

Testes de nitrato no solo como indicadores complementares no manejo da adubação nitrogenada em milho

Soil nitrate tests as complementary indices for management of corn nitrogen application

Lisandro Rambo¹ Paulo Regis Ferreira da Silva²
Gilber Argenta³ Cimelio Bayer⁴

- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -

RESUMO

A recomendação de nitrogênio (N) para a cultura do milho teve um avanço expressivo recentemente na região Sul do Brasil, quando passou a considerar a cultura anterior em adição ao teor de matéria orgânica do solo e a expectativa do rendimento de grãos. A busca de otimização do sistema de recomendação é constante e, nesse sentido, há grande potencial da inclusão de parâmetros de solo e de planta como indicadores complementares da disponibilidade de N no solo, principalmente em sistemas altamente produtivos e com aplicação de altas doses de N. Dentre os parâmetros de solo destacam-se os testes de nitrato, os quais indicam a quantidade de N disponível e são denominados testes de intensidade. Em função da época de realização, os testes de nitrato podem ser divididos basicamente em (i) teste de pré-plantio – TPS (“preplant soil nitrate test” – PPNT), (ii) teste de pré-aplicação de N em cobertura – TPNC (“pre-sidedress soil nitrate test” – PSNT), e (iii) teste de pós-colheita – TPC (“post-harvest soil nitrate test” – PHNT). Dentre estes testes, destaca-se o TPNC, o qual tem sido mais estudado e difundido, principalmente nos EUA, pois permite avaliar a variação da disponibilidade de N do solo durante o ciclo da cultura, possibilitando o manejo da adubação nitrogenada em situações específicas. Esta revisão visa abordar o potencial dos testes de nitrato na avaliação da disponibilidade de N no decorrer do ciclo do milho e sua utilização na predição da necessidade de N a ser suplementado. A hipótese é de que a utilização dos testes de nitrato resultem em maior flexibilidade no manejo da adubação nitrogenada em milho.

Palavras-chave: *Zea mays*, matéria orgânica, predição da adubação nitrogenada.

ABSTRACT

Recently, nitrogen fertilization recommendation has had an expressive advance in Southern Brazil, when it began to take into account the contribution of the previous cover crop for the soil nitrogen (N) availability, in addition to organic matter and yield goal. Improvement of N management is constantly aimed. In this respect, there is a high potential to include soil and plant parameters as complementary indicators of soil N level, mainly in high yield systems and with high rates of N application. Within the soil parameters considered, one of the most important is the nitrate tests, which represent the readily available N and are known as intensity tests. According to the time of soil sampling, nitrate tests can be classified as: preplant soil nitrate test (PPNT), pre-sidedress soil nitrate test (PSNT), and post-harvest soil nitrate test (PHNT). Within these tests, one of the most important is the TPNC, which have been more studied and used, mainly in the EUA, because it allows the evaluation of the soil N availability during the crop development. It makes possible the management of nitrogen fertilization in specific situations. This review has the purpose of discussing the potential use of soil nitrate tests to evaluate N availability during crop development and to predict N requirements in maize. The hypothesis is that nitrate tests utilization result in higher flexibility of N fertilization management in this crop.

Key words: *Zea mays*, organic matter, prediction of nitrogen fertilization.

¹Engenheiro Agrônomo, MSc., Doutorando do Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Departamento de Plantas de Lavoura, Av. Bento Gonçalves, 7712, 91501-970, Porto Alegre, RS. Bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). E-mail: lisandro@vortex.ufrgs.br - Autor para correspondência.

²Engenheiro Agrônomo, PhD., Professor Adjunto, Departamento de Plantas de Lavoura, Faculdade de Agronomia, UFRGS. Pesquisador do CNPq.

³Engenheiro Agrônomo, Doutor, Empresa Syngenta Seeds.

⁴Engenheiro Agrônomo, Doutor, Professor Adjunto, Departamento de Solos, Faculdade de Agronomia, UFRGS. Pesquisador do CNPq.

INTRODUÇÃO

A eficiência do uso do nitrogênio (N) em cereais no mundo é de apenas 33%. Considerando os 67% de N que não são aproveitados, tem-se uma perda anual de 15,9 bilhões de dólares em fertilização nitrogenada (RAUN & JOHNSON, 1999), em adição aos prováveis impactos negativos ao ambiente (SCHRÖDER et al., 2000). A quantidade de N aplicado tem aumentado rapidamente nas últimas décadas ao nível global. Dentre as conseqüências deste aumento, estão a elevação das perdas de nitrato do solo para os lençóis freáticos e para os sistemas marinhos, bem como dos gases que contém N para a atmosfera (MATSON et al., 1998).

Sistemas de manejo da adubação nitrogenada devem visar à maximização dos lucros, reduzir a susceptibilidade das plantas a pragas e moléstias, otimizar a qualidade de grãos, poupar energia e proteger o ambiente. De forma mais simplificada, STANFORD (1973) e KEENEY (1982) definem o manejo ideal da adubação nitrogenada como sendo aquele que permite satisfazer a necessidade da cultura com o mínimo de risco ambiental.

A alta mobilidade do nitrato no solo justifica a preocupação em relação ao manejo da adubação nitrogenada em solos agrícolas (VANOTTI & BUNDY, 1994). A lixiviação de nitrato é um fenômeno físico, favorecido pela baixa energia envolvida na sua adsorção às partículas do solo e também pela sua alta solubilidade em água (CERETTA, 1997). Este íon pode ser carregado pela água de percolação, resultando em perdas deste nutriente e contaminação do lençol freático e de cursos d'água (DYNIA & CAMARGO, 1999).

O potencial de contaminação ambiental pela lixiviação do nitrato tem motivado pesquisas de caráter agro-ecológico no mundo inteiro a partir da década de 80. Nos países do Reino Unido, o aumento do teor de nitrato na água causou grande discussão sobre os seus efeitos na saúde e no ambiente, estimulando um grande programa de pesquisa. Tendências similares alavancaram a pesquisa na Europa e na América do Norte (ADDISCTOTT, 2000). Particularmente nos Estados Unidos da América, algumas pesquisas têm sugerido relação entre a diminuição da quantidade de oxigênio na área do Golfo do México (área de hipoxia) e as perdas de N da parte agrícola na bacia do rio Mississipi, uma área que compreende mais de 30 estados (ANDRASKI et

al., 2000). No Brasil, as menores doses de N aplicadas podem explicar, ao menos em parte, a menor preocupação na avaliação dos impactos da fertilização nitrogenada no ambiente. Entretanto, o aumento das doses de N em sistemas altamente produtivos, e o uso de fertilizantes nitrogenados associados com plantas de cobertura leguminosas e ou dejetos animais merecem atenção quanto ao seu impacto no ambiente (CERETTA et al., 2003; PORT et al., 2003), especialmente a contaminação das águas pela lixiviação de nitrato (RANDALL & MULLA, 2001).

No Sul do Brasil, especificamente nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, a recomendação de adubação nitrogenada em milho apresentou melhoria expressiva recentemente. A nova recomendação passou a considerar a cultura anterior ao milho (N mineralizado ou N imobilizado), em adição ao teor de matéria orgânica do solo e à expectativa de rendimento de grãos (AMADO et al., 2002). Considerando o sistema de recomendação como em constante aperfeiçoamento, uma melhoria potencial é a inclusão de parâmetros complementares de solo e de planta que permitam o monitoramento da disponibilidade deste nutriente durante o ciclo da cultura visando maior precisão das doses recomendadas bem como maior flexibilidade do manejo do N na cultura do milho (ARGENTA, 2001). Neste sentido, esta revisão tem por objetivo apresentar e discutir o potencial de testes de nitrato no solo como indicadores complementares da disponibilidade de N no solo visando à tomada de decisão sobre o manejo da adubação nitrogenada em milho.

NITROGÊNIO MINERAL NO SOLO E A SUA DEMANDA PELA PLANTA DE MILHO

No Brasil, a matéria orgânica vem sendo utilizada em alguns estados como principal parâmetro indicativo da liberação do nitrogênio pelo solo durante a estação de cultivo, pois fornece uma estimativa indireta do solo de fornecer N. A utilização do teor de matéria orgânica e, mais recentemente, da cultura anterior como critérios indicativos da disponibilidade potencial de N do solo (AMADO et al., 2002) está fundamentada na premissa de que o N presente na matéria orgânica e na fitomassa das culturas irá ser mineralizado em tempo hábil para ser absorvido pelas plantas (AMADO, 1997).

Entretanto, fatores de solo e de clima afetam a mineralização do N presente na matéria orgânica e nos resíduos vegetais. A acidez do solo (pH), a textura e a mineralogia, entre outros, são parâmetros de solo que podem afetar a taxa de decomposição da matéria

orgânica e de resíduos culturais (STEVENSON, 1994; BAYER, 1996). Em regiões de clima úmido, a temperatura é o fator climático mais determinante da taxa de mineralização do N orgânico, a qual varia na ordem de duas vezes para uma variação de 10°C (JENKINSON & AYANABA, 1977). Desta forma, variações destes parâmetros podem determinar que o uso isolado do teor de matéria orgânica do solo e da cultura anterior não seja adequado na avaliação da disponibilidade real de N às plantas (POTTKER & ROMAN, 1994). Desta forma, pode ser benéfica a inclusão de testes complementares de nitrato como critérios do manejo do N em milho.

Outro fator importante a ser considerado visando otimizar a recomendação da adubação nitrogenada é a busca de sincronia entre a época de aplicação e os estádios de maior necessidade de N pela planta, aumentando a eficiência de uso do N (EUN). Nesse sentido, COELHO et al. (1992) enfatizam a importância de se ajustar as aplicações de fertilizantes nitrogenados para o mais próximo possível da quantidade requerida pela cultura. Existem vários fatores que contribuem para a obtenção de baixa EUN, dentre estes está o não parcelamento das doses de N em cobertura (RAUN & JOHNSON, 1999). Segundo BINDER et al. (2000), a época ótima para aplicação de N depende do grau de deficiência deste nutriente, que se dá em função da quantidade de N disponibilizada pelo solo e da demanda do milho. Sistemas de manejo da adubação nitrogenada que são flexíveis e que podem ser modificados para compensar as condições climáticas, têm potencial para serem mais eficientes (BLACKMER & SCHEPERS, 1994).

A absorção de N pela planta de milho ocorre durante todo o período vegetativo, sendo pequena nos primeiros 30 dias (FORNASIERI FILHO, 1992). No entanto, no período vegetativo a deficiência de N reduz o número de espiguetas nos primórdios da espiga (SCHREIBER et al., 1988) e o crescimento e o desenvolvimento da planta (VARVEL et al., 1997). Segundo YAMADA (1996), apesar da pequena exigência de N da planta de milho nos estádios iniciais, altas concentrações desse nutriente na zona radicular são benéficas para um bom desenvolvimento inicial da planta. Nesta fase inicial, está ocorrendo a diferenciação das várias partes da planta que começam a se desenvolver (FANCELLI & DOURADO-NETO, 1996; CANTARELLA, 1993). Desta forma, quando a disponibilidade inicial de N no solo for baixa, é necessário aplicar N mesmo no período em que o milho tem menor demanda (até o estádio V6) para assegurar o potencial de rendimento desta cultura (BINDER et al., 2000).

A partir do estádio de seis a sete folhas, a planta apresenta um sistema radicular mais desenvolvido e maior capacidade de absorção de nutrientes. Neste estádio, quando a planta termina de diferenciar o número total de folhas, ocorre uma mudança rápida e brusca na função do ponto de crescimento, que se diferencia num minúsculo pendão. Deste estádio em diante, os entre-nós começam a alongar rapidamente e a planta desenvolve-se a taxas muito elevadas, sendo que a diferenciação do primórdio da espiga ocorre quando ela está com 10 a 12 folhas expandidas. Este é um estádio crítico, uma vez que está sendo formado o número potencial de espiguetas da espiga (SILVA, 2001). Assim, considerando a importância da disponibilidade adequada de N durante este período, é recomendado a aplicação de nitrogênio no estádio de seis a sete folhas expandidas. No entanto, de acordo com BINDER et al. (2000), quanto maior for a deficiência de N, mais cedo se deve aplicar o nitrogênio em cobertura para se obter a menor redução no rendimento de grãos. Por outro lado, apesar não ser a época ideal, pode-se obter aumento no rendimento de grãos com aplicações de nitrogênio tardias. Nesse sentido, COSER (2003) observou resposta positiva no rendimento de grãos à aplicação de N no espigamento, sendo maior à medida que a deficiência de N no período vegetativo aumentou. Contudo, quando ocorre deficiência de N no período vegetativo, o potencial de rendimento do milho já foi comprometido e não será mais atingido.

Neste contexto, o conhecimento da disponibilidade de N mineral no solo durante o ciclo da cultura é muito importante para que se possa fazer a aplicação de N na época e na quantidade adequadas. No entanto, esta tarefa é complexa, pois existem vários fatores que interferem na disponibilidade de N liberado pelo solo, bem como na sua absorção e assimilação pela planta. O nitrogênio é absorvido nas raízes sob a forma de nitrato (NO_3^-) ou íon amônio (NH_4^+), sendo incorporado em aminoácidos na própria raiz ou na parte aérea da planta (BREDEMEIER & MUNDSTOCK, 2000). A utilização de fontes de N mineral (NO_3^- , NH_4^+) disponíveis no solo pelas plantas é determinada pelas condições ambientais e, particularmente, pelas condições do solo de disponibilizar estas duas formas. Nesse sentido, o NO_3^- é a forma de N mais disponível nos solos agrícolas aerados onde a nitrificação não é inibida (TEYKER et al., 1989; VON WIRÉN et al., 1997).

Assim, a absorção de NO_3^- é um evento inicial importante para acumulação de N na planta de milho. As plantas respondem ao nitrato, sendo que estas respostas se devem ao fato deste elemento servir como nutriente e como um sinal para as mesmas. Como

nutriente, o NO_3^- é reduzido a amônio e incorporado em aminoácidos (WANG et al., 2000). Pesquisas recentes mostram que os sinais derivados do NO_3^- estão envolvidos no desencadeamento de mudanças na expressão gênica, resultando na reprogramação do metabolismo do N e do carbono para facilitar a absorção e a assimilação deste íon. Os sinais derivados do NO_3^- , interno e externo, também ajustam o crescimento e a arquitetura de raízes de acordo com o estado fisiológico da planta e a sua distribuição no ambiente (STITT, 1999).

TESTES DE NITRATO NO SOLO

Dentre os parâmetros de solo utilizados como indicadores do nível de N no solo, o teor de N mineral, especialmente o nitrato, tem-se destacado. A utilização do nitrato se dá em função da disponibilidade de testes rápidos para sua determinação (ROTH et al., 1991; ROTH et al., 1992; SIMS et al., 1995), bem como grande proporção do N mineral estar sob forma de nitrato (BLACKMER et al., 1989; SIMS et al., 1995; MA & DWYER, 1999). No entanto, em solos que receberam esterco animal ou fonte de N amoniacal, a determinação do íon amônio também pode ser útil (BINFORD et al., 1992a; SCHMITT & RANDALL, 1994). Além disso, deve-se considerar que o íon nitrato é repelido pelas cargas negativas dos colóides, tendendo a permanecer em solução e podendo ser lixiviado pela água de percolação (DYNIA & CAMARGO, 1999). Desta forma, sob condições de alta precipitação pluvial a inclusão da determinação do íon amônio pode ser uma boa alternativa, visto que este íon pode ser adsorvido ao complexo de troca do solo ou nitrificado.

Os testes que fornecem ou indicam a quantidade de N mineral presente, que são denominados testes de intensidade, podem ser divididos basicamente em teste de pré-semeadura – TPS (“preplant soil nitrate test” – PPNT), teste de pré-aplicação de N em cobertura – TPNC (“pre-sidedress soil nitrate test” – PSNT) e teste de pós-colheita – TPC (“post-harvest soil nitrate test” – PHNT). Estes testes foram desenvolvidos inicialmente para regiões de clima árido, onde já vêm sendo utilizados há mais tempo. No entanto, foram desenvolvidas adaptações, como o TPNC e o TPC, para uso destes testes em regiões mais úmidas, onde as perdas por lixiviação de nitrato são maiores. Eles têm sido usados para detectar a variação da disponibilidade de N antes e durante o ciclo da cultura e prever as quantidades necessárias de N a serem suplementadas (VANOTTI & BUNDY,

1994), determinando uma maior flexibilidade no manejo da adubação nitrogenada. A variação da disponibilidade de N pode se dar por eventos meteorológicos como chuvas de grande volume e alterações no manejo da cultura e da adubação, entre outros, e tem grande influência na resposta do milho à aplicação de N (VANOTTI & BUNDY, 1994).

Teste de pré-semeadura (TPS)

O teste de pré-semeadura (TPS) é baseado na determinação de nitrato antes da semeadura do milho, buscando avaliar a disponibilidade de N mineral nesse momento, geralmente em profundidades de até 60 cm. Este teste pode ser usado em lavouras onde há monocultura de milho, auxiliando na tomada de decisão de quanto nitrogênio deve ser aplicado na semeadura (BUNDY & ANDRASKI, 1995; VANOTTI & BUNDY, 1994). A principal vantagem deste teste é que ele fornece uma medida direta, considerando a disponibilidade de N mineral na zona radicular da planta, não dependendo da liberação de N mineral das várias fontes do solo que, por sua vez, é influenciada pelas condições ambientais e de solo (BUNDY & MEISINGER, 1994).

No entanto, uma vez que as amostras são tomadas antes do início da estação de crescimento, este teste não reflete as contribuições de N de adições recentes de esterco animal e ou resíduos de leguminosas (BUNDY & ANDRASKI, 1995), bem como do N que será disponibilizado pela matéria orgânica durante a ontogenia do milho. Além disso, a eficiência deste teste pode ser comprometida pela lixiviação de nitrato durante o intervalo entre a retirada da amostra e o início da absorção de nutrientes pela cultura (BUNDY & MEISINGER, 1994). No Brasil, a utilização deste teste para predição da necessidade de N pode ser prejudicada em regiões úmidas, especialmente em solos arenosos, onde as perdas de N por lixiviação de nitrato podem ser intensificadas. Isto pode fazer com que o teste superestime a quantidade de N que estará disponível para a cultura, causando redução no rendimento de grãos. No entanto, segundo COELHO et al. (1991), a idéia generalizada de que em condições tropicais, em que geralmente se associam altas precipitações e solos com elevada permeabilidade, o que leva a uma baixa recuperação dos fertilizantes nitrogenados pelas culturas, devido ao alto potencial de perdas por lixiviação, não se aplica a todas as condições de solo, clima e culturas.

Teste de pós-colheita (TPC)

Outro tipo de teste é o de pós-colheita (TPC), que visa basicamente avaliar os efeitos do

manejo da adubação nitrogenada (BUNDY & ANDRASKI, 1993; SIMS et al., 1995), com ênfase na verificação de excessos de aplicação nitrogenada em cobertura. No entanto, deve-se considerar que a quantidade de nitrato disponível no final do ciclo não é apenas determinado pelo balanço entre o N aplicado e o absorvido, mas também pelas perdas que ocorrem durante o ciclo. Desta forma, nem sempre um baixo valor de nitrato encontrado após a colheita pode ser interpretado como evidência para adequado manejo do N (SCHRÖDER et al., 2000), assim como, nem sempre um alto teor deste íon no final do ciclo significa que houve excesso de aplicação de N, pois pode ter ocorrido a interferência de alguns fatores que alteraram negativamente a demanda e a capacidade de absorção de N pela planta durante sua ontogenia como, por exemplo, deficiência hídrica.

Teste de pré-aplicação da adubação nitrogenada em cobertura (TPNC)

Por fim, deve-se destacar o teste de pré-aplicação da adubação nitrogenada em cobertura (TPNC), que tem sido o mais estudado e difundido, principalmente nos Estados Unidos da América. Este teste determina a quantidade de nitrato que se encontra no solo até a profundidade de 30cm no estádio de seis folhas expandidas do milho. Porém, para se entender por que este tem sido considerado um parâmetro eficiente na predição da necessidade de adubação nitrogenada, é preciso compreender os seus princípios. Nesse sentido, os modelos de mineralização do N no solo, de absorção pela planta e lixiviação de nitrato ajudam a explicar como o TPNC estima o nível de suprimento de N do solo (MAGDOFF, 1991).

Devem ser considerados vários aspectos que possibilitam que este teste possa prever as necessidades de N pela cultura. Primeiramente, parte-se do princípio de que o nitrato presente no solo na época da amostragem (V6 - seis folhas expandidas) é o resultado da integração de todos os fatores climáticos, de manejo da cultura e adubação e de solo que influenciaram a disponibilidade de N até a coleta (MAGDOFF et al., 1984). Considera-se também que grande parte do N do solo é mineralizado até um pouco antes da época de amostragem, que a maioria do N disponível no solo deve estar presente próximo à zona radicular no início do rápido crescimento do milho (V6), para assegurar uma nutrição adequada e que o nível de N determinado pelo teste está correlacionado com o N total do solo que será disponibilizado pelo solo ao longo da ontogenia da planta (MAGDOFF, 1991).

Vários estudos têm sido realizados utilizando o TPNC, principalmente na definição de níveis críticos de nitrato no solo, acima dos quais a resposta à adubação nitrogenada é improvável. Os valores críticos encontrados variam de 15 a 30mg de nitrato por kg de solo, sendo que geralmente tem-se obtido os menores valores críticos quando a profundidade de amostragem excede os 30cm preconizados pelo teste. Esses estudos têm apresentado também boa correlação entre rendimento de grãos de milho e conteúdo de nitrato no solo no estádio de quatro a seis folhas expandidas. Isto se torna muito importante devido ao fato de que nesse estádio a maioria dos testes de planta não tem apresentado boas correlações com rendimento de grãos. Desta forma, o TPNC tem sido usado como uma ferramenta para indicar se há necessidade de aplicação de adubação nitrogenada em cobertura no estádio V6 na cultura do milho (FOX et al., 1989; BINDORD et al., 1992; KLAUSNER et al., 1993; HECKMAN et al., 1996; SPELLMAN et al., 1996; ROZAS et al., 2000), ou ainda, tem-se estudado a possibilidade de sua utilização para recomendações quantitativas da adubação de N em cobertura (BINDORD et al., 1992; KLAUSNER et al., 1993; SCHMITT & RANDALL, 1994).

O uso do TPNC como um índice quantitativo da necessidade de adubação nitrogenada em cobertura no milho tem proporcionado resultados variáveis. Por exemplo, nos estados da Pensilvânia, Iowa e Vermont (EUA), os valores obtidos abaixo do nível crítico dado pelo TPNC têm sido usados para estabelecer as recomendações de adubação nitrogenada (BUNDY & MEISINGER, 1994). Em trabalho mais recente, ANDRASKI & BUNDY (2002) observaram que a utilização do TPNC para fazer o ajuste das doses de adubação nitrogenada em milho, em áreas que tinham sido adubadas com esterco animal ou em sucessão a leguminosas, proporcionou maior retorno econômico que a recomendação tradicional, que não considerou as contribuições de N oriundas do esterco animal e das leguminosas. Já em alguns casos, a sua utilização como índice quantitativo foi comprometida, principalmente em função da variabilidade na relação entre o teste e o rendimento relativo (FOX et al., 1989, HECKMAN et al., 1996). Tendo em vista estas contradições, BUNDY & MEISINGER (1994) recomendam que a adoção do TPNC sob o aspecto quantitativo deve ser avaliada em nível estadual, pois esta abordagem envolve os seguintes pontos críticos: (i) dados atualizados de calibração de campo, (ii) filosofia de recomendação da adubação nitrogenada e (iii) sistemas alternativos de recomendação da adubação nitrogenada. Portanto, esta

abordagem quantitativa do teste necessita ser mais pesquisada, pois cada um dos pontos acima tem soluções específicas para o solo, o clima e o sistema de cultivo de cada região. Dificilmente, a utilização deste teste de forma isolada será eficiente para determinação da dose de N a ser aplicada, necessitando, portanto, de integração com outros atributos de solo e/ou de planta.

Apesar da utilidade do TPNC já ter sido demonstrada em vários estudos, há de se atentar que este teste pode ser influenciado por vários fatores, como tipo de solo, especialmente a textura, condições meteorológicas, principalmente a precipitação pluvial da região, tipo de adubação nitrogenada utilizada (orgânica ou mineral) e cultura em cobertura antecessora ao milho (histórico da área). Dentre estes fatores, destacam-se a precipitação pluvial e a textura do solo, pois afetam principalmente a lixiviação de nitrato, que resulta em erros de estimação do teste. A lixiviação de nitrato ocorre principalmente quando a precipitação for superior à evapotranspiração e o solo estiver na capacidade de campo (MAGDOFF, 1991).

A dimensão das perdas de nitrato por lixiviação é também muito influenciada pelas propriedades do solo. O tamanho e a distribuição dos poros no solo governam a capacidade de retenção de água no solo, bem como o seu fluxo em condições de saturação e de insaturação. Grande quantidade de água pode percolar para as camadas mais profundas em solos que contenham elevado número de poros grandes sem lixiviar muito nitrato da matriz do solo (MAGDOFF, 1991). Contudo, o fluxo preferencial pode causar grande perda de nitrato que tenha sido recentemente aplicado na superfície precedendo a ocorrência de elevada precipitação, visto que ele se move na superfície junto com a água, entra nos grandes canais (poros grandes) e percola (TYLER & THOMAS, 1977). Por outro lado, o fertilizante que tiver tempo para se difundir entre os agregados nos microporos estaria mais protegido de subseqüentes lixiviações devido à alta proporção de fluxo de água através de macroporos, o que pode ser verificado sob plantio direto e em solo com textura mais fina que o arenoso (BUNDY & MEISINGER, 1994; ROZAS et al., 2000).

Em solos arenosos que possuem poros com tamanho similar e não apresentam fluxo preferencial, a precipitação pluvial pode resultar em lixiviação uniforme de nitrato através do perfil do solo (MAGDOFF, 1991), aumentando desta forma o problema de lixiviação deste íon. Outro aspecto a ser considerado é que os solos arenosos têm menor capacidade de retenção de água, o que significa que a mesma quantidade de água provinda da precipitação

pluvial ou irrigação causa maior lixiviação de nitrato em solo arenoso do que em solos com textura mais fina. Diante deste contexto, o TPNC tem apresentado melhores resultados em solos estruturados com textura média, em regiões em que não ocorrem intensas precipitações. Nesse sentido, segundo BUNDY & MEISINGER (1994), este teste apresenta limitações sob determinadas condições, tais como: (i) sob temperaturas baixas e/ou deficiências hídricas que afetem a mineralização e a nitrificação do N da matéria orgânica ou dos fertilizantes (ii) em solos altamente desestruturados e lixiviados e (iii) sob circunstâncias em que as transformações do solo perturbem o "pool" de nitrato no solo, tais como os processos de denitrificação ou imobilização.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Houve avanço recente na recomendação de N ao milho pelo fato de considerar a cultura anterior em adição ao teor de matéria orgânica no solo e a expectativa de rendimento de grãos. Avanços adicionais potencialmente poderão ser obtidos com a inclusão de parâmetros de solo e de planta como indicadores complementares da disponibilidade de N.

Dentre os parâmetros de solo abordados nesta revisão, destaca-se o teste de pré-aplicação de N em cobertura (TPNC), o qual tem sido o mais estudado e difundido, principalmente nos EUA, pois permite avaliar a variação da disponibilidade de N do solo durante o ciclo da cultura, determinando maior flexibilidade no manejo da adubação nitrogenada em situações específicas. Estudos visando calibrar este teste de nitrato para seu uso na recomendação de N em milho devem ser realizados na região Sul do Brasil, pois visualiza-se que o mesmo possa ser uma ferramenta útil para predição da necessidade de aplicação de N em cobertura, bem como para o refinamento das doses de N aplicadas nos estádios iniciais de desenvolvimento do milho. Contudo, ressalta-se que o TPNC deve ser usado como parâmetro complementar no manejo da adubação nitrogenada, associado com outros atributos de solo e/ou de planta, bem como com as informações que atualmente são recomendadas, ou seja, o teor de matéria orgânica, a cultura antecedente e o rendimento de grãos projetado.

Vários fatores podem interferir na quantidade de nitrato que estará presente no solo no momento da realização dos testes de nitrato, tais como, tipo de solo, especialmente a textura, condições meteorológicas, principalmente a precipitação pluvial e a temperatura, tipo de adubação nitrogenada utilizada

(orgânica ou mineral), cultura antecedente ao milho e sistema de preparo do solo. Desta forma, as vantagens e limitações da utilização destes testes no Brasil dependerão muito destas condições, que irão variar em função das condições edafoclimáticas de cada região, considerando a sua grande dimensão geográfica.

Por fim, a integração entre diferentes parâmetros para auxiliar o manejo da adubação nitrogenada em milho pressupõe que eles sejam utilizados de forma complementar, antes e durante a sua ontogenia, de forma que um atributo complemente as características ou supra as deficiências de outro. Esta integração preconiza que haja um manejo adequado da adubação nitrogenada durante todas as fases de desenvolvimento, aumentando a eficiência do uso do N. A otimização da recomendação de N tem como principal objetivo a minimização do impacto ambiental, principalmente por lixiviação de nitrato, em adição à necessidade de diminuição dos custos de produção estabelecida pela economia atual.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADDISCTOTT, T.M. Tillage, mineralization and leaching – foreword. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v.53, p.163-165, 2000.
- AMADO, T.J.C. **Disponibilidade de nitrogênio para o milho em sistemas de cultura e preparo do solo**. 1997. 201f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Programa de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 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. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.26, n.2, p.241-248, 2002.
- ANDRASKI, T.W.; BUNDY, L.G.; BRYE, K.R. Crop management and corn nitrogen rate effects on nitrate leaching. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v.29, n.4, p.1095-1103, 2000.
- ANDRASKI, T.W.; BUNDY, L.G. Using the presidedress soil nitrate test and organic nitrogen crediting to improve corn nitrogen recommendations. *Agronomy Journal*, Madison, v.94, p.1411-1418, 2002.
- ARGENTA, G. **Monitoramento do nível de nitrogênio na planta como indicador da adubação nitrogenada em milho**. 2001. 112f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. 240f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- BINDER, D.L.; SANDER, D.H.; WALTERS, D.T. Maize response to time of nitrogen application as affected by level of nitrogen deficiency. *Agronomy Journal*, v.92, n.6, p.1228-1236, 2000.
- BINFORD, G.D.; BLACKMER, A.M.; CERRATO, M.E. Relationships between corn yields and soil nitrate in late spring. *Agronomy Journal*, v.84, n.1, p.53-59, 1992.
- BLACKMER, A.M. et al. Correlations between soil nitrate concentrations in late spring and corn yields in Iowa. *Journal of Production Agriculture*, Madison, v.2, p.103-109, 1989.
- BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v.25, n.9/10, p.1791-1800, 1994.
- BREDEMEIER, C.; MUNDSTOCK, C.M. Regulação da absorção e assimilação do nitrogênio nas plantas. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.30, n.2, p.365-372, 2000.
- BUNDY, L.G.; ANDRASKI, T.W. Soil and plant nitrogen availability tests for corn following alfafa. *Journal of Production Agriculture*, Madison, v.6, n.2, p.200-206, 1993.
- BUNDY, L.G.; ANDRASKI, T.W. Soil yield potential effects on performance of soil nitrate tests. *Journal of Production Agriculture*, Madison, v.8, n.3, p.561-568, 1995.
- BUNDY, L.G.; MEISINGER, J.J. Nitrogen availability indices. In: Soil Science Society of America. *Methods of soil analysis, Part 2: microbiological and biochemical properties*. Madison : WEAVER, R.W., 1994. p.951-984.
- CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜL, L.T.; CANTARELLA, H.(Eds). **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba : POTAFOS, 1993. p.147-198.
- CERETTA, C.A. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia/milho, no sistema de plantio direto. In: FRIES, M.R.; DALMOLIN, R.S.D. **Atualização em recomendação de adubação e calagem: ênfase em plantio direto**. Santa Maria : Universidade Federal de Santa Maria, Pallotti, 1997. p.112-124.
- CERETTA, C.A. et al. Características químicas de solo sob aplicação de esterco líquido de suínos em pastagem natural. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 38, p. 729-735, 2003.
- COELHO, A.M. et al. Balanço de nitrogênio (15N) em um latossolo vermelho escuro, fase cerrado, cultivado com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.15, n.2, p.187-193, 1991.
- COELHO, A.M. et al. Doses e métodos de aplicação de fertilizantes nitrogenados na cultura do milho sob irrigação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.16, n.1, p. 61-67, 1992.
- COSER, R.P.S. **Adubação nitrogenada no espigamento em dois híbridos de milho e três níveis de aplicação de nitrogênio no período vegetativo**. 2003. 100f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Programa de Pós-graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- DYNIA, J.F.; CAMARGO, O.A. Retenção de nitrato num solo de carga variável, influenciada por adubação fosfatada e calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.1, p.141-144, 1999.
- FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Fisiologia de produção e manejo de água e nutrientes na cultura do milho de alta produtividade**. Piracicaba : POTAFOS (Associação brasileira para a pesquisa da potassa e do fosfato), Departamento de Agricultura/ESALQ, USP, 1996. 29 p.
- FORNASIERI FILHO, D. **A cultura do milho**. Jaboticabal : FUNEB, 1992. 273p.
- FOX, R.H. et al. Soil and tissue tests compared for predicting soil nitrogen availability to corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.81, n.6, p.971-974, 1989.
- HECKMAN, J.R. et al. Corn response to sidedress nitrogen in relation to soil nitrate concentration. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.27, n.3/4, p.575-583, 1996.
- JENKINSON, D.S.; AYANABA, A. Decomposition of carbon-14 labeled plant material under tropical conditions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.41, p. 912-915, 1977.
- KEENEY, S.D. Nitrogen management for maximum efficiency and minimum pollution. In: STEVENSON, F.J. (Ed.). **Nitrogen in agriculture soils**. Madison : Soil Science Society of America, 1982. p.605-949.
- KLAUSNER, S.D.; REID, W.S.; BOULDIN, D.R. Relationship between late spring soil nitrate concentrations and corn yields in New York. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v.6, n.3, p.350-354, 1993.
- MA, B.L.; DWYER, L.M. Within plot variability in available soil mineral nitrogen in relation to leaf greenness and yield. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.30, n.13/14, p.1919-1928, 1999.
- MAGDOFF, F. Understanding the Magdoff pre-sidedress nitrate test for corn. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v.3, n.4, p.297-305, 1991.
- MAGDOFF, F.R.; ROSS, D.; AMADON, J. A soil test for nitrogen availability to corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48, p.1301-1304, 1984.
- MATSON, P.A.; NAYLOR, R.; MONASTERIO, O. Integration of environmental, agronomic, and economic aspects of fertilizer management. **Science**, v.280, n.3, abr., 1998.
- PORT, O.; AITA, C.; GIACOMINI, S.J. Perda de nitrogênio por volatilização de amônia com o uso de dejetos de suínos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária**, Brasília, v. 38, p. 857-865, 2003.
- POTTKER, D.; ROMAN, E. Efeito de resíduos de cultura e do pouso de inverno sobre a resposta do milho a nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.5, p.763-770, 1994.
- RANDALL, G.; MULLA, D.J. Nitrate nitrogen in surface waters as influenced by climatic conditions and agriculture practices. **Agronomy Journal**, Madison, v.30, n.2, p.337-344, 2001.
- RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**, Madison, v.91, n.3, p.357-363, 1999.
- ROTH, G.W. et al. Development of a quicktest kit method to measure soil nitrate. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.22, n.3/4, p.191-200, 1991.
- ROTH, G.W.; BEEGLE, D.B.; BOHN, P.J. Field evaluation of a presidedress soil nitrate test and quick test for corn in Pennsylvania. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v.5, n.4, p.476-481, 1992.
- ROZAS, H. S. et al. Evaluation of the presidedress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. **Agronomy Journal**, Madison, v.92, n.6, p.1176-1183, 2000.
- SCHMITT, M.A.; RANDALL, G.W. Developing a soil nitrogen test for improved recommendations for corn. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v.7, n.3, p.328-334, 1994.
- SCHREIBER H.A.; STANBERRY, C.O.; TUCKER, H. Irrigation and nitrogen effects sweet corn row number at various growth stages. **Science**, Washington, v.135, n.1, p.135-136, 1988.
- SCHRÖDER, J.J. et al. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of art. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.66, n.1, p.151-164, 2000.
- SILVA, P.R.F. da. Crescimento e desenvolvimento. In: FEPAGRO. **Indicações técnicas para cultura de milho no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre : FEPAGRO; EMBRAPA TRIGO, EMATER/RS; FECOAGRO/RS, 2001. 135p. (Boletim Técnico, 7).
- SIMS, J.T. et al. Evaluation of soil and plant nitrogen tests for maize on manured soils of the Atlantic coastal plain. **Agronomy Journal**, Madison, v.87, n.2, p.213-222, 1995.
- SPELLMAN, D.E. et al. Pre-sidedress nitrate soil testing to manage nitrogen fertility in irrigated corn in a semi-arid environment. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.27, n.3/4, p.561-574, 1996.
- STANFORD, G. Rationale for optimum nitrogen fertilization in corn production. **Journal Environmental Quality**, Madison, v.2, n.2, p.159-166, 1973.
- STITT, M. Nitrate regulation of metabolism and growth. **Current Opinion in Plant Biology**, Heidelberg, v.2, n.3, p.178-186, 1999.
- STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2.ed. New York : John Wiley & Sons, 1994. 496 p.
- TEYKER, R.H.; MOIL, R.H.; JACKSON, W.A. Divergent selection among maize seedlings for nitrate uptake. **Crop Science**, Madison, v.29, n.5, p.879-884, 1989.
- TYLER, D.D.; THOMAS, G.W. Lysimeter measurements of nitrate and chloride losses from soil under conventional

cultivation and no-tillage maize. **Journal Environmental Quality**, v.6, p.63-66, 1977

VANOTTI, M.B.; BUNDY, L.G. An alternative rationale for corn nitrogen fertilizer recommendations. **Journal of Production Agriculture**, Madison, v.7, n.2, p.243-249, 1994.

VARVEL, G.E.; SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meter. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, p.1233-1239, 1997.

VON WIRÉN, N.; GAZZARRINI, S.; FROMMER, W.B. Regulation of mineral nitrogen uptake in plants. **Plant and Soil**, The Hague, v.196, n.2, p.191-199, 1997.

WANG, R. et al. Genomic analysis of a nutrient response in arabidopsis reveals diverse expression patterns and novel metabolic and potential regulatory genes induced by nitrate. **The Plant Cell**, Rockville, v.12, p. 1491-1509, 2000.

YAMADA, T. Adubação nitrogenada do milho: quanto, como e quando aplicar? **Informações Agronômicas**, n.74, p.1-5, 1996.