

# TEOR DE NITRATO COMO INDICADOR COMPLEMENTAR DA DISPONIBILIDADE DE NITROGÊNIO NO SOLO PARA O MILHO<sup>(1)</sup>

Lisandro Rambo<sup>(2)</sup>, Paulo Regis Ferreira da Silva<sup>(3)</sup>, Cimélio Bayer<sup>(3)</sup>, Gilber Argenta<sup>(4)</sup>, Mércio Luiz Strieder<sup>(5)</sup>, & Adriano Alves da Silva<sup>(5)</sup>

## RESUMO

Avanços na adubação nitrogenada em cobertura em milho poderão ser obtidos com a inclusão de características de solo como indicadores complementares da disponibilidade de N. Os objetivos deste estudo foram avaliar o potencial de uso, o nível crítico e o melhor estágio de desenvolvimento da cultura para determinação do teor de  $N-NO_3^-$  no solo, visando à predição da disponibilidade de N ao milho, e verificar se a determinação do teor de  $N-NH_4^+$ , em adição ao teor de  $N-NO_3^-$ , aumenta a eficiência na avaliação da disponibilidade de N. Para isso, realizou-se um experimento por dois anos agrícolas (2002/03 e 2003/04) em Argissolo Vermelho da Depressão Central do RS, no qual se realizou a simulação de diferentes níveis de disponibilidade de N no solo a partir da utilização de cinco doses de N (0, 50, 100, 200 e 300 kg ha<sup>-1</sup>), parte na semeadura (20 %) e o restante em cobertura (estádio V3). O experimento seguiu o delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições, e nos dois anos agrícolas foram avaliados os teores de  $N-NO_3^-$ , de  $N-NH_4^+$  e de N mineral ( $N-NO_3^- + N-NH_4^+$ ) no solo (0–30 cm), em diferentes estádios de desenvolvimento (V3, V6, V10 e espigamento), e o rendimento de grãos do milho. Em geral, os teores de  $N-NO_3^-$  no solo foram sensíveis às doses de N aplicadas, com destaque para o estágio V6, no qual se verificou também a melhor relação desse elemento com o rendimento de grãos do milho. O nível crítico de  $N-NO_3^-$  no solo, a partir do qual a resposta à aplicação de N é improvável, foi estimado em 20 mg kg<sup>-1</sup> para o solo estudado. A avaliação do teor de  $N-NH_4^+$  do solo, em adição ao teor de

---

<sup>(1)</sup> Extraído da tese de doutorado do primeiro autor. Pesquisa financiada pelo CNPq. Recebido para publicação em fevereiro de 2006 e aprovado em fevereiro de 2007.

<sup>(2)</sup> Engenheiro-Agrônomo, Dr., Desenvolvimento de Produtos, Syngenta Seeds Ltda. Rod. BR 452, km 142 + 543 m. Caixa Postal 585, CEP 38400-974 Uberlândia (MG). E-mail: lisandrorambo@yahoo.com.br

<sup>(3)</sup> Professor da Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – FA/UFRGS. Av. Bento Gonçalves 7712, CEP 91540-000 Porto Alegre (RS). Pesquisador do CNPq. E-mails: paulo.silva@ufrgs.br; cimelio.bayer@ufrgs.br

<sup>(4)</sup> Engenheiro-Agrônomo, Dr., Gerente Desenvolvimento de Produtos - Syngenta Seeds Ltda. E-mail: gilber.argenta@syngenta.com

<sup>(5)</sup> Engenheiro-Agrônomo, Aluno do Programa de Pós-graduação em Fitotecnia da FA/UFRGS. Bolsista do CNPq. E-mails: domercio@gmail.com; agroadriano@terra.com.br

$\text{N-NO}_3^-$ , melhorou a predição da disponibilidade de N do solo, como evidenciado pela maior relação deste indicador com o rendimento de grãos, destacando a necessidade de desenvolvimento de *kits* de determinação rápida do teor de N mineral ( $\text{N-NO}_3^- + \text{N-NH}_4^+$ ) no solo. Os resultados do uso de  $\text{N-NO}_3^-$  e  $\text{N-NH}_4^+$  como indicadores complementares da disponibilidade de N do solo para o milho são promissores, e estudos deverão ser desenvolvidos em diferentes condições edafoclimáticas para confirmar a adequação de seu uso no manejo da adubação nitrogenada em cobertura no milho.

**Termos de indexação:** *Zea mays*, eficiência de uso do N, testes de nitrato, rendimento de grãos, estádios de desenvolvimento da planta.

#### SUMMARY: NITRATE CONCENTRATION AS A COMPLEMENTARY INDICATOR OF SOIL NITROGEN AVAILABILITY TO CORN

Nitrogen fertilization applied as sidedressing in corn can be optimized by considering additional soil characteristics as complementary indicators of soil N availability. The objectives of this study were to evaluate the potential use, critical level and best sampling time of the soil nitrate ( $\text{NO}_3^-$ -N) concentration to predict soil N availability in corn, as well as to verify if the determination of the soil ammonium ( $\text{NH}_4^+$ -N) concentration, in addition to  $\text{NO}_3^-$ -N concentration, enhances the efficiency of N availability evaluation. A field experiment was conducted in two growing seasons (2002/03 and 2003/04) in Eldorado do Sul, state of Rio Grande do Sul, Brazil. Different levels of soil N availability were simulated by the application of five N rates (0, 50, 100, 200, and 300 kg ha<sup>-1</sup>) 20 % at sowing and the rest sidedressed at V3. The experiment was structured in a randomized block design with four replications.  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N and soil mineral N ( $\text{NO}_3^-$ -N +  $\text{NH}_4^+$ -N) concentrations in the 0–30 cm soil layer at V3, V6, V10 and at silking, as well as corn grain yield were evaluated in both growing seasons. In general,  $\text{NO}_3^-$ -N soil concentrations were sensitive to the applied N rates, mainly in V6 when the best relationship between  $\text{NO}_3^-$ -N and corn grain yield was found. The critical level of soil  $\text{NO}_3^-$ -N concentration, above which a response to N application is unlikely, was estimated at 20 mg kg<sup>-1</sup> in the studied soil, at growth stage V6. The determination of soil  $\text{NH}_4^+$ -N concentration, in addition to soil  $\text{NO}_3^-$ -N concentration, improved the prediction of N availability. A better relationship of soil mineral N ( $\text{NH}_4^+$ -N +  $\text{NO}_3^-$ -N) than of  $\text{NO}_3^-$ -N concentration with corn grain yield was observed. These results indicate that the development of kits for instant determination of soil mineral N concentration is necessary.  $\text{NO}_3^-$ -N and  $\text{NH}_4^+$ -N as complementary indicators of soil N availability for corn appear promising and studies should be developed under different climate and soil conditions to adequate their use to the management of sidedressed N in corn.

*Index terms:* *Zea mays*, N efficiency use, soil nitrate tests, grain yield, plant growth stages.

## INTRODUÇÃO

No mundo, a eficiência de uso do N em cereais é de apenas 33 %. Considerando os 67 % de N que não são aproveitados, há uma perda estimada anual de 15,9 bilhões de dólares com fertilização nitrogenada (Raun & Johnson, 1999), em adição aos impactos negativos ao ambiente (Schröder et al., 2000). A alta mobilidade do  $\text{NO}_3^-$  no solo justifica a preocupação em relação ao manejo da adubação nitrogenada em solos agrícolas (Vanotti & Bundy, 1994), e o aumento da concentração de  $\text{NO}_3^-$  na água tem gerado grande discussão sobre os seus efeitos na saúde e no ambiente, estimulando pesquisas de caráter agroecológico no mundo

inteiro, principalmente em países desenvolvidos da Europa e da América do Norte (Addiscot, 2000; Andraski et al., 2000).

No Brasil, as baixas doses de N aplicadas nas culturas justificam, ao menos em parte, a menor preocupação quanto aos possíveis efeitos da fertilização nitrogenada no ambiente. Entretanto, o aumento das doses de N em sistemas altamente produtivos e o uso de fertilizantes nitrogenados associados com espécies leguminosas de plantas de cobertura e, ou, com dejetos animais merecem atenção quanto ao seu impacto no ambiente (Ceretta et al., 2003; Port et al., 2003), sobretudo a contaminação da água pela lixiviação de  $\text{NO}_3^-$  (Randall & Mulla, 2001).

O teor de matéria orgânica do solo (MOS) tem sido utilizado como o principal indicador da disponibilidade de N para as culturas no Brasil. Recentemente, no Sul do País, especificamente nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, a recomendação de adubação nitrogenada em milho apresentou avanços expressivos, passando a considerar também o efeito das pré-culturas na disponibilidade de N (Amado et al., 2002). Considerando que o sistema de recomendação deve estar em constante aperfeiçoamento, uma melhoria potencial seria a inclusão de características complementares de solo e de planta que permitissem o monitoramento da disponibilidade de N durante o ciclo do milho, visando maior precisão na recomendação das doses e maior flexibilidade do manejo do N nessa cultura (Argenta, 2001; Rambo et al., 2004).

Dentre as características de solo usadas como indicadoras da disponibilidade de N no solo, o teor de N mineral, especialmente o de  $\text{NO}_3^-$ , tem-se destacado. O uso desta característica baseia-se na disponibilidade de testes rápidos para sua determinação (Roth et al., 1992; Sims et al., 1995), bem como no fato de que grande proporção do N mineral está na forma de  $\text{NO}_3^-$  (Sims et al., 1995; Ma & Dwyer, 1999). No entanto, deve-se considerar que o íon  $\text{NO}_3^-$  é repellido pelas cargas negativas dos colóides, tendendo a permanecer em solução e ser lixiviado pela água de percolação (Dyenia & Camargo, 1999). Dessa forma, sob certas condições como, por exemplo, com alta precipitação pluvial ou sob irrigação complementar a inclusão da determinação do íon  $\text{NH}_4^+$  pode ser uma boa opção (Rambo, 2005), por encontrar-se adsorvido às cargas negativas do solo.

Os testes que fornecem ou indicam a quantidade de N mineral presente, denominados testes de intensidade, foram detalhadamente discutidos em Rambo et al. (2004) e podem ser divididos basicamente em teste de pré-semeadura (TPS), teste de pré-aplicação de N em cobertura (TPNC) e teste de pós-colheita (TPCC). Dos testes supracitados, destaca-se o TPNC, que tem sido o mais estudado e difundido, principalmente na América do Norte. Neste teste é avaliada a quantidade de  $\text{NO}_3^-$  que se encontra no solo até a profundidade de 30 cm, no estádio V6 (seis folhas expandidas) de desenvolvimento de milho, visando detectar a variação da disponibilidade de N durante o ciclo da cultura e para predizer a dose de N a ser suplementada (Magdoff, 1991; Vanotti & Bundy, 1994). Devem ser considerados vários aspectos que possibilitam que este teste possa predizer as necessidades de N da cultura do milho. Inicialmente, parte-se do princípio de que o N mineral no solo na época da amostragem é o resultado da integração de todos os fatores climáticos e de manejo da cultura, da adubação e do solo que influenciam a disponibilidade de N até a coleta. Considera-se também que grande parte do N do solo é mineralizada até pouco tempo antes da época de amostragem, que a maior parte do N disponível no solo deve se encontrar próximo à zona

radicular no início do rápido crescimento da planta (V6), para assegurar nutrição adequada, e que o teor de N determinado pelo teste está correlacionado com o N total disponibilizado pelo solo ao longo da ontogenia da planta (Magdoff, 1991).

Poucos foram os estudos realizados no Brasil, sobretudo na região Sul, visando ao uso do teor de N mineral, principalmente o de  $\text{NO}_3^-$ , como indicador do teor de N no solo para a cultura do milho. Além disso, não se tem conhecimento de trabalhos realizados no Brasil que tenham utilizado essa abordagem no sistema plantio direto. Nesse sentido, este trabalho teve por objetivos: (a) avaliar o potencial de uso do teor de N- $\text{NO}_3^-$  no solo como indicador complementar da disponibilidade de N no solo em milho, (b) determinar o nível crítico de N- $\text{NO}_3^-$  e o melhor estágio de desenvolvimento da cultura para sua avaliação no solo e (c) verificar se o uso do teor de N- $\text{NH}_4^+$  no solo, em adição ao teor de N- $\text{NO}_3^-$ , aumenta a acurácia da predição da disponibilidade de N no solo para a cultura do milho.

## MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi baseada em experimento realizado em campo, nos anos agrícolas 2002/03 e 2003/04, na Estação Experimental Agronômica (altitude de 46 m) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA-UFRGS), região ecoclimática da Depressão Central, Eldorado do Sul, RS. O solo da área experimental é um Argissolo Vermelho (Embrapa, 1999). Como o Departamento de Plantas de Lavoura realiza rotação de áreas para evitar problemas relacionados ao monocultivo, o experimento foi realizado nos dois anos agrícolas em áreas distintas. No ano de 2002/03, o solo apresentou as seguintes características: argila: 290 g  $\text{kg}^{-1}$ ; pH (água): 5,4; índice SMP: 5,9; P Mehlich-1: 9,4 mg  $\text{dm}^{-3}$ ; K: 105 mg  $\text{L}^{-1}$ ; MOS: 25 g  $\text{kg}^{-1}$  e CTC: 7,6  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ . No ano de 2003/04, os resultados foram: argila: 380 g  $\text{kg}^{-1}$ ; pH (água): 5,3; índice SMP: 6,2; P Mehlich-1: 5,6 mg  $\text{dm}^{-3}$ ; K: 161 mg  $\text{dm}^{-3}$ ; MO: 25 g  $\text{kg}^{-1}$  e CTC: 8,1  $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ , sendo todas as análises realizadas segundo procedimentos descritos em Tedesco et al. (1995).

Os tratamentos experimentais constaram da utilização de cinco doses de N na forma de uréia (0, 50, 100, 200 e 300  $\text{kg ha}^{-1}$ ), aplicadas parte na semeadura (20 %) e o restante no estádio V3 (três folhas expandidas, segundo Ritchie et al., 1993). O experimento foi disposto em blocos casualizados, com quatro repetições. O híbrido simples Pioneer 32R21, de ciclo superprecoce, foi semeado no primeiro ano em 15/10/2002 e, no segundo, em 27/10/2003, no espaçamento entre linhas de 0,7 m e na densidade de 65.000 sementes  $\text{ha}^{-1}$ , sobre os resíduos de aveia-preta (3,4 t  $\text{ha}^{-1}$  de matéria seca em 2002/03 e 5,2 t  $\text{ha}^{-1}$  de matéria seca em 2003/04), em plantio direto. Em ambos os anos agrícolas a adubação com P e K foi

realizada mecanicamente em linha, por ocasião da semeadura, tendo sido aplicados 80 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O no primeiro ano e 105 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 150 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O no segundo ano. Nos dois anos, o experimento foi irrigado por aspersão, quando o potencial de água no solo foi inferior a -0,04 MPa. Foi realizado controle químico de plantas daninhas (estádio V3) e pragas (estádios V3 e V6), para que não interferissem no crescimento e na expressão do efeito das doses de N aplicadas no rendimento de grãos de milho.

As determinações realizadas nos dois anos agrícolas foram teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e de N mineral (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) no solo e rendimento de grãos de milho. No primeiro ano, as características de solo foram avaliadas em quatro estádios de desenvolvimento do milho (V3 – três folhas expandidas, V6 – seis folhas expandidas, V10 – 10 folhas expandidas e espigamento), segundo escala proposta por Ritchie et al. (1993). No segundo ano, em função dos resultados obtidos no primeiro ano (Quadros 1 e 2), essas características foram avaliadas somente nos estádios V3 e V6.

Os teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no solo foram determinados em amostra composta, formada pela mistura de três subamostras de solo na camada de 0–30 cm de profundidade, por parcela (quatro linhas de 7 m), coletadas nas entrelinhas do milho com trado

calador. Nos estádios V3 e V6, nos dois anos agrícolas, as amostras de solo foram colocadas imediatamente após a coleta em béquer com 150 mL de KCl 1 mol L<sup>-1</sup>. Nos estádios V10 e espigamento, as amostras foram colocadas em sacos plásticos em caixa de isopor com gelo, sendo levadas ao laboratório e, em seguida, colocadas em béquer com 150 mL de KCl 1 mol L<sup>-1</sup>. Depois disso, em ambos os casos, as amostras foram agitadas por 30 min e deixadas decantar por mais 30 min. Posteriormente, foi coletado o sobrenadante e determinados os teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no solo, seguindo os procedimentos descritos por Tedesco et al (1995). O teor de N mineral foi obtido pela soma dos teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> e de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no solo. O rendimento de grãos foi avaliado a partir da colheita de uma área útil de 8,4 m<sup>2</sup> (duas linhas centrais de 6 m) da parcela, sendo expresso numa umidade de 130 g kg<sup>-1</sup>.

Os indicadores de solo e o rendimento de grãos do milho foram submetidos à análise de variância pelo teste F a 5 %, bem como às análises de correlação e de regressão. Além disso, foi aplicada a análise gráfica proposta por Cate & Nelson (1987), modificada por Fox et al. (2001), para determinação do nível crítico de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no solo no estágio V6. A dose de N a ser aplicada para cada unidade de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> menor que a do nível crítico foi determinada de acordo com o procedimento descrito por Feibo et al. (1998).

**Quadro 1. Teores médios de nitrato (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), amônio (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e de N mineral (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) no solo em diferentes estádios de desenvolvimento (M) e rendimento do milho, respectivos coeficientes de variação (CV) e significância do efeito das doses de N aplicadas (N), em dois anos agrícolas**

Característica avaliada	Estádio de desenvolvimento <sup>(1)</sup>											
	V3			V6			V10			Espigamento		
	M	CV	N <sup>(2)</sup>	M	CV	N	M	CV	N	M	CV	N
		%			%			%			%	
	Ano agrícola 2002/03											
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> no solo (mg kg <sup>-1</sup> )	8,15	11,5	**	17,94	11,4	**	20,00	28,3	ns	20,50	10,5	ns
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> no solo (mg kg <sup>-1</sup> )	11,54	22,9	ns	21,63	10,8	**	12,71	37,4	ns	13,80	25,6	ns
N mineral no solo (mg kg <sup>-1</sup> )	19,59	15,6	**	39,57	8,2	**	32,70	20,8	*	34,30	10,4	*
Rendimento de grãos (t ha <sup>-1</sup> )	8,08	10,7	**									
	Ano agrícola 2003/04											
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> no solo (mg kg <sup>-1</sup> )	8,65	19,9	ns	12,75	16,3	**	-	-	-	-	-	-
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> no solo (mg kg <sup>-1</sup> )	8,21	27,8	ns	14,22	38,7	*	-	-	-	-	-	-
N mineral no solo (mg kg <sup>-1</sup> )	16,87	19,5	ns	26,96	26,9	*	-	-	-	-	-	-
Rendimento de grãos (t ha <sup>-1</sup> )	7,39	15,8	*									

<sup>(1)</sup> Segundo escala proposta por Ritchie et al. (1993). <sup>(2)</sup> Fonte de variação: doses de N.

\* e \*\*: significativos a 5 e 1 % pelo teste F, respectivamente. ns: não-significativo a 5 %.

**Quadro 2. Coeficientes de correlação entre o rendimento de grãos do milho e os teores de nitrato (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), de amônio (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e de N mineral (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) no solo, por estágio de desenvolvimento, em dois anos agrícolas**

Estádio de desenvolvimento <sup>(1)</sup>	Ano agrícola	Característica de solo (mg kg <sup>-1</sup> )		
		Teor de N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Teor de N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Teor de N mineral
Coeficiente de correlação (r)				
V3	2002/03	0,47*	0,32 ns	0,41 ns
	2003/04	0,42 ns	0,42 ns	0,47 *
V6	2002/03	0,57**	0,70**	0,69**
	2003/04	0,71 **	0,70**	0,74**
V10	2002/03	- 0,29 ns	- 0,22 ns	- 0,33 ns
	2003/04	-	-	-
Espigamento	2002/03	- 0,12 ns	0,08 ns	0,0008 ns
	2003/04	-	-	-

<sup>(1)</sup> Segundo escala proposta por Ritchie et al. (1993). \*\* e \*: Significativos a 1 e 5 % e ns: não-significativo a 5 %.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

O rendimento de grãos do milho foi afetado pelas doses de N aplicadas nos dois anos de cultivo, apresentando média de 8,0 t ha<sup>-1</sup> em 2002/03 e de 7,4 t ha<sup>-1</sup> em 2003/04 (Quadro 1), as quais podem ser consideradas altas se comparadas com o rendimento médio obtido pelos produtores no RS. Os teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e de N mineral (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>+N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) no solo foram responsivos às doses de N aplicadas, sendo a variação nos seus teores dependente do ano e do estágio de desenvolvimento em que foram avaliados. No primeiro ano, foram afetados significativamente o teor de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no solo nos estádios V3 e V6, o teor de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no estágio V6 e o teor de N mineral nos quatro estádios avaliados. No segundo ano, em razão de os resultados obtidos no primeiro ano não terem mostrado boas relações dos indicadores de solo avaliados nos estádios V10 e espigamento com o rendimento de grãos, as avaliações restringiram-se aos estádios V3 e V6. Neste ano, todos os três indicadores de solo foram sensíveis em relação às doses de N aplicadas somente no estágio V6.

A fim de verificar a relação entre os indicadores de solo e o rendimento de grãos de milho, foram realizadas as análises de correlação e de regressão simples (Quadros 2 e 3). Verificou-se que os teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e de N mineral no solo apresentaram maiores correlações com rendimento de grãos nos estádios V3 e V6, com destaque para este último estágio (Quadro 2). Por outro lado, esses indicadores, quando avaliados nos estádios V10 e espigamento, não mostraram relação com o rendimento de grãos. Em razão disso, as análises de regressão dessas características com rendimento de grãos foram

restringidas para os estádios V3 e V6 (Quadro 3), tendo sido verificada resposta quadrática do rendimento de grãos em relação aos teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e N mineral avaliados no estágio V6, bem como que as relações obtidas neste estágio foram bem superiores às do estágio V3 nos dois anos de estudo. Esses resultados evidenciam que a melhor época para determinação dos teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e de N mineral, para predição da disponibilidade de N no solo, foi no estágio V6.

O uso do teor de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> conjuntamente com o de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, formando o N mineral, de maneira geral, apresentou maior relação com rendimento de grãos que o teor de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Quadros 2 e 3). Isso indica que haveria maior acurácia na predição da disponibilidade de N no solo usando o teor de N mineral (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) que somente o teor de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Esses resultados diferem dos obtidos por Rozas et al. (2000) em trabalho desenvolvido na Argentina, no qual os autores observaram que a inclusão do teor de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> não aumentou significativamente a confiabilidade dos resultados. No entanto, em condições de intensa precipitação pluvial e em solos que receberam esterco animal ou fonte de N amoniacal, a avaliação do N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> também pode ser útil (Binford et al., 1992; Schmitt & Randall, 1994).

Apesar de os resultados demonstrarem que se justificaria a determinação do teor de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> juntamente ao de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> para predição da disponibilidade de N no solo, a exequibilidade disso atualmente é baixa, pois não são disponíveis kits para avaliação de N mineral no solo. Com base nisso, estimou-se apenas o nível crítico de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no solo no estágio V6, bem como a dose de N a ser aplicada para cada unidade de teor de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> abaixo do nível crítico.

O nível crítico de  $N-NO_3^-$  no solo foi determinado graficamente (Figura 1), a partir da relação entre o teor deste elemento no solo no estágio V6 e o rendimento de grãos relativo do milho, segundo os procedimentos estabelecidos por Cate & Nelson (1987) e modificados por Fox et al. (2001). Assim, considerando como valor crítico horizontal o rendimento relativo de 0,93 e definindo-se o valor crítico vertical de modo a minimizar os erros ou *outliers*, estimou-se o valor crítico de  $20 \text{ mg kg}^{-1}$ , a partir do qual a resposta à aplicação de N é pouco provável. De acordo com a análise gráfica, os dados que se encontram no quadrante superior esquerdo superestimaram a necessidade de N, ou seja, indicaram que havia necessidade de N quando, na verdade, havia N suficiente para atingir o rendimento máximo. Já os dados que se encontram no quadrante inferior direito subestimaram a necessidade de N, ou seja, indicaram que não havia necessidade de N quando, de fato, o N era insuficiente para atingir o rendimento máximo.

O nível crítico de  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $N-NO_3^-$  no solo encontra-se dentro da faixa de 15 a  $30 \text{ mg kg}^{-1}$  encontrada na literatura, cujo valor varia com a profundidade de amostragem, entre outros fatores (Rambo et al., 2004). Normalmente, menores valores são obtidos quando profundidades maiores de solo são amostradas, ocorrendo o contrário quando se amostram camadas menores (Rambo et al., 2004).

Com o objetivo de verificar a possibilidade de estabelecer doses de N em cobertura a partir dos teores de N mineral no solo, foram estabelecidas relações entre doses de N aplicadas e teor de  $N-NO_3^-$  no solo, no estágio V6 do milho, nos dois anos agrícolas. Como o coeficiente angular foi o mesmo nos dois anos agrícolas, também foi estabelecida essa relação utilizando os dados obtidos nos dois anos conjuntamente (Quadro 4).

Empregando a equação entre doses de N aplicadas e teor de  $N-NO_3^-$  no solo e nível crítico obtidos, seguindo o método usado por Feibo et al. (1998),

**Quadro 3. Equações de regressão e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre rendimento de grãos do milho e os teores ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) de nitrato ( $N-NO_3^-$ ), de amônio ( $N-NH_4^+$ ) e de N mineral ( $N-NO_3^- + N-NH_4^+$ ), em dois anos agrícolas**

Característica de solo	Ano agrícola	Estádio de desenvolvimento <sup>(1)</sup>			
		V3		V6	
		Equação de regressão	$R^2$	Equação de regressão	$R^2$
Teor de $N-NO_3^-$	2002/03	$\hat{Y} = 2542 + 699,74x$	0,22*	$\hat{Y} = -27699 + 3713,60x - 93,59x^2$	0,40**
	2003/04	$\hat{Y} = 2465 + 568,98x$	0,14 ns	$\hat{Y} = 5145 + 1383,62x - 29,44x^2$	0,51**
Teor de $N-NH_4^+$	2002/03	$\hat{Y} = 4979 + 268,62x$	0,10 ns	$\hat{Y} = -6513 + 807,29x - 5,99x^2$	0,49**
	2003/04	$\hat{Y} = 3629 + 457,64x$	0,16 ns	$\hat{Y} = 43,57 + 741,95x - 13,00x^2$	0,53**
Teor de N mineral	2002/03	$\hat{Y} = 3353 + 240,06x$	0,17 ns	$\hat{Y} = -4427 + 304,67x + 0,28x^2$	0,48**
	2003/04	$\hat{Y} = 2045 + 316,78x$	0,19 ns	$\hat{Y} = -1640 + 456,38x - 4,01x^2$	0,56**

<sup>(1)</sup> Segundo escala proposta por Ritchie et al. (1993). Número de amostras por estágio de desenvolvimento = 20.

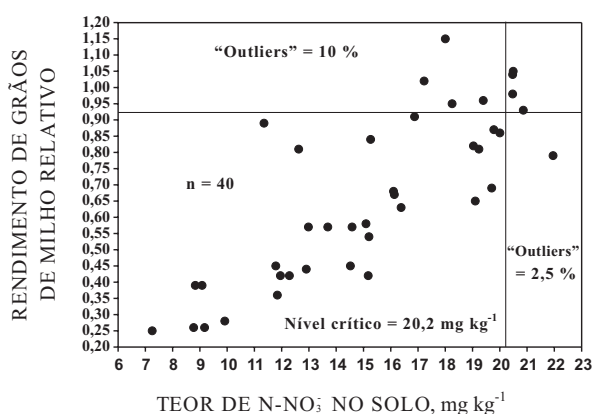
\*\* e \*: Significativos a 1 e 5 % e ns: não-significativo a 5 %.

**Quadro 4. Equações de regressão e coeficientes de determinação ( $R^2$ ) entre os teores de nitrato ( $N-NO_3^-$ ) no solo ( $y$ ,  $\text{mg kg}^{-1}$ ) e níveis de N aplicados ( $x$ ,  $\text{kg ha}^{-1}$ ) no estágio V6 do milho, em dois anos agrícolas, e na análise conjunta dos anos**

Ano agrícola	Equação de regressão	$R^2$	N <sup>(1)</sup>
2002/03	$\hat{Y} = 15,95 + 0,02x$	0,35**	20
2003/04	$\hat{Y} = 9,82 + 0,02x$	0,54**	20
Conjunta	$\hat{Y} = 12,89 + 0,02x$	0,26**	40

<sup>(1)</sup> Numero de amostras. \*\* Significativo a 1 %.

calculou-se a dose de N a ser aplicada para cada unidade de  $\text{N-NO}_3^-$  no solo abaixo do nível crítico. Inicialmente, foi calculada a dose de N para atingir o rendimento máximo de grãos, utilizando a equação conjunta (Quadro 4) e o nível crítico de  $\text{N-NO}_3^-$  no solo igual a  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  (Figura 1), obtendo-se a dose de  $365 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. Posteriormente, fez-se esse mesmo cálculo usando o valor de  $19 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $\text{N-NO}_3^-$  no solo (uma unidade menor que a do nível crítico, obtendo-se o valor de  $315 \text{ kg ha}^{-1}$  de N). Então, por diferença, pressupõe-se que, de acordo com esse método, seria necessária a aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  para cada unidade de teor de  $\text{N-NO}_3^-$  no solo, medido no estágio V6, menor do que o do nível crítico, não havendo necessidade de aplicação de N quando o valor obtido for superior ao do nível crítico. No entanto, salienta-se que há necessidade de validação deste método em outros ambientes para sua utilização em campo, principalmente no que se refere à dose obtida.



**Figura 1. Determinação gráfica do nível crítico de nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ) no solo, a partir da relação entre o teor de  $\text{N-NO}_3^-$  no solo e o rendimento relativo de grãos do milho.**

O uso do TPNC como índice quantitativo da necessidade de adubação nitrogenada em cobertura em milho tem sido observado com sucesso nos Estados da Pensilvânia, Iowa e Vermont, nos Estados Unidos (Bundy & Meisinger, 1994; Andraski & Bundy, 2002). Já, em alguns casos, o seu uso como índice quantitativo tem sido comprometido, principalmente em razão da variabilidade na relação entre o teste e o rendimento relativo (Fox et al., 1989; Heckman et al., 1996). Devido a esses diferentes resultados, Bundy & Meisinger (1994) recomendam que a adoção do TPNC sob o aspecto quantitativo deve ser avaliada em nível regional, não havendo perspectiva de que o uso deste teste de forma isolada seja eficiente para determinação da dose de N a ser aplicada, necessitando, portanto, de integração com outras características de solo e, ou, de planta.

## CONCLUSÕES

1. O teor de  $\text{N-NO}_3^-$  no solo tem potencial para ser utilizado como indicador complementar da disponibilidade de N no solo em milho.
2. A melhor época para determinação do teor de  $\text{N-NO}_3^-$  no solo como indicador do nível de N no solo é no estágio V6.
3. O nível crítico do teor de  $\text{N-NO}_3^-$  no solo foi de  $20 \text{ mg kg}^{-1}$  para o ambiente estudado.
4. A utilização do teor de  $\text{N-NH}_4^+$ , em adição ao teor de  $\text{N-NO}_3^-$ , aumenta a acurácia da predição da disponibilidade de N no solo para manejo da adubação nitrogenada em milho nas condições ambientais avaliadas, evidenciando a necessidade de desenvolvimento de kits de determinação rápida do teor de N mineral no solo.

## LITERATURA CITADA

- ADDISCTOTT, T.M. Tillage, mineralization and leaching – foreword. *Soil Till. Res.*, 53:163-165, 2000.
- 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 de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:241-248, 2002.
- ANDRASKI, T.W. & BUNDY, L.G. Using the pre-side dress soil nitrate test and organic nitrogen crediting to improve corn nitrogen recommendations. *Agron. J.*, 94:1411-1418, 2002.
- ANDRASKI, T.W.; BUNDY, L.G. & BRYE, K.R. Crop management and corn nitrogen rate effects on nitrate leaching. *J. Environ. Quality*, 29:1095-1103, 2000.
- ARGENTA, G. Monitoramento do nível de nitrogênio na planta como indicador da adubação nitrogenada em milho. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 112p (Tese de Doutorado)
- BINFORD, G.D.; BLACKMER, A.M. & CERRATO, M.E. Relationships between corn yields and soil nitrate in late spring. *Agron. J.*, 84:53-59, 1992.
- BUNDY, L.G. & MEISINGER, J.J. Nitrogen availability indices. In: WEAVER, R.W., ed. *Methods of soil analysis. Part 2. Microbiological and biochemical properties*. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p.951-984.
- CATE, R.B. & NELSON, L.A. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 35:658-660, 1987.
- CERETTA, C.A.; DURIGON, R.; BASSO, C.J.; BARCELLOS, L.A.R. & VIEIRA, F.C.B. Características químicas de solo sob aplicação de esterco líquido de suínos em pastagem natural. *Pesq. Agropec. Bras.*, 38:729-735, 2003.
- DYNIA, J.F. & CAMARGO, O.A. Retenção de nitrato num solo de carga variável, influenciada por adubação fosfatada e calagem. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:141-144, 1999.

- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Embrapa Produção da Informação; Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 1999. 412p.
- FEIBO, W.; LIANGHUAN, W. & FUHUA, X. Chlorophyll meter to predict nitrogen sidedress requirements for short-season cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Field Crop Res.*, 56:309-314, 1998.
- FOX, R.H.; PIEKIELEC, W.P. & MACNEAL, K.E. Comparison of late-season diagnostic tests for predicting nitrogen status of corn. *Agron. J.*, 93:590-597, 2001.
- FOX, R.H.; ROTH, G.W.; IVERSEN, K.V. & PIEKIELEK, W.P. Soil and tissue tests compared for predicting soil nitrogen availability to corn. *Agron. J.*, 81:971-974, 1989.
- HECKMAN, J.R.; GOVINDASAMY, R.; PROSTAK, D.J.; CHAMBERLAIN, E.A.; HLUBIK, W.T.; MICKEL, R.C. & PROSTKO, E.P. Corn response to side dress nitrogen in relation to soil nitrate concentration. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 27:575-583, 1996.
- MA, B.L. & DWYER, L.M. Within plot variability in available soil mineral nitrogen in relation to leaf greenness and yield. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 30:1919-1928, 1999.
- MAGDOFF, F. Understanding the Magdoff presidress nitrate test for corn. *J. Produc. Agric.*, 3:297-305, 1991.
- PORT, O.; AITA, C. & GIACOMINI, S.J. Perda de nitrogênio por volatilização de amônia com o uso de dejetos de suínos em plantio direto. *Pesq. Agropec. Bras.*, 38:857-865, 2003.
- RAMBO, L. Integração de características de planta, de dossel e de solo para maior eficiência da adubação nitrogenada em cobertura em milho. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 176p. (Tese de Doutorado)
- RAMBO, L.; SILVA, P.R.F.; ARGENTA, G. & BAYER, C. Testes de nitrato no solo como indicadores complementares no manejo da adubação nitrogenada em milho. *Ci. Rural*, 34:1279-1287, 2004.
- RANDALL, G. & MULLA, D.J. Nitrate nitrogen in surface waters as influenced by climatic conditions and agriculture practices. *Agron. J.*, 30:337-344, 2001.
- RAUN, W.R. & JOHNSON, G.V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agron. J.*, 91:357-363, 1999.
- RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J. & BENSON, G.O. How a corn plant develops? Ames, Iowa State University of Science and Technology, 1993. (Cooperative Extension Service. Special Report, 48)
- ROTH, G.W.; BEEGLE, D.B. & BOHN, P.J. Field evaluation of a presidress soil nitrate test and quick test for corn in Pennsylvania. *J. Produc. Agric.*, 5:476-481, 1992.
- ROZAS, H.S.; ECHEVERRÍA, H.E.; STUDDERT, G.A. & DOMÍNGUEZ, G. Evaluation of the presidress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. *Agron. J.*, 92:1176-1183, 2000.
- SCHMITT, M.A. & RANDALL, G.W. Developing a soil nitrogen test for improved recommendations for corn. *J. Produc. Agric.*, 7:328-334, 1994.
- SCHRÖDER, J.J.; NEETESON, J.J.; OENEMA, O. & STRUIK, P.C. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of art. *Field Crops Res.*, 66:151-164, 2000.
- SIMS, J.T.; VASILAS, B.L.; GARTLEY, K.L.; MILIKEN, B. & GREEN, V. Evaluation of soil and plant nitrogen tests for maize on manured soils of the Atlantic coastal plain. *Agron. J.*, 87:213-222, 1995.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; VOLKWEISS, S.J. & BOHNEN, H. Análises de solo, plantas e outros materiais. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.
- VANOTTI, M.B. & BUNDY, L.G. An alternative rationale for corn nitrogen fertilizer recommendations. *J. Produc. Agric.*, 7:243-249, 1994.