textura e densidade do Latossolo Vermelho-Amarelo, na camada de 0 a 20 cm de profundidade, antes da implantação do experimento

pH <sub>água</sub>	P*	K	S <sub>sulfato</sub>	Zn	Al	P-rem.	V	Ca	Mg	H+Al	CTC a pH 7
		----- mg dm <sup>-3</sup> -----				mg L <sup>-1</sup> %			----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----		
6,1	13	117	34	5	0,1	7,5	48	2,5	0,7	3,8	7,4
	Areia		Silte		Argila		Matéria Orgânica		Densidade aparente		
	----- dag kg <sup>-1</sup> -----							--- g cm <sup>-3</sup> ---			
	17		25		58		4,0		1,1		

\* Extraído com solução Mehlich1.

Foram avaliadas três safras na sequência milho-soja-milho, em condições de sequeiro, nos anos agrícolas 2010/2011, 2011/2012 e 2012/2013, com pousio nas entressafras. O espaçamento foi de 0,6 m entre linhas, sendo, nas respectivas safras, usadas as cultivares Down 2B587 Hx / Nidera NA5909 RR / Pioneer P30F53 H. As datas de semeadura foram 03/11/2010 (milho), 21/10/2011 (soja) e 15/10/2012 (milho). Os tratos fitossanitários foram realizados quando necessário, conforme o protocolo da fazenda. As populações de plantas estimadas nas respectivas colheitas foram de 73 mil, 380 mil e 75 mil plantas ha<sup>-1</sup>.

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com parcelas subdivididas, em três repetições, num arranjo fatorial 4 x 4, combinando a aplicação de fertilizantes em quatro doses na adubação de semeadura e quatro doses na adubação de cobertura, conforme

discriminado na Tabela 2. As aplicações de nutrientes na semeadura foram realizadas em sulco, nas parcelas, enquanto os tratamentos em cobertura foram aplicados em filete nas entrelinhas, constituindo as subparcelas. A referência para definição das doses de fertilizantes foi a adubação normalmente utilizada na fazenda, a qual correspondeu à terceira dose (de semeadura e de cobertura) do intervalo testado em cada safra (Tabela 2). As demais doses foram utilizadas visando avaliar as respostas das culturas ao incremento ou redução da adubação praticada na fazenda. As fontes de nutrientes variaram a cada safra, em função dos fertilizantes usados pelo agricultor. As adubações de cobertura foram efetuadas no estágio V3-V4 do milho e V2 da soja. As subparcelas consistiram de nove linhas com 10 m de comprimento. As avaliações de produtividade foram feitas colhendo-se três linhas de 4 m, na área central das subparcelas (7,2 m<sup>2</sup>).

**Tabela 2.** Quantidades de fertilizantes aplicados na semeadura (SEM) e em cobertura (COB) e total de nutrientes fornecidos a cada safra, conforme os tratamentos de adubação\*

Milho – safra 2010/2011			Soja – safra 2011/2012			Milho – safra 2012/2013		
SEM	COB	Total de N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O	SEM	COB	Total de N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O	SEM	COB	Total de N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O
Adubo NPK 10-30-10	Adubo NPK 30-00-20		Adubo NPK 02-30-10	Adubo KCl		Adubo NPK 18-38-00	Adubo NPK 22-00-20	
0	0	0-0-0	0	0	0-0-0	0	0	0-0-0
0	210	63-0-42	0	25	0-0-15	0	300	66-0-60
0	420	126-0-84	0	50	0-0-30	0	600	132-0-120
0	630	189-0-126	0	75	0-0-45	0	900	198-0-180
240	0	24-72-24	193	0	4-58-19	155	0	28-59-0
240	210	87-72-66	193	25	4-58-34	155	300	94-59-60
240	420	150-72-108	193	50	4-58-49	155	600	160-59-120
240	630	213-72-150	193	75	4-58-64	155	900	226-59-180
386	0	39-116-39	315	0	6-95-32	316	0	57-120-0
386	210	102-116-81	315	25	6-95-47	316	300	123-120-60
386	420	165-116-123	315	50	6-95-62	316	600	189-120-120
386	630	228-116-165	315	75	6-95-77	316	900	255-120-180
570	0	57-171-57	485	0	10-146-49	462	0	83-176-0
570	210	120-171-99	485	25	10-146-64	462	300	149-176-60
570	420	183-171-141	485	50	10-146-79	462	300	215-176-120
570	630	246-171-183	485	75	10-146-94	462	900	281-176-180

\* A terceira dose, nas adubações de semeadura e em cobertura a cada safra, corresponde ao manejo utilizado na fazenda.

As produtividades de grãos foram determinadas ajustando-se o teor de água para  $130 \text{ g kg}^{-1}$ . Os dados de produtividade de cada safra foram submetidos à análise de variância, por meio do programa SISVAR (Ferreira, 2011). Foram realizadas análises de regressão da produtividade em função das doses de nutrientes aplicadas na semeadura e em cobertura, à cada safra, assim como para as respostas cumulativas das três safras. Estimaram-se as doses de fertilizantes para máxima eficiência técnica (DMET) e econômica (DMEE). A DMEE foi obtida considerando-se a quantidade de fertilizante capaz de proporcionar rendimento de grãos correspondente a 90 % da produtividade máxima - DMET (Wendling et al., 2008). A eficiência de uso dos nutrientes aplicados via fertilizantes foi calculada a cada safra e também considerando-se os dados cumulativos, conforme a seguinte equação (Fageria et al., 2007):  $EUN = [PCN - PSN] / QNA$ ; sendo EUN = eficiência de uso de nutriente ( $\text{kg kg}^{-1}$ ), PCN = produtividade de grãos com o nutriente (kg), PSN = produtividade de grãos sem o nutriente (kg) e QNA = quantidade de nutriente aplicada (kg).

Para avaliação econômica comparativa dos tratamentos de adubação, utilizou-se o custo operacional de produção das culturas, considerando as variações de gastos relativas às doses de fertilizantes empregadas. Os custos fixos não foram incluídos nos cálculos. A receita foi calculada com base na produtividade por tratamento e no preço de mercado para comercialização dos grãos. O lucro foi obtido pela diferença entre a receita bruta e o custo final por tratamento. Todos os cálculos foram realizados a partir dos custos operacionais básicos de produção da fazenda, referentes à safra 2012/2013, os quais foram de R\$

1.964,00 para o milho e R\$ 1.569,00 para a soja, não incluídos os gastos com fertilizantes. Tais gastos foram determinados conforme as cotações de fornecedores da região em julho de 2013, sendo R\$ 1.312,00; R\$ 1.238,70; R\$ 1.210,00; R\$ 1.380,00; R\$ 1.120,00 e R\$ 1.326,00 o valor da tonelada, respectivamente, para os adubos NPK 10-30-10, NPK 30-00-20, NPK 02-30-10, NPK 18-38-00, NPK 22-00-20 e cloreto de potássio (KCl). As receitas foram calculadas com base nas cotações dos grãos em julho de 2013, que foram de R\$ 65,23 e R\$ 24,22 por saca de 60 kg de soja e de milho, respectivamente. Como referência monetária, a cotação do dólar americano para compra, em 25 de julho de 2013, era de R\$ 2,251 (CEPEA/ESALQ, 2013).

### **Resultados e Discussão**

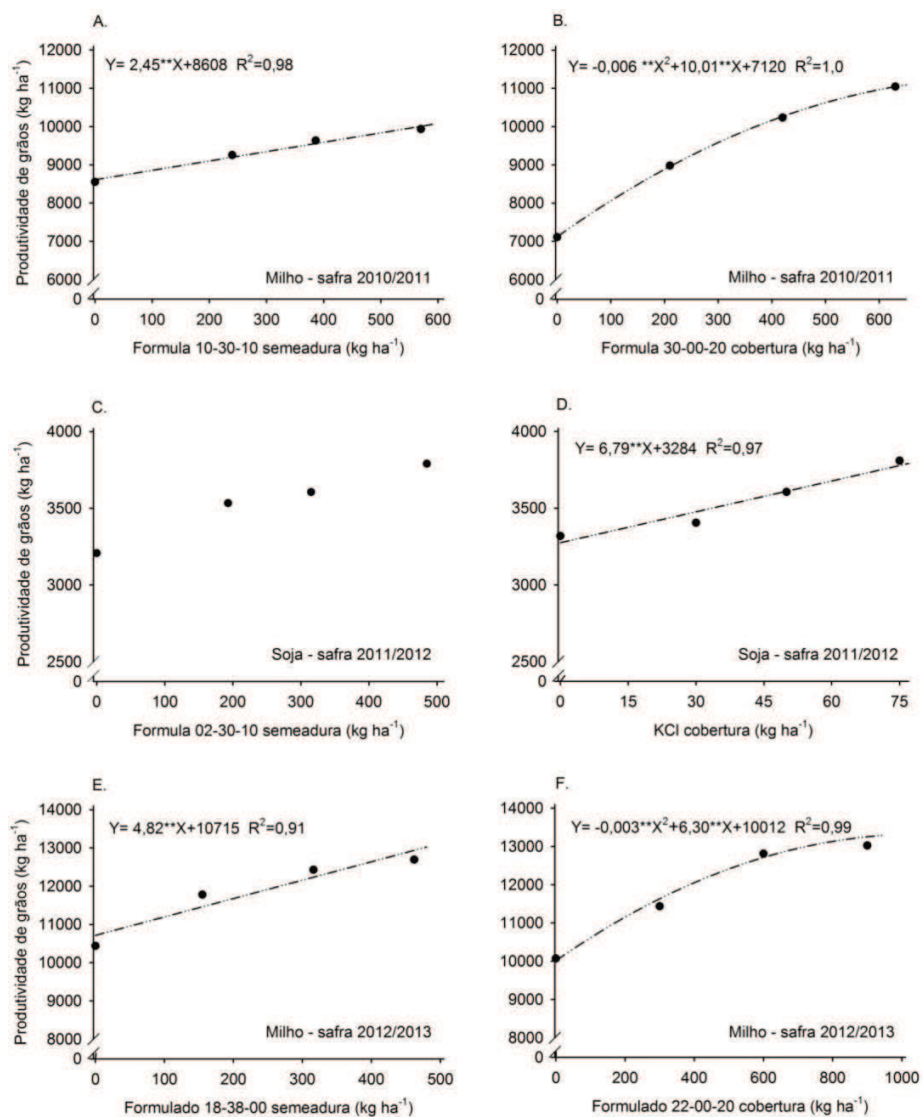
Nas três safras do experimento, constatou-se ausência de interação estatisticamente significativa entre adubação de semeadura e adubação de cobertura para a variável produtividade de grãos (Tabela 3). Houve efeitos significativos isolados de adubação de semeadura e de adubação em cobertura nas duas safras de milho, e apenas efeito de adubação em cobertura na safra de soja.

**Tabela 3.** Resumo da análise de variância para a produtividade de grãos em função de doses de adubação na semeadura e em cobertura na rotação milho-soja-milho

Fonte de variação	GL	Quadrado Médio		
		Milho – safra 2010/2011	Soja - safra 2011/2012	Milho - safra 2012/2013
Bloco	2	57911	227756	41475
Doses de adubação na semeadura (SEM)	3	4274885*	708589 <sup>ns</sup>	12170035*
Erro 1	6	218.209	154208	602712
Doses de adubação em cobertura (COB)	3	35241145*	575309*	22571806*
SEM x COB	9	370081 <sup>ns</sup>	36214 <sup>ns</sup>	735078 <sup>ns</sup>
Erro 2	24	176872	82411	475828
Total	47	-	-	-
CV 1 (%)	-	5,0	11,1	6,5
CV 2 (%)	-	4,5	8,1	5,8

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo teste F. <sup>ns</sup> Não significativo. SEM = doses de adubação NPK na semeadura. COB = doses de adubação em cobertura com NK para o milho e K para a soja.

De modo geral, obtiveram-se boas produtividades das culturas mesmo nos tratamentos sem adubação de semeadura ou de cobertura ao longo das três safras avaliadas (Figura 1), confirmando a existência de considerável estoque de nutrientes no solo (Tabela 1). Destaca-se ainda o fato de não ter havido restrição hídrica durante o ciclo das culturas, em razão da ocorrência de chuvas bem distribuídas em todas as estações de cultivo do experimento.



**Figura 1.** Produtividade de grãos de milho nas safras 2010/2011 (A e B) e 2012/2013 (E e F), e de soja na safra 2011/2012 (C e D), em função de doses de adubação na sementeira e em cobertura. \*\* Significativo no nível de 1% de probabilidade pelo teste F.

Em termos absolutos, a produtividade do milho na safra 2010/2011 variou de 5.810 a 11.573 kg ha<sup>-1</sup>, conforme a combinação de tratamentos de adubação de semeadura e de cobertura. O menor valor de produtividade correspondeu ao tratamento sem nenhuma adubação e, mesmo assim, ficou acima da média nacional estimada na respectiva safra, que foi de 4.100 kg ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2013), reforçando a característica de boa fertilidade do solo, resultante de adubações realizadas anteriormente na área. Não obstante, verificou-se incremento linear da produtividade em função das doses de NPK fornecidas na semeadura e resposta quadrática à adubação NK em cobertura (Figuras 1A e 1B).

De acordo com o modelo de resposta à adubação em cobertura, a dose para máxima eficiência econômica, correspondente a 90% da produtividade máxima, seria de 400 kg ha<sup>-1</sup> do fertilizante NPK 30-00-20. A maior responsividade do milho à adubação NK em cobertura leva a crer que a disponibilidade de fósforo foi o fator menos limitante naquela safra, haja vista que o modelo de resposta à adubação de semeadura já parte de uma produtividade de 8.608 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 1A). Considerando a boa reserva inicial de P e K no solo (Tabela 1), que se encontravam acima dos níveis críticos estabelecidos para culturas anuais (Alvarez V. et al., 1999; Sousa et al., 2004; Vilela et al., 2004), pode-se inferir que o nitrogênio foi o nutriente que mais contribuiu para os ganhos de produtividade de milho com a adubação.

Na segunda safra do experimento, com cultivo de soja, não se verificou efeito significativo da aplicação de fertilizante na semeadura, porém houve ganho em produtividade com a adubação potássica em



cobertura (Figuras 1C e 1D). As produtividades variaram entre 3.032 e 4.098 kg ha<sup>-1</sup> de grãos conforme o tratamento, desempenho bem acima da média brasileira de 2.600 kg ha<sup>-1</sup> estimada naquela safra (CONAB, 2013). Os resultados parciais obtidos em produtividade de grãos de soja foram discutidos no artigo anterior, intitulado "Resposta da soja de alta produtividade a adubação em solo com elevado teor de potássio".

A ausência de resposta da soja à adubação de semeadura pode ser atribuída principalmente à característica de maior rusticidade dessa cultura em comparação ao milho. Dessa forma, a oleaginosa mostra-se menos sensível às diferenças na disponibilidade de nutrientes (Amado et al., 2007), apresentando menor variação de produtividade devido aos tratamentos de adubação. Esse comportamento é plausível ao se considerar, também, que o solo argiloso (58 dag kg<sup>-1</sup> de argila) da área experimental, cultivado sem revolvimento e adubado há muitos anos, deve apresentar alto grau de tamponamento, favorável à conservação dos elevados teores de nutrientes e matéria orgânica existentes no início do experimento (Tabela 1). Tal tamponamento deve contribuir inclusive para aumentar a eficiência de aproveitamento de fertilizantes (Cubilla et al., 2007; Resende et al., 2012), de modo que doses moderadas sejam suficientes para atender a demanda de uma safra de soja nesse solo de fertilidade construída.

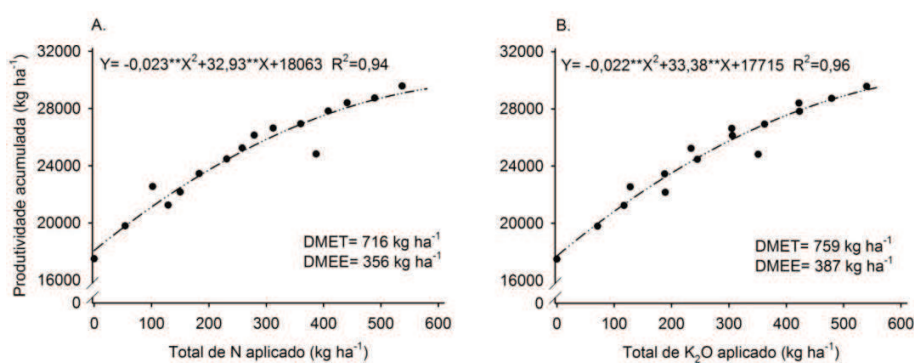
De maneira análoga ao primeiro cultivo, verificou-se resposta linear do milho à adubação de semeadura e resposta quadrática à adubação em cobertura no ano agrícola 2012/2013 (Figuras 1E e 1F), sendo que o fertilizante utilizado na semeadura não continha potássio. Conforme o modelo obtido em função da adubação de cobertura, a

quantidade de 384 kg ha<sup>-1</sup> do fertilizante utilizado corresponderia à dose para máxima eficiência econômica. Novamente, o fósforo aparece como o nutriente menos limitante, uma vez que na ausência de adubação de semeadura a produtividade ficou perto de 10.500 kg ha<sup>-1</sup>.

Os níveis de produtividade de milho no cultivo 2012/2013 foram maiores que em 2010/2011, variando de 8.496 a 13.898 kg ha<sup>-1</sup> conforme o tratamento. Mesmo no tratamento que não recebeu adubação por três safras sequenciais, ainda foram produzidos 2.686 kg ha<sup>-1</sup> de grãos a mais em relação à primeira safra de milho. Como foram utilizados híbridos de alto potencial produtivo, credita-se essa diferença de rendimento ao efeito combinado de fatores que favoreceram o segundo cultivo, como o melhor estande final e a introdução da soja em rotação na safra 2011/2012. O estande final foi estimado em 73.000 plantas ha<sup>-1</sup> na safra 2010/2011 e 75.000 na safra 2012/2013. A utilização da rotação com soja no talhão que apresentava histórico de cultivos sucessivos de milho certamente contribuiu para melhorar o potencial produtivo naquele ambiente. São bem descritos os benefícios da rotação de culturas e do plantio direto na produção de grãos (Lopes et al., 2004), principalmente no que diz respeito ao favorecimento da atividade biológica e maior tamponamento na dinâmica e disponibilidade de nutrientes. O uso da soja em rotação promove ganhos de produtividade de milho ao condicionar maior aporte de N ao sistema, pelo processo de fixação biológica do nitrogênio atmosférico e posterior mineralização da palhada (Alves et al., 2006).

Considerando os dados cumulativos de produtividade e os aportes totais de N nas diferentes combinações de tratamentos de adubação de semeadura e cobertura, o modelo ajustado permitiu estimar uma

produtividade máxima de 29.850 kg ha<sup>-1</sup> de grãos nas três safras (Figura 2A). A dose de N associada à máxima eficiência técnica foi de 716 kg ha<sup>-1</sup>, enquanto a dose para máxima eficiência econômica, correspondente a 90% da produtividade máxima, foi estimada em 356 kg ha<sup>-1</sup>. Como não há necessidade de se aplicar nitrogênio em cultivos de soja, pode-se admitir que a dose econômica para o sistema milho-soja-milho no talhão estudado equivaleria ao fornecimento de 178 kg ha<sup>-1</sup> de N a cada safra explorada com milho. Essa dose é coerente com as sugestões de adubação de Resende et al. (2012), que indicam o fornecimento de 150 a 210 kg ha<sup>-1</sup> de N para expectativas de produtividade de milho entre 10.000 e 12.000 kg ha<sup>-1</sup>, faixa que engloba as produtividades máximas econômicas de 10.166 e 11.988 kg ha<sup>-1</sup>, estimadas no presente estudo para as safras 2010/2011 e 2012/2013, respectivamente.



**Figura 2.** Produtividade acumulada de grãos das safras milho-soja-milho em função de doses cumulativas de N (A) e de K<sub>2</sub>O (B) aplicadas no sistema. DMET= dose para máxima eficiência técnica; DMEE= dose para máxima eficiência econômica.\*\* Significativo no nível de 1% de probabilidade pelo teste F.

Para a resposta ao fornecimento cumulativo de potássio em semeadura e cobertura nas três safras, estimou-se produtividade máxima de 30.377 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 2B). A dose de K<sub>2</sub>O para máxima eficiência econômica no sistema seria de 387 kg ha<sup>-1</sup>, correspondendo à aplicação média de 129 kg ha<sup>-1</sup> a cada safra (milho-soja-milho). Essa quantidade ótima de potássio estimada para o sistema corrobora as recomendações encontradas na literatura. Resende et al. (2012) indicam o fornecimento de 140 a 170 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O para produtividades de milho entre 12.000 e 14.000 kg ha<sup>-1</sup> em solos com teores de K próximos de 80 mg dm<sup>-3</sup>. Na cultura da soja, Sousa & Lobato (2004) sugerem aplicar entre 40 a 50 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, para disponibilidade inicial de K acima de 80 mg dm<sup>-3</sup>, o que possibilitaria produzir entre 3.000 a 4.000 kg ha<sup>-1</sup> de grãos.

Como o fósforo foi fornecido somente nos tratamentos de adubação em semeadura, o modelo de resposta cumulativa foi baseado em apenas quatro doses, apresentando ajuste linear para a produtividade em função do fornecimento de P ( $Y = 8,4**X + 22507$ ;  $R^2 = 0,96$ ). Entretanto, é importante notar que, embora linear, a resposta ao fósforo já parte de uma produtividade de 22.507 kg ha<sup>-1</sup> de grãos, contrastando com o padrão identificado para nitrogênio e potássio, nutrientes para os quais a ausência na adubação resultou em produtividades mais baixas, da ordem de 18.063 e 17.715 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 2). Constata-se, portanto, que o fornecimento de N e K foi mais crítico para garantir o potencial produtivo do ambiente de cultivo no período considerado no experimento. Tal situação certamente se deve ao histórico de acúmulo de P naquele solo argiloso, em consequência de adubações corretivas e de manutenção,

criando uma reserva que pode atender parte expressiva da demanda das culturas por algumas safras.

Sabe-se que, devido à saturação dos sítios de adsorção de P com as adubações ao longo do tempo, a intensidade de resposta à adubação fosfatada diminui em solos que já atingiram níveis médios a adequados do nutriente, que é requerido em menor quantidade pelas culturas em relação ao N e K (Sousa et al., 2004; Cereta et al., 2005; Gatiboni et al., 2007). O estoque de P disponível no solo depende do teor inicial e histórico da adubação, sendo favorecido em solos não revolvidos, com uso de rotação de culturas e manutenção ou aporte de matéria orgânica (Cubilla et al., 2007; Costa et al., 2009). Esses fatores aumentam a eficiência de uso de fertilizantes fosfatados, que podem ter recuperação de até 67% pelas plantas ao longo dos anos (Sousa et al., 2004).

Na avaliação econômica, constatou-se que mesmo sem aplicação de fertilizantes o sistema milho-soja-milho no talhão estudado proporcionou lucro acima de R\$ 3.600,00 ha<sup>-1</sup>, não abatidos os custos fixos (Tabela 4). Diferentes proporções de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O resultaram em lucratividade semelhante entre si, mas com distinta eficiência média de uso desses nutrientes. A aplicação cumulativa de fertilizantes que gerou maior retorno econômico no sistema (R\$ 5.884,70 ha<sup>-1</sup>) correspondeu a 443, 189 e 394 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O. Esse lucro foi 14,3% maior do que o obtido para a adubação padrão da fazenda, com 360, 330 e 305 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O. Comparativamente ao manejo da fazenda, o tratamento mais rentável envolveu incremento nas quantidades de N e K<sub>2</sub>O e redução na quantidade de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, o que condicionou maior eficiência média de uso dos nutrientes. Estratificando as proporções dos nutrientes

nesse tratamento, conforme foram fornecidos às culturas (Tabela 2), chega-se a relações N/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/K<sub>2</sub>O da ordem de 1,0/0,3/0,8 e 0,1/1,0/1,1 para o milho e a soja, respectivamente.

**Tabela 4.** Rentabilidade e eficiência de uso de nutrientes (EUN) na resposta cumulativa ao fornecimento de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O no sistema milho-soja-milho

Nutrientes aplicados	Prod. acumulada		Custo <sup>(1)</sup>	Receita Bruta <sup>(2)</sup>	Lucro	EUN <sup>(3)</sup>		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>				N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
	kg ha <sup>-1</sup>		R\$ ha <sup>-1</sup>			kg kg <sup>-1</sup>		
0	0	0	17.496	9.167,60	3.670,60	-	-	-
129	0	117	21.249	10.561,36	4.410,96	29	-	32
258	0	234	25.239	12.321,24	5.517,44	30	-	33
387	0	351	24.822	12.200,00	4.742,80	19	-	21
56	189	43	19.798	10.136,00	3.998,17	41	12	54
185	189	160	23.451	11.760,40	4.969,17	32	32	37
314	189	277	26.628	13.044,12	5.599,49	29	48	33
443	189	394	28.400	13.982,76	5.884,73	25	58	28
102	330	71	22.548	11.291,76	4.471,87	50	15	71
231	330	188	24.471	12.141,88	4.668,59	30	21	37
360	330	305	26.932	13.275,20	5.148,51	26	29	31
489	330	422	28.733	14.174,44	5.394,35	23	34	27
150	493	106	22.165	11.235,80	3.767,69	31	9	44
279	493	223	26.130	12.918,36	4.796,85	31	18	39
408	493	340	27.824	13.816,96	5.042,05	25	21	30
537	493	457	29.569	14.614,24	5.185,93	22	24	26

<sup>(1)</sup> Milho - safra 2010/2011: preço por kg de NPK 10-30-10 (aplicado na semeadura) = R\$ 1,31; e NPK 30-00-20 (aplicado em cobertura) = R\$ 1,24. Soja - safra 2011/2012: preço por kg de NPK 02-30-10 (aplicado na semeadura) = R\$ 1,21; e KCl (aplicado em cobertura) = R\$ 1,31. Milho - safra 2012/2013: preço por kg de NPK 18-38-00 (aplicado na semeadura) = R\$ 1,38; e NPK 22-00-20 (aplicado em cobertura) = R\$ 1,20. Custo operacional final por hectare, fora o gasto com fertilizantes para safra de milho = R\$ 1.964,00; e safra de soja = R\$ 1.569,00. <sup>(2)</sup> Valor da saca de 60 kg recebido para o milho = R\$ 24,22; e soja = R\$ 65,23. <sup>(3)</sup> Eficiência de utilização de nutrientes: EUN = (produtividade de grãos com o nutriente - produtividade sem o nutriente) / quantidade do nutriente aplicada.

De modo geral, as doses mais elevadas de fertilizantes implicaram em menores rentabilidade e eficiência de uso de nutrientes (Tabela 4). Foi possível detectar que a adubação da fazenda tendeu a fornecer fósforo em dosagem acima do que é necessário para atender a demanda ao longo das três safras avaliadas. Por outro lado, evidenciou-se resposta econômica ao fornecimento adicional de nitrogênio e potássio. Na condição de fertilidade do solo na lavoura estudada, certamente é possível aprimorar o manejo da adubação NPK, de forma a conciliar maior lucratividade e o uso mais eficiente de fertilizantes. No caso do fósforo e potássio, essa possibilidade deve estar atrelada ao monitoramento periódico com análises de solo, de modo a não haver comprometimento dos estoques disponíveis no sistema.

### **Conclusões**

Na condição de solo com fertilidade construída, o milho é mais responsivo à adubação do que a soja, sendo os maiores ganhos de produtividade de grãos associados ao fornecimento de N e K, enquanto o P mostra-se menos limitante numa sequência milho-soja-milho.

A combinação mais rentável de doses cumulativas de nutrientes para o sistema envolve incremento nas quantidades de N e K e redução no P em relação à adubação padrão da fazenda, proporcionando lucro 14,3% superior e maior eficiência média de uso dos nutrientes fornecidos.

Altas produtividades em sistema plantio direto e solo de fertilidade construída requerem readequação das proporções de N,  $P_2O_5$  e  $K_2O$  na adubação.



### **Agradecimentos**

À FAPEMIG e ao CNPq (Processo 308592/2011-5), pelo auxílio financeiro e concessão de bolsas de estudo. Aos proprietários e funcionários da Fazenda Santa Helena, pela cessão da área experimental e insumos, e pelo apoio na condução do experimento.

### **Referências**

ALMEIDA, J. D.; BERTOL, I.; LEITE, D.; AMARAL, A. D.; ZOLDAN JR, W. A. Propriedades químicas de um Cambissolo Húmico sob preparo convencional e semeadura direta após seis anos de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 3, p. 437-445, 2005.

ALMEIDA, V. P.; ALVES, M. C.; SILVA, E. C.; OLIVEIRA, S. P. Rotação de culturas e propriedades físicas e químicas em Latossolo vermelho de cerrado sob preparo convencional e semeadura direta em adoção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n. 3, v. 32, p. 1227-1237, 2008.

ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B. & LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solo. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5ª aproximação. Viçosa, MG, 1999. p. 25-32.

ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; FERNANDES, F. M.; HECKLER, J. C.; MACEDO, R. A. T.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S. Fixação biológica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 449-456, 2006.

AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 1, p. 241-248, 2002.

AMADO, T. J. C.; PONTELLI, C. B.; SANTI, A. L.; VIANA, J. H. M.; SULZBACH, L. A. S. Variabilidade espacial e temporal da produtividade de culturas sob sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 8, p. 1101-1110, 2007.

CERETTA, C. A.; BASSO, C. J.; PAVINATO, P. S.; TRENTIN, E. E.; GIROTTO, E. Produtividade de grãos de milho, produção de matéria seca e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio na rotação aveia preta/milho/nabo forrageiro com aplicação de dejetos líquidos de suínos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 6, p. 1287-1295, 2005.

CEPEA/ESALQ – **Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada**. Disponível em: <http://www.cepea.esalq.usp.br/soja/>. Acesso em: 31 jul. 2013.

CONAB. **Companhia Nacional de Abastecimento**. Disponível em: <http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 31 jan. 2014.

COSTA, S. E. V. G.; SOUZA, E. D. D.; ANGHINONI, I.; FLORES, J. P. C.; CAO, E.G.; HOLZSCHUH, M. J. Phosphorus and root distribution and corn growth as related to long-term tillage systems and fertilizer placement. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p.1237-1247, 2009.

CUBILLA, M. M.; AMADO, T. J. C.; WENDLING, A.; ELTZ, F. L. F.; MIELNICZUK, J. Calibração visando à fertilização com fósforo para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1463-1474, 2007.

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

FAGERIA, N. K.; SANTOS, A. B.; CUTRIM, V. A. Produtividade de arroz irrigado e eficiência de uso do nitrogênio influenciadas pela fertilização nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, Brasília, v. 42, n. 7, p. 1029-1034, 2007.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. D. S. & FLORES, J. P. C. Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n. 4, p. 691-699. 2007.

KATSVAIRO, T. W.; COX, W. J. Tillage x rotation x management interactions in corn. **Agronomy Journal**, v. 92, n. 3, p. 493-500, 2000.

LOPES, A. S.; WIETHOLTER, S.; QUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo. São Paulo: **Associação Nacional para Difusão de Adubos - ANDA**, 2004. 110p.

PAULETTI, V.; SERRAT, B. M.; MOTTA, A. C. V.; FAVARETTO, N.; ANJOS, A. D. Yield response to fertilization strategies in no-tillage soybean, corn and common bean crops. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 53, n. 3, p. 563-574, 2010.

RESENDE, A. V.; COELHO, A. M.; SANTOS, F. C.; LACERDA, J. J. J. Fertilidade do solo e manejo da adubação NPK para alta produtividade de milho no Brasil Central. Sete Lagoas: **Circular Técnica, n. 181**, Embrapa Milho e Sorgo, 2012. 12p.

SANTOS, L. P. D.; AQUINO, L. A.; NUNES, P. H. M. P. e XAVIER, F. O. Doses de nitrogênio na cultura do milho para altas produtividades de grãos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 12, n. 3, p. 270-279, 2013.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Calagem e adubação para culturas anuais e semiperenes. In: SOUSA, D. M. G. & LOBATO, E. (Eds.). **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 283-315.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, T. Adubação com fósforo. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Eds.). **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 147-168.

STANGER T.F., LAUER J.G. Corn grain yield response to crop rotation and nitrogen over 35 years all. **Agronomy Journal**, v. 100, n. 3, p. 643-650, 2008.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; FABIAN, A. J. Produção de fitomassa por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 3, p. 421-428, 2008.

VILELA, L.; SOUSA, D. M. G.; SILVA, J.E. Adubação potássica. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Eds.). **Cerrado: Correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 169-183.

WENDLING, A.; ELTZ, F. L. F.; CUBILLA, M. M.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J. Recomendação de adubação potássica para trigo, milho e soja sob sistema plantio direto no Paraguai. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 1929-1939, 2008.

**ARTIGO 4 Urea sources-soybean residues interaction: effect on the soil mineral nitrogen and n agronomic efficiency use by pearl millet in a Brazilian Ferralsol**

Clério Hickmann<sup>1</sup>, Álvaro Vilela de Resende<sup>2</sup>, Carlos Alberto Silva<sup>1</sup>,  
Marcos Alberto Lana<sup>3</sup>, Rômulo Fredson Duarte<sup>1</sup>, Frank Eulenstein<sup>3</sup>,  
Angelika Wurbs<sup>3</sup>

**Artigo formatado de acordo com Journal of Plant Nutrition and Soil Science.**

---

<sup>1</sup> Federal University of Lavras, Lavras, MG, 37200-000, Brazil.

<sup>2</sup> Brazilian Company for agricultural Research- Embrapa Maize and Sorgum, Setelagoas, MG, 35701-970, Brazil

<sup>3</sup> Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e. V, Müncheberg, 15374, Germany [marcos.lana@zalf.de](mailto:marcos.lana@zalf.de)

**Abstract** - Nitrogen (N) is the macronutrient of highest demand in agriculture, commonly limiting crop production. The low supply of N for plants, when fertilizer is applied, can be associated to immobilization, denitrification, leaching and volatilization processes. Moist soil conditions tend to increase these processes. Additives applied to urea have shown to reduce the losses by volatilization, being an important option to increase N use efficiency. The aim of this study was to assess the effect of soybean residues combined with N sources: control (without any application of fertilizer), common urea (urea), urea coated with sulfur (16%) (urea+S) and ureas treated with urease inhibitor and with compounds-based on boron (0.4%) and copper (0.15%) (urea+B+Cu) and N-(n-butyl) thiophosphorictriamide (N+NBPT). N fertilizers were applied in a Brazilian Ferralsol with high surface moisture and suitable nutrients levels in soil. The variables evaluated were: 1) availability of N mineral forms; ammonium ( $\text{N-NH}_4^+$ ) and nitrate ( $\text{N-NO}_3^-$ ), in the soil after 21 days of N sources application, and 2) agronomic efficiency of pearl millet (root dry mass, shoots dry mass and N accumulated) of the N residual extracted and other nutrients available in the soil.  $\text{N-NH}_4^+$  is the N mineral form of highest availability in the soil after 21 days of N sources application. N mineral in the soil with residue is highest when urea+S and urea+NBPT were applied and the ureas treated with urease inhibitor (urea+NBPT and urea+B+Cu) in plots without residue. The shoot and root dry mass of pearl millet is highest when urea+S and urea + NBPT are added in soils, with or without residue. N accumulation on the plants is high when urea+S and urea+NBPT are applied in the soil with residue, and when urea+NBPT was added in soil without residue. Pearl millet also extract more P, K, Ca, Mg, S and Zn when sown in soil with residue and with adequate nutrient availability for the crop grown. The pearl millet has high relative agronomic efficiency and N accumulated efficiency when urea + S and urea+ NBPT were applied as N sources on the soil surface, with or without residue.

**Key-words:** *Pennisetum glaucum* L., coated urea, urease inhibitor, agronomic efficiency, N-use efficiency.

**Interação entre fontes de ureias e resíduos de soja na disponibilidade de nitrogênio mineral e eficiência agronômica do milho em um Latossolo brasileiro**

**Resumo-** O nitrogênio (N) é o macronutriente de maior demanda na agricultura, geralmente limitando a produção de culturas. A baixa disponibilidade de N para as plantas, quando são aplicados fertilizantes pode ser associada às perdas do nutriente por imobilização, desnitrificação, lixiviação e volatilização. Em condições de solo úmido, esses processos tendem a aumentar. Aditivos aplicados em ureias podem causar redução nas perdas por volatilização, sendo uma importante opção para aumentar a eficiência de uso do N. O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito de resíduos de soja combinado com fontes de N: controle (sem aplicação de fertilizante); ureia comum (ureia), ureia revestida com enxofre elementar (16%) (ureia+S) e as ureias tratadas com inibidor de urease composto-base de B (0,4%) e Cu (0,15%) (ureia+B+Cu) e N-(n-butil) triamidatofosfórico ( $1.060 \text{ g kg}^{-1}$ ) (ureia+NBPT), aplicadas em um Latossolo com alta umidade superficial e alto grau de fertilidade. As variáveis avaliadas foram: 1) disponibilidade das formas de N mineral, amônio ( $\text{N-NH}_4^+$ ) e nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ), no solo após 21 dias de aplicação das fontes de N, e 2) eficiência agronômica do milho (massa seca da raiz, da parte aérea e N acumulado) na extração do N residual e outros nutrientes disponíveis no solo. O  $\text{N-NH}_4^+$  é a forma de N mineral de maior disponibilidade no solo após 21 dias de aplicação das fontes de N. O N mineral no solo com resíduo é maior quando a ureia+S e ureia+NBPT são aplicadas, e no solo sem resíduo, com o uso das ureias tratadas com inibidores de urease (ureia+NBPT e ureia+B+Cu). A massa seca na parte aérea e raiz do milho é maior quando a ureia+S e ureia+NBPT são fornecidas no solo, havendo ou não resíduo de soja. O N acumulado nas plantas é maior quando a ureia+S e ureia+NBPT são aplicadas no solo com resíduos, e quando se adiciona ureia+NBPT no solo sem resíduo. O milho também extraiu mais P, K, Ca, Mg, S e Zn quando foi semeado no solo com resíduos e com adequada disponibilidade de nutrientes demandada pela cultura. O milho apresenta maior eficiência agronômica relativa e de N acumulado quando são aplicadas a ureia+S e ureia+NBPT como fontes de N na superfície do solo, com ou sem resíduo de soja.

**Palavras-chave:** *Pennisetum glaucum* L., ureia revestida, inibidor de urease, eficiência agronômica, eficiência de uso de N.

## Introduction

Nitrogen (N) is the macronutrient with the highest loss in agriculture and, commonly, limits crop production worldwide. According to the FAO (2014), since 2002, the urea consumption increases 3% annually, culminating with a worldwide production in 2011 of 174,000 million tons, corresponding to approximately 80 million tons of N. The addition of readily soluble, inorganic fertilizers to soil typically leads to solution nutrient concentrations higher than optimal level for adequate plant growth and results in a potential for leaching losses as a consequence of precipitation (Adams et al., 2013).

It can be assumed that the sum of ammonia losses from urea fertilizer ranges between 10% and 27%, as observed by Pacholski et al. (2008) using  $^{15}\text{N}$ -labeled urea in China. Using optimistic conditions, if one assumes that the losses of ammonia from urea are of 10%, 8 million tons of N were lost worldwide in 2012. This amount of N can be accounted as lost because it is prone to be denitrified in a 1:10 relation of  $\text{N}_2\text{O}$  and N (Pacholski et al. (2008).

The low supply of N for plants, when fertilization occurs, is associated with immobilization, denitrification, leaching and volatilization processes (Jansson and Persson, 1982; Rawluk et al., 2001; Dinnes et al., 2002). Of these, the ammonia ( $\text{NH}_3$ ) volatilization is one which most contributes for the losses, especially when urea [ $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ] is applied as fertilizer on crop residues and wet soil (Da Ros et al., 2005; Cantarella et al., 2008). In high temperature and moisture soils, the peak of ammonia volatilization occurs on the first five days when non-



incorporated urea is applied in soil (Rawluk et al., 2001). One option available to reduce this effect is to coat urea with urease inhibitors, which occupies the active sites of the urease enzymes plentiful present in plant residues on the soil surface (Cantarella et al., 2008; Mariano et al., 2012).

Additives applied to urea reduce the N-NH<sub>3</sub> losses by volatilization when urease enzyme activity was inhibited (Rawluk et al., 2001; Sanz-Cobena et al., 2011; Reddy and Sharma, 2000; Soares et al., 2012). The inhibitor occupies the site of enzyme action, inactivating it, and delaying the start and the speed of N volatilization. The urea hydrolysis delay reduces the ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) concentration present on the soil surface, and thus decreases its loss (Cantarella et al., 2008). By preventing the fast hydrolysis, the inhibitor increases the possibility of the rainwater and irrigation to incorporate components of urea into the soil profile (Cantarella et al., 2008; Malhi et al., 2001). Another way by which it seeks to increase the urea utilization efficiency consists in coating the urea granules with polymers, which is integrated into the group of slow release fertilizers and subgroup of coated fertilizers (Cantarella et al., 2008). These fertilizers allow to reduce N losses by impairing urease enzymatic complexes, due to physical barriers, to reach urea soluble forms (Civardi et al., 2011) which enhances the recovering of N in more than 15% and increase maize yield in 1,250 kg ha<sup>-1</sup>, in comparison to common urea.

Among the tropical crops with great potential for cycling nutrient is highlighted the role played by pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.). In recent years, pearl millet has been increased cultivated as a rotation component in several grain production systems across different crop

fields, especially in the center-western region of Brazil, where the crop develops in adverse weather conditions, especially in areas with prolonged water deficit in the winter (Pereira Filho et al., 2003). The associated rusticity with the high mass accumulation make the pearl millet a crop with high capacity to recycle nutrients, in comparison with other tropical crops (Pereira Filho et al., 2003; Ong and Monteith, 1985). In a study carried out by Heringer and Moojen (2002), pear millet dry mass production was up to 20,000 kg ha<sup>-1</sup> at a dose of 450 kg ha<sup>-1</sup> of N. In other experiment, Cazetta et al. (2005) obtained 10,673 kg ha<sup>-1</sup> of pear millet dry mass only using residual nutrients from two previous no-tillage maize crops.

Another important aspect of pearl millet is its capacity to accumulate N in the dry mass (Christianson et al., 1990; Coaldrake and Pearson, 1985). The accumulation efficiency is due to the high capacity of millet (a C4 plant) in fixing carbon. In this plant groups, the N-nitrate (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) is reduced and assimilated in the leaf mesophyll cells, and CO<sub>2</sub> is incorporated into the vascular bundle sheath cells, which increases the physiological efficiency by light energy utilization in assimilating N, in relation to C3 species (Rosolem et al., 2010). In an experiment carried out after the application of 200 mg.kg<sup>-1</sup> of N in pots, Foloni et al. (2009) observed N accumulation about 130% higher in shoot dry mass of pear millet than in black oat plants. According to these authors, the combination of rusticity and physiological efficiency made pearl millet plants more apt to grow and use applied N by fertilizers than black oat.

In applied on plant residues, urea hydrolysis rate may increase since the enzyme that allows conversion of urea into NH<sub>3</sub> is abundant in

residues; the presence of residues on the soil surface can also change the temperature, humidity and degree of urea contact with soil, which can affect the rate of urea hydrolysis (Terman, 1980). In residue rich environments, N- hydrolyzed from urea can be immobilized on the mass of decomposing crop residues. The effect of the interaction urea source-residue on the growth of crop planted subsequently to N fertilization will therefore depend on the availability of soil N, amount of N immobilized and also rely on the synchronization of immobilized N release with phases of greatest nutritional demand of the crop for mineral N (Terman, 1980). This study is based on the hypothesis that the presence of residue on soil surface, by avoiding contact of urea with soil and creating conditions for a lower rate of urea hydrolysis, slows the conversion rate of urea to  $\text{NH}_3$ . When there is hydrolysis, the presence of soybean residue results in greater N immobilization in soil or facilitates its conversion to  $\text{N-NO}_3^-$ , providing a more gradual release of readily available N to plants, in amounts enough to meet the demand of pearl millet in their phases of larger N requirement. Supply of available N to millet plants also rely on the speed of N release by urea sources and subsequent interaction of N released with soybean residues.

The aim of this study was to evaluate the availability of soil mineral N and the efficiency of pearl millet in recovering residual N after application of common urea, sulfur-coated urea and two ureas treated with urease inhibitors in a Ferralsol with high moisture, without and with soybean residues on its surface.

## Material and Methods

The experiment was carried out in greenhouse conditions at the Soil Science Department of the Federal University of Lavras (Lavras city, Minas Gerais State, Brazil), between April and June 2012. Surface soil (0-20 cm depth) samples of a Ferralsol (IUSS Working Group, 2006) (in Brazil, Latossolo Vermelho-Amarelo (Embrapa, 2013)) was collected in a no-tillage grain production field (soybean and corn) located in the Nazareno city, Minas Gerais State, Brazil. The soil was air dried, separated with a 2 mm-sieve, from which 3 kg were added to pots with 3.5 dm<sup>3</sup>. Soil analyses (Silva, 2009 and Saez-Plaza et al., 2013 method) were performed prior to the beginning of the experiment, and results characterized the soil suitable for crop grow (Table 1), not requiring further fertilizations.

**Table 1.** Characterization of the Ferralsol used in the experiment

Clay	OM	pH	N-NH <sup>4+</sup>	N-NO <sup>3-</sup>	P-Mehlich 1	K <sup>+</sup>	S-SO <sub>4</sub> <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	H+Al	T	V
... g kg <sup>-1</sup> ...			.....	.....	mg dm <sup>-3</sup> .....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	%
560	32,8	5,0	14,2	41,2	6,1	141	17	2,4	0,7	4,5	8	44

OM: organic matter; pH in H<sub>2</sub>O; T: cation exchange capacity at pH 7; V: base saturation.

### Soil analysis

The experimental design was completely randomized with six replications in a 2 x 5 factorial arrangement. One of the factors was the presence or absence of soybean aerial part residues – in order to simulate a field condition. Soybean residues were collected from the same area from where the soil was sampled. The residues were cut in 5 cm pieces

and distributed on the pots surface at an equivalent rate of 3,600 kg ha<sup>-1</sup> (9,11 g per pot). Pots were irrigated until field capacity was reached, every day, during three days, in order to ensure a better contact between soybean residues and the soil surface.

The second factor was the N source: control (without any application of fertilizer), common urea (urea), urea coated with sulfur (16%) (urea+S); urea treated with urease inhibitor compounds-based on boron (0.4%) and copper (0.15%) (urea+B+Cu) and urea treated with N-(n-butyl) thiophosphorictriamide (1,060 mg.kg<sup>-1</sup>) (NBPT) urease inhibitor (urea+NBPT). From each N source, 300 mg kg<sup>-1</sup> (equivalent to 118 kg ha<sup>-1</sup> of N) were applied on the surface of the pots, regardless the residue presence or not. All pots were previously irrigated to reach 90% of field capacity, following the method recommended by Somasegaran and Hoben (1994).

After application of the N source, pots were not irrigated for 72 hours, leaving the N source granules exposed in the soil or residue surface in order to make the environment prone to NH<sub>3</sub> volatilization. After this period, pots were irrigated again to maintain soil moisture at 80% of field capacity until 21 days after the application of N sources. On the 22th day, soil samples of each pot were collected with a mini-auger to quantify N-NH<sup>4+</sup> and N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> forms according the *Kjeldahl* method (Saez-Plaza et al., 2013). The N-mineral was calculated by summing N-NH<sup>4+</sup> and N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

### **Plant analysis**

To evaluate the extraction of residual soil N and other nutrients from the different N sources applied, pear millet cv. BRS 1501 was sowed three days after soil sampling (25 days after application of sources of N), at 1-cm depth with a population of ten plants per pot. Besides the N from the different sources, no other fertilizer was applied due to the already satisfactory levels of other nutrients (Table 1). During the crop cycle (59 days), soil moisture was monitored daily and irrigation was made to reach 80% of field capacity when necessary, using the method proposed by Somasegaran and Hoben (1994). After 59 days, 100% of roots and plant above ground mass was collected. The soil was removed from the pots and sieved on a 2 mm mesh sieve. Roots were washed with distilled water to remove soil particles. Plant roots and aerial parts were dried for 72 hours at 60-65° C in a forced ventilation oven. Root and aerial fractions were weighted in order to obtain the root dry mass (RDM) and shoot dry mass (SDM), being further triturated in a Wiley-type mill for the N content analysis, using the *Kjeldahl* method (Saez-Plaza et al., 2013). Also were analyzed the macronutrients phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg), sulfur (S) and the micronutrients zinc (Zn), copper (Cu) and manganese (Mn) accumulated in shoots plant according the Silva (2009) method. The N accumulation in roots and shoots, as well as the other nutrients, was calculated by multiplying the respective nutrient content in tissue by its dry mass.

### **Nitrogen use efficiency**

In order to assess parameters of nutrient productivity for the pearl millet crop, three kinds of efficiency were calculated: physiological

efficiency (equation 1) (Fageria and Baligar, 2005), N accumulated relative efficiency (equation 2) (Baligar et al., 2001) and relative agronomic efficiency (equation 3) (Fageria and Baligar, 2005):

$$PE \text{ (g.g}^{-1}\text{)} = (BP_{\text{source}} - BP_{\text{control}}) / (NA_{\text{source}} - NA_{\text{control}}) \quad \text{(equation 1)}$$

$$NARE \text{ (\%)} = ((NA_{\text{source}} - NA_{\text{control}}) / DA) \times 100 \quad \text{(equation 2)}$$

$$RAE \text{ (\%)} = (SDM_{\text{source}} / SDM_{\text{reference}}) \times 100 \quad \text{(equation 3)}$$

Where PE is the physiological efficiency; NARE is the N accumulated relative efficiency; RAE is the relative agronomic efficiency;  $BP_{\text{source}}$ : biology production (RDM + SDM) of urea as primary source;  $BP_{\text{control}}$ : biology production (RDM + SDM) of control treatment;  $NA_{\text{source}}$ : N accumulated in RDM + SDM of urea source;  $NA_{\text{control}}$ : N accumulated in RDM + SDM of control; DA: dose of N applied ( $300 \text{ mg kg}^{-1}$  per source of N treatment);  $SDM_{\text{source}}$ : SDM of urea source and  $SDM_{\text{reference}}$ : RDM of control treatment.

### **Statistical analysis**

ANOVAs were performed in SISVAR software to detect treatment effects and interactions for each dependent soil and plant variables. If a significant F test ( $P \leq 0.05$ ) was obtained from an ANOVA, Scott-Knot test was used for determining treatment differences at  $P \leq 0.05$ . SISVAR software (Ferreira, 2011) was used to perform all the statistical analyses already described.

## Results and Discussion

### Soil analyses

The effect of soybean residues regarding  $\text{N-NH}_4^+$  levels (Fig.1A) was only observed in the treatments with urea and urea+B+Cu, where the presence of residues reduced ( $P \leq 0.05$ ) the amount of  $\text{N-NH}_4^+$ . For all other urea sources the presence or absence of soybean residues did not affected significantly the amount of  $\text{N-NH}_4^+$ .

Concerning N sources, it can be observed that the treatments with soybean residues presented three distinct groups, where the treatments urea+S, urea+NBPT and urea+B+Cu had the highest values, followed by the treatments of common urea and, finally, the control. For the treatments without soybean residues, there was no difference among the N sources, except for the control.

Regarding  $\text{N-NO}_3^-$  (Fig. 1B), except for the control, the variable soybean residue reduced ( $P \leq 0.05$ ) the absolute amount of  $\text{N-NO}_3^-$  in the soil for all treatments. The only significant differences is found in the treatments with urea and in the urea+NBPT.

The source of N also did affect the  $\text{N-NO}_3^-$  in both residue managements. For the variation with soybean residues, urea+NBPT and urea+B+Cu showed the highest values, followed by urea+S and urea. When residues are not present on the soil surface, the urea+NBPT and urea+B+Cu presented the highest amounts of  $\text{N-NO}_3^-$ . The control treatment had the availability of nitrate in soil.

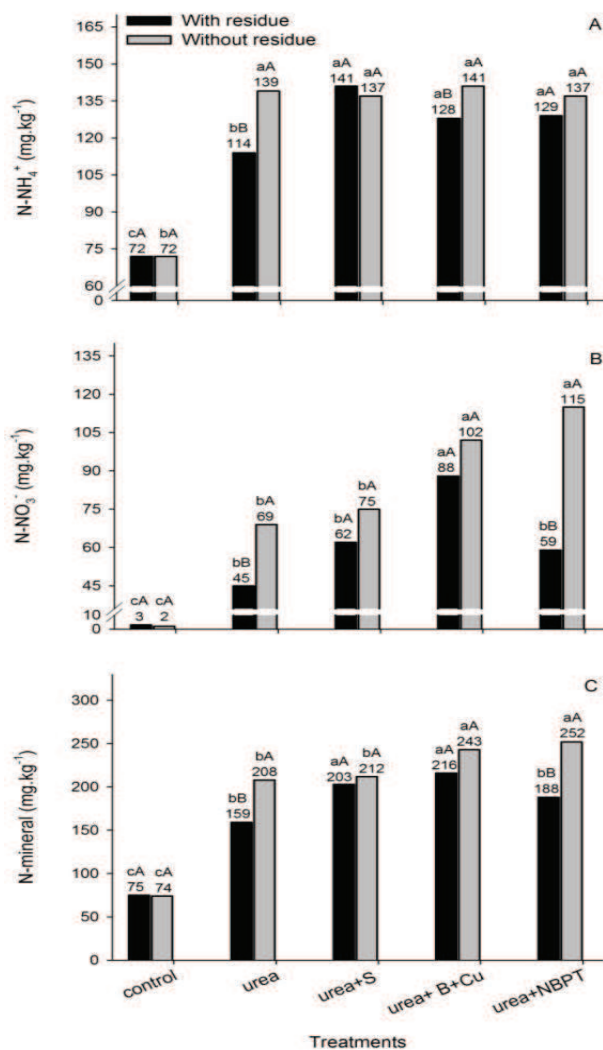
When adding  $\text{N-NH}_4$  and  $\text{N-NO}_3^-$  fractions to obtain the mineral N (Fig. 1C), the effect of soybean residues can only be observed in the treatments with urea and urea+NBPT, where the presence of residues



caused a reduction ( $P \leq 0.05$ ) in soil available N. When comparing the different sources of N in the presence of soybean residues, the treatments urea+B+Cu and urea+S had the highest values, significantly different from the urea+NBPT and urea. The treatments without residues also showed significant differences, with urea+NBPT having the highest contents of mineral N in soil. As expected, for all treatments, the control had the lowest values ( $P \leq 0.05$ ) of mineral N, endorsing the effect of soybean residues and N sources on N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> forms in soils.

Except in the treatment with urea+S and control treatments for the variable N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, the presence of soybean residues reduced the amounts of N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and consequently N-mineral. The presence of crop residues at the surface may decreasing contact of the urea granules with the soil, and thus possibly reducing adsorption of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> on soil particles (Rochette et al., 2009).

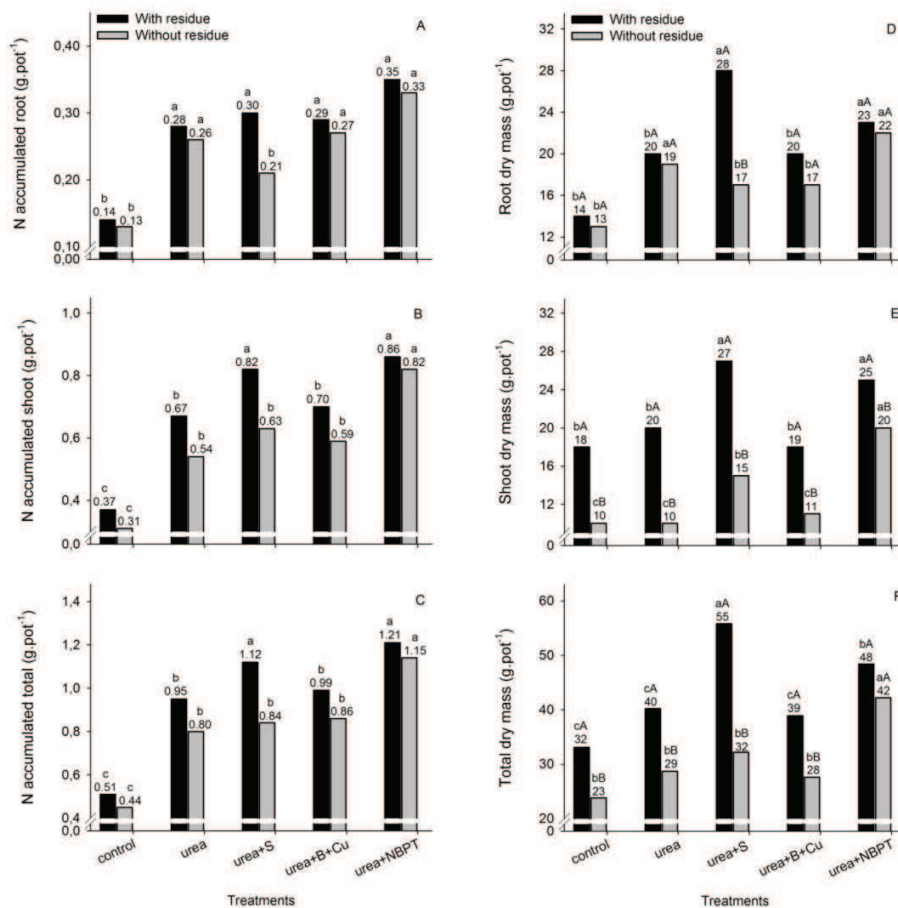
The N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> form was predominant in all treatments, confirming that the nitrification process was acting intensively during the 21 days of the N sources applied. The N sources with urease inhibitors or coated forms also presented low losses of N probably due to reduction of occurrence NH<sub>3</sub> volatilization (Cantarella et al., 2008). Regarding the control treatment, the N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> form increase indicates that during 21 days of incubation N contained in organic forms was mineralized.



**Figure 1.** Quantity of N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (A), N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (B) and N-mineral (C) in soil 21 days after application of different types of N sources and with presence and absence of soybean residues on a soil with high moisture surface. Values with same lower case letters do not differ among the N source, while same upper case letters, for each urea source, do not differ in terms of presence or absence of soybean residues, according Scott Knot test at P ≤ 0.05.

**Plant analysis**

The second experiment evaluated the N accumulated and mass of pearl millet plants sowed in the same pots (Fig. 2). Also, it was assessed the macronutrients P, K, Ca, Mg, S and the micronutrients Zn, Cu, Mn, accumulated on shoot on the same pearl millet plants (Table 2). The results indicate that presence or not of the residue and the different N sources influenced the amounts of N in plant root and aerial tissue and also in plants dry mass.



**Figure 2.** N accumulated of root (Fig. A), N accumulated of shoot (Fig. B), N accumulated of total plants (Fig. C), root dry mass (Fig. D), shoot dry mass (Fig. E) and total dry mass (Fig. F) of pearl millet plants (g.pot<sup>-1</sup>) cultivated in pots during 59 days. Values with same lower case letters do not differ among the N source, while same upper case letters do not differ from presence or absence of residues according Scott Knot test at 5% of probability. The absence of letters indicates no statistical interaction.

**Table 2.** Nutrients accumulated ( $\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$ ) in shoot of pearl millet plants cultivated in pots with presence or absence of soybean residues on soil surface.

Treatments	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Zn	Mn
	----- $\text{mg}\cdot\text{pot}^{-1}$ -----							
	Withresidue							
Control	52.68 aA	272.13 bA	57.52 aA	22.19 cA	10.57 cA	0.09 aA	0.34 bA	0.43 cA
Urea	58.17 aA	272.86 bA	103.51 aA	49.38 cA	7.49 cA	0.11 aA	0.42 bA	0.97 bA
Urea+S	64.10 aA	387.48 aA	211.19 aA	74.66 aA	32.33 aA	0.31 aA	0.66 aA	1.48 aA
Urea+B+Cu	57.76 aA	267.21 bA	129.94 aA	55.99 bA	9.74 cA	0.12 aA	0.44 bA	1.22 aA
Urea+NBPT	57.12 aA	346.91 aA	144.73 aA	62.08 bA	19.64 bA	0.18 aA	0.60 aA	1.25 aB
Average	57.97 A	309.32 A	129.38 A	52.86 A	15.96 A	0.16 A	0.49 A	1.07 A
	Withoutresidue							
Control	29.18 cB	165.35 cB	55.92 bA	21.22 dA	6.72 cA	0.06 bA	0.25 cB	0.37 cA
Urea	26.78 cB	136.83 cB	61.90 bA	38.03 cA	4.54 cA	0.09 bA	0.28 cB	0.87 bA
Urea+S	38.72 bB	217.86 bB	60.86 bB	34.74 cB	21.35 aB	0.11 bB	0.41 bB	1.06 bB
Urea+B+Cu	27.77 cB	154.25 cB	82.75 bA	44.36 bA	6.46 cA	0.08 bA	0.35 bB	1.03 bA
Urea+NBPT	49.69 aB	289.61 aB	141.79 aA	59.24 aA	16.64 bA	0.20 aA	0.57 aA	1.74 aA
Average	34.43 B	192.78 B	80.64 B	39.52 B	11.19 B	0.11 A	0.37 B	1.02 A

Values with same lower case letters do not differ among the N sources, while same upper case letters do not differ from presence or absence of residues according the Scott Knot test at 5% of probability.

Regarding the N accumulated in plant tissue, no significant effects ( $P \leq 0.05$ ) of residue was observed in the N accumulated on root (Fig. 2A), shoots (Fig. 2B) and of the total dry mass on the pearl millet plants (Fig. 3C). In other hand, the presence of soybean residues considerably increased the amount of N in all treatments. Regarding the treatments without residues, the N accumulation in roots no significant effects were observed among the urea sources, while in the N accumulated in shoots, urea+S and urea+NBPT had the highest values ( $P \leq 0.05$ ).

The presence of soybean residues no obtained significant effect ( $P \leq 0.05$ ) among sources of urea to total N accumulated in plants (Fig. 2C). Of the same form with the N accumulated in the shoot, urea+S and urea+NBPT obtained the highest N accumulated when applied on the soil surface without residue, and urea+NBPT on the soil with residue. Both in the shoot, as in the roots, the N accumulated was highest in all urea sources than the control treatment, regardless de soybean residue management.

Concerning the other nutrients accumulated in the shoot pearl millet plants, values of macronutrients (P, K, Ca, Mg, S) in all treatment were high when the soybean residues were applied than treatments which not received residue (Table 2). In other hand, for micronutrients Cu and Mn, no significant effects ( $P \leq 0.05$ ) among the treatments were verified. However, in treatments with residue, it was accumulated large amounts of Zn in the pearl millet plants.

The dry mass of roots and aerial parts was also influenced by residues and N sources. The presence of residues had effect on the root mass only for the urea+S treatment (Fig. 2D). For treatments with

residues, urea+S and urea+NBPT had significantly the highest values for mass when compared to the other treatments.

However, in all treatments which received residue, had significantly the highest shoot dry mass, being the urea+S and urea+NBPT treatment which had the highest values (Fig. 2E). In the same form, the total dry mass (sum of the root dry mass and shoot dry mass) obtained the same pattern of the shoot dry mass, had significantly the highest total dry mass on the treatment which received residue (Fig. 2F).

The positive effects of increase dry mass in treatments were soybean residue was applied on soil surface can be related to the beneficial effect which the cover crops cause to maintenance of higher soil water availability, even when pots are daily irrigated, as observed by Ernani et al. (2005). This effect also was observed by Teasdale and Abdalbaki (1995). The presence of residues on the surface increase the plant's water absorption (Reicosky and Saxton, 2007), consequently amounts of nutrients accumulated in plant tissues (Table 2).

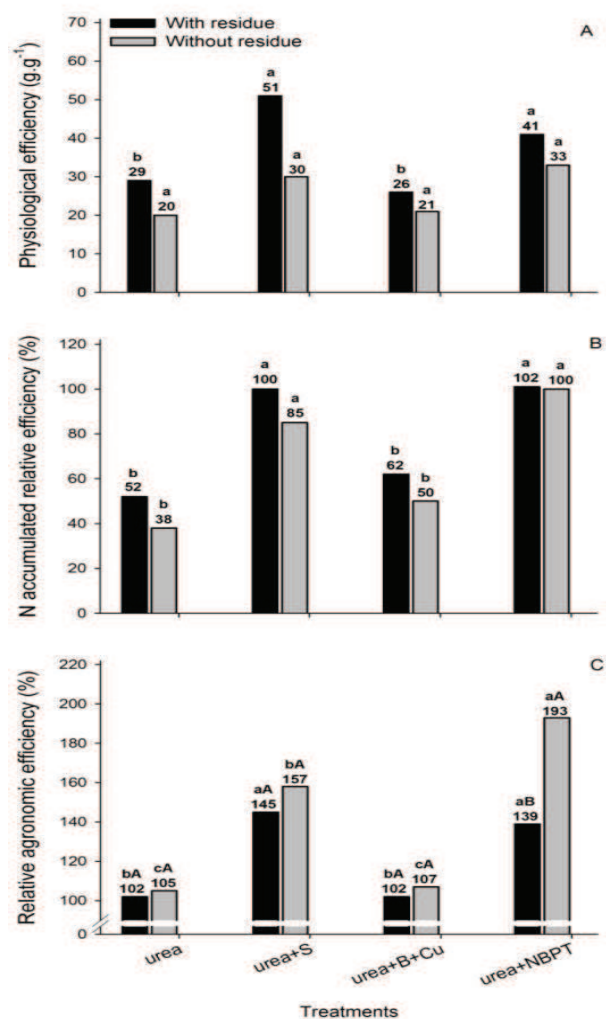
The highest ( $P \leq 0.05$ ) shoot and total dry mass observed on the urea+S and urea+NBPT treatment with residue can also be correlated to the presence of S as coating in the treatment urea+S and as part of the NBPT molecule in the urea+NBPT treatment, which increased mass production. The results presented on the table 2 show that urea+S and urea+NBP produced the highest values of S accumulated in shoot pearl millet plants, regardless presence or not of residues. As stated by Scherer (2001), S is one of the essential nutrients for plant growth with crop requirement similar to P. In addition to that, its functions within the plant are related closely to those of N, and the two nutrients are synergistic

(Ceccotti, 1996), concluding that a higher absorption of N will demand higher absorption of S. On the other hand, it may be occurred mineralization of the soybean residue during the carried experiment and which thus released the nutrients to be extracted by plants. Smith and Sharpley (1990) observed in work carried in a laboratory that at short time (14 days) the N mineralization was enhanced more 50% with the alfalfa addition on soil surface.

### **Nitrogen use efficiency**

The physiological efficiency (PE) is a relation among total mass production and N accumulated. As seen in the Figure 3A, the presence or not of soybean residue did not significantly affect the physiological efficiency. Probably the high variation coefficient (34%) has influenced on the results. However, the different sources factor produced significant differences ( $P \leq 0.05$ ) among treatments. All treatments with residues presented higher physiological efficiency, despite only urea+NBPT was not statistic different. This difference, like the effect observed in Figure 2A, B and C, showed correlation with the N accumulated in root and shoot plants, and can also be attributed to the microclimatic effect of the soybean residues on the soil surface (Reicosky and Saxton, 2006), once the PE considers the N absorption by plants (Fageria and Baligar, 2005).





**Figure 3.** (A) Physiological efficiency (g.g<sup>-1</sup>), (B) N accumulated relative efficiency (%) and (C) relative agronomic efficiency (%) of pearl millet plants cultivated during 59 days in pots with different N sources. Values with same lower case letters do not differ among the N source, while same upper case letters do not differ from presence or absence of residues according Scott Knot test at 5% of probability. The absence of letters indicates no statistical interaction.

The N accumulated relative efficiency (NARE), of same form than PE, did not presented statistical differences regarding residues. Probably the high variation coefficient (28%) has influenced results. However, it was influenced by the N source, generating statistical distinct values (Fig. 3B). The treatments with urea+NBPT and urea+S showed the highest ( $P \leq 0.05$ ) NARE both in residues absence or presence, and both not differ significantly among them.

Concerning the relative agronomic efficiency (RAE), both residue and N source influenced the final results of RAE (Fig. 3C). Values above 100% indicate that there was an increment in mass production when compared to the control treatment. The same form as the NARE, urea+NBPT and urea+S were the treatment that had the highest values, despite have been interaction among N sources with absence or presence of residues.

The NARE and RAE demonstrate the agronomic efficiency of the pearl millet in the extracting N from soil. Besides the maintenance of high soil moisture levels – 80% of field capacity, which stimulates the ammonia volatilization – the pearl millet plants were still able to absorb high amounts of the nutrient, especially in the treatments urea+S and urea+NBPT. The results also show that only urea+S and urea+NBPT are significantly more efficient in terms of RAE, while urea and urea+B+Cu are just slightly better than the control treatment.

When observed closer, the urea+S and urea+NBPT sources has been better agronomic performance due to probably influence with other nutrients, especially K, S and Zn, where they showed higher accumulation ( $P \leq 0.05$ ) than the other sources, regardless the presence or

absence of soybean residue (Table 2). On the other hand, probably during the 59 days of the pearl millet cycle, the urea+S and urea+NBPT sources released N gradually (Cantarella et al., 2008), attaining the amounts required by plants for an adequate nutrition condition.

### Conclusions

Addition of N by different urea sources significantly increase the N availability in soils, mainly in the treatments where residue are not covering the soil surface. After 21 days exposed to reaction, the  $\text{N-NH}_4^+$  is the highest fraction of N-mineral in soil, regardless soil are covered or not with soybean residue.

Pearl millet increase the dry mass in the shoot and roots when urea+S and urea+NBPT are the N sources provided on the soil surface with or without residue. When soil is covered with residue, urea+NBPT presents the highest total dry mass, and, when residue was not added, pearl millet high dry biomass was produced in soils fertilized with urea+S.

N accumulated in pearl millet is greater when urea+S and urea+NBPT where applied on the soil cover with soybean residue, and urea+NBPT on the soil without residue. Pearl millet extracts significantly more P, K, Ca, Mg, S and Zn when sowed in the soil cover with soybean residue.

Pearl millet plants also present the highest agronomic efficiency for N when the sources urea+S and urea+NBPT are applied on the soil surface with or without soybean residue.

### Acknowledgments

Scholarship for the first author was provided by FAPEMIG (CAG 22018). Project funded by CNPq (process 308592/2011-5) and Embrapa Maize and Sorghum, with support from Leibniz Centre for Agricultural Landscape Research (ZALF).

### References

- 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**, v. 76, p.76-88, 2013.
- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.32, p.921-950, 2001.
- CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; CONTIN, T. L. M.; DIAS, F. L. F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R. B.; QUAGGIO, J. A. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**, v.65, p.397-401, 2008.
- CAZETTA, D. A.; FORNASIERI FILHO, D.; GIROTTO, F. Composição, produção de matéria seca e cobertura do solo em cultivo exclusivo e consorciado de milho e crotalária. **Acta Scientiarum. Biological Science**, v.27, p.575-580, 2005.
- CECCOTTI, S. P. Plant nutrient sulphur-a review of nutrient balance, environmental impact and fertilizers. **Fertility Research**, v.43, p.117-125, 1996.
- CHRISTIANSON, C. B.; BATIONO, A.; HENAO, J.; VLEK, P. L. G. Fate and Efficiency of N-Fertilizers Applied to Pearl-Millet in Niger. **Plant Soil**, v.125, 221-231, 1990.

CIVARDI, E. A.; SILVEIRA NETO, A. N.; RAGAGNIN, V. A.; GODOY, E. R.; BROD, E. Slow-release urea applied to surface and regular urea incorporated to soil on maize yield. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.41, p.52-59, 2011.

COALDRAKE, P. D.; PEARSON, C. J. Development and Dry-Weight Accumulation of Pearl-Millet as Affected by Nitrogen Supply. **Field Crops Research**, v.11, p.171-184, 1985.

DA ROS, C. O.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Volatilização de amônia com aplicação de uréia na superfície do solo, no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.35, p.799-805, 2005.

DINNES, D. L.; KARLEN, D. L.; JAYNES, D. B.; KASPAR, T. C.; HATFIELD, J. L.; COLVIN, T. S.; CAMBARDELLA, C. A. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained midwestern soils. **Agronomy Journal**, v.94, p.153-171, 2002.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos** (3ª ed). Brasília: Embrapa Produção de Informação. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 353p, 2013.

ERNANI, P. R.; SANGOI, L.; LECH, V. A.; RAMPAZZO, C. The addition form of crop residues and urea interferes on nitrogen availability. **Ciência Rural**, v.35, p.360-365, 2005.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy** v.88, p.97-185, 2005.

FAO: FAOSTAT. **Food and Agriculture Organisation of the United Nations**. Disponível em: ≤ <http://faostat.fao.org> >. Acessado em: 9 mai. 2014.

FERREIRA, D. F. Sisvar: A Computer Statistical Analysis System. **Ciência & Agrotecnologia**, v.35, p.1039-1042, 2011.

FOLONI, J. S. S.; GARCIA, R. A.; TIRITAN, C. S.; SILVA, A. S. J. Adubação nitrogenada e qualidade dos restos vegetais de milho e aveia preta. **Agrarian**, v.1, p.45-57, 2009.

HERINGER, I.; MOOJEN, E. L. Productive potential, structure changes and quality of pearl millet under different nitrogen levels. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.31, p.875-882, 2002.

IUSS WORKING GROUP, W. R. B. **World reference base for soil resources: World Soil Resources Report**, p.103, 2006. Available in: ≤ <ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/wsrr103e.pdf> > Accessed on: 9 mai. 2014.

JANSSON, S. L.; PERSSON, J. Mineralization and Immobilization of Soil Nitrogen. *In*: Stevenson, F. J. **Nitrogen in agricultural soils**. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, Madison, p. 229-252, 1982.

MALHI, S. S.; GRANT, C. A.; JOHNSTON, A. M.; GILL, K. S. Nitrogen fertilization management for no-till cereal production in the Canadian Great Plains: a review. **Soil & Tillage Research**, v.60, p.101-122, 2001.

MARIANO, E.; TRIVELIN, P. C. O.; VIEIRA, M. X.; LEITE, J. M.; OTTO, R.; FRANCO, H. C. J. Ammonia Losses Estimated by an Open Collector from Urea Applied to Sugarcane Straw. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, p.411-419, 2012.

ONG, C. K.; MONTEITH, J. L. Response of Pearl-Millet to Light and Temperature. **Field Crops Research**, v.11, p.141-160, 1985.

PACHOLSKI, A.; CAI, GUI-XIN; FAN, XIAO-HUI; DING, H.; CHEN, D.; NIEDER, R.; ROELCKE, M. Comparison of different methods for the measurement of ammonia volatilization after urea application in Henan Province, China. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.171, p.361-369, 2008.

PEREIRA FILHO, I. A.; FERREIRA, A. D. S.; COELHO, A. M.; CASELA, C. R.; KARAM, D.; RODRIGUES, J. A. S.; CRUZ, J. C.;

WAQUIL, J. M. Manejo da Cultura do Milheto. **Circular Técnica-29**. Embrapa Milho e Sorgo: Sete Lagoas, Brazil, 17p, 2003.

RAWLUK, C. D. L.; GRANT, C. A.; RACZ, G. J. Ammonia volatilization from soils fertilized with urea and varying rates of urease inhibitor NBPT. **Canadian Journal of Soil Science**, v.81, p.239-246, 2001.

REDDY, D. D.; SHARMA, K. L. Effect of amending urea fertilizer with chemical additives on ammonia volatilization loss and nitrogen-use efficiency. **Biology Fertility of Soils**, v.32, p.24-27, 2000.

REICOSKY, D. C.; SAXTON, K. E. The benefits of no-tillage. *In*: Baker, C. J.; Saxton, K. E.; Ritchie, W. R.; Chamen, W. C. T.; Reicosky, D. C.; Ribeiro, M. F. S.; Justice, S. E. and Hobbs, P. R (Eds). **No-tillage Seeding In Conservation Agriculture**. (2nd.), UK, pp. 11-20, 2007.

ROCHETTE, P., ANGERS, D. A., CHANTIGNY, M. H., MACDONALD, J. D., BISSONNETTE, N., & BERTRAND, N. Ammonia volatilization following surface application of urea to tilled and no-till soils: A laboratory comparison. **Soil and Tillage Research**, v.103, p.310-315, 2009.

ROSOLEM, C. A.; WERLE, R., GARCIA, R. A. Nitrogen washing from C3 and C4 cover grasses residues by rain. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1899-1905, 2010.

SAEZ-PLAZA, P.; NAVAS, M. J.; WYBRANIEC, S.; MICHALOWSKI, T.; ASUERO, A. G. An Overview of the Kjeldahl Method of Nitrogen Determination. Part II. Sample Preparation, Working Scale, Instrumental Finish, and Quality Control. **Critical Reviews in Analytical Chemistry**, v.43, p.224-272, 2013.

TERMAN, G. L. Volatilization losses of nitrogen as ammonia from surface-applied fertilizers, organic amendments, and crop residues. **Advances in Agronomy**, v.31, p.189-223, 1980.

SANZ-COBENA, A.; MISSELBROOK, T.; CAMP, V.; VALLEJO, A. Effect of water addition and the urease inhibitor NBPT on the abatement of ammonia emission from surface applied urea. **Atmospheric Environment**, v.45, p.1517-1524, 2011.

SCHERER, H. W. Sulphur in crop production - invited paper. **European Journal of Agronomy**, v.14, p.81-111, 2001.

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

SMITH, S. J.; SHARPLEY, A. N. Soil nitrogen mineralization in the presence of surface and incorporated crop residues. **Agronomy Journal**, v. 82, n. 1, p. 112-116, 1990.

SOARES, J. R., CANTARELLA, H., & MENEGALE, M. L. D. C. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. **Soil Biology and Biochemistry**, v.52, p.82-89, 2012.

SOMASEGARAN, P.; HOBEN, H. J. **Handbook for rhizobia: methods in legume-Rhizobium technology**. Springer-Verlag New York Inc., New York, 450p, 1994.

TEASDALE, J. R.; ABDULBAKI, A. A. Soil-Temperature and Tomato Growth-Associated with Black Polyethylene and Hairy Vetch Mulches. **Journal of American Society for Horticultural Science**, v.120, p.848-853, 1995.