

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC

CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV

FACULDADE DE AGRONOMIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

LIXIVIAÇÃO DE NITROGÊNIO EM NITOSSOLO VERMELHO AFETADA PELO

pH DO SOLO E PELA ADIÇÃO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS

COMBINADOS COM SUPERFOSFATO TRIPLO

Analú Mantovani

Engenheira Agrônoma

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, para à obtenção do Título de Mestre em Ciência do Solo.

Lages (SC), Brasil
Fevereiro de 2005

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC

CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV

FACULDADE DE AGRONOMIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

LIXIVIAÇÃO DE NITROGÊNIO EM NITOSSOLO VERMELHO AFETADA PELO

pH DO SOLO E PELA ADIÇÃO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS

COMBINADOS COM SUPERFOSFATO TRIPLO

Analú Mantovani

Orientador: Prof. Ph.D. Luis Sangoi

Co-orientador: Prof. Ph.D. Paulo Roberto Ernani

Dissertação apresentada ao Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, para à obtenção do Título de Mestre em Ciência do Solo.

Lages (SC), Brasil
Fevereiro de 2005

ANALÚ MANTOVANI

Engenheira Agrônoma

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**LIXIVIAÇÃO DE NITROGÊNIO EM NITOSSOLO VERMELHO ENVOLVENDO O
pH DO SOLO E A ADIÇÃO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS
COMBINADOS COM SUPERFOSFATO TRIPLO**

Dissertação apresentada como um dos requisitos à obtenção do Grau de

MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

Aprovado em:
Pela banca examinadora

Homologado em:
Por:

LUIS SANGOI, Ph.D.

JAIME ANTÔNIO DE ALMEIDA, Dr.
Coordenador do Programa de Mestrado em
Agronomia, Coordenador Técnico do Curso
de Mestrado em Ciência do Solo.

PAULO ROBERTO ERNANI, Ph.D.

MARCIA APARECIDA SIMONETI, Dr.

PAULO CESAR CASSOL, Dr.
Diretor Geral do Centro de Ciências
Agroveterinárias

CIMÉLIO BAYER, Dr.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela proteção, pela paz, pela saúde e por estar sempre ao meu lado e saber me guiar com sua imensa sabedoria para vencer mais esta etapa.

Aos meus pais, Darcy e Rosalina, que sempre acreditaram em mim e me apoiaram nos momentos dificeis, e pela oportunidade que me deram de estudar e a quem eu sempre vou confiar.

Aos meus irmãos, Aluir e André, aos meus sobrinhos Luan e Vitor, à minha avó, Elfa, às minhas cunhadas Vânia e Simone e a todos meus familiares pela força, incentivo e confiança.

Aos professores de Agronomia do CAV, principalmente do Curso de Mestrado, pelo repasse do conhecimento, em especial aos professores Paulo Roberto Ernani e Luis Sangoi pela orientação prestada, amizade e companheirismo.

À república das sete mulheres, Janice, Elen, Carolina, Catiline, Lisandra e Marineia pela amizade e apoio.

Aos colegas de mestrado, aos bolsistas e a muitos alunos de graduação pela amizade.

A todos meus amigos pelos muitos momentos de descontração não só durante o mestrado, mas durante toda a minha vida até aqui.

À Universidade pública e gratuita, sem a qual não teria alcançado meu objetivo.

À CAPES pela bolsa de mestrado.

SUMÁRIO

<u>LISTA DE TABELAS</u>	v
<u>LISTA DE FIGURAS</u>	vi
<u>INTRODUÇÃO GERAL</u>	1
<u>I. CAPÍTULO - MOBILIDADE DE NITROGÊNIO NUM SOLO ÁCIDO DECORRENTE DA APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS E SUPERFOSFATO TRIPLO</u>	4
<u>1.1 RESUMO</u>	4
<u>I. CHAPTER 1 – NITROGEN MOBILITY IN AN ACID SOIL AS AFFECTED BY NITROGEN FERTILIZERS AND TRIPLE SUPERPHOSPHATE</u>	6
<u>1.1 SUMMARY</u>	6
<u>1.2 INTRODUÇÃO</u>	8
<u>1.3 MATERIAL E MÉTODOS</u>	13
<u>1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	16
<u>1.4.1 Lixiviação de amônio</u>	16
<u>1.4.2 Lixiviação de nitrato</u>	21
<u>1.4.3 Lixiviação de amônio + nitrato</u>	24
<u>1.4.4 Lixiviação de cálcio magnésio e potássio e comportamento do pH e condutividade</u>	26
<u>1.5 CONCLUSÕES</u>	32
<u>1.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	33
<u>II. CAPÍTULO - LIXIVIAÇÃO DE NITROGÊNIO A PARTIR DA URÉIA INFLUENCIADA PELO pH DO SOLO E PELA ADIÇÃO DE SUPERFOSFATO TRIPLO</u>	36
<u>2.1 RESUMO</u>	36
<u>II. NITROGEN LEACHING FROM UREA AS AFFECTED BY SOIL PH AND THE ADDITION OF TRIPLE SUPERPHOSPHATE</u>	37
<u>2.1 SUMMARY</u>	37
<u>2.2 INTRODUÇÃO</u>	38
<u>2.3 MATERIAL E MÉTODOS</u>	41
<u>2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	44
<u>2.4.1 Lixiviação de amônio</u>	44
<u>2.4.2 Lixiviação de nitrato</u>	48
<u>2.4.3 Lixiviação de amônio + nitrato</u>	51
<u>2.4.4 Lixiviação de cálcio magnésio e potássio e comportamento do pH e condutividade</u>	51
<u>2.5 CONCLUSÕES</u>	57
<u>2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	58

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 Concentrações de amônio e de nitrato lixiviadas em mg percolado, acumuladas em segmentos seqüenciais de 5 ou 4 percolações com água destilada, de um nitossolo vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições.....	19
TABELA 2.1 Média de amônio lixiviado acumulado, de um Nitossolo Vermelho submetido a dezenove percolações com água destilada, em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.....	44
TABELA 2.2 Média de nitrato lixiviado acumulado, de um Nitossolo Vermelho submetido a dezenove percolações com água destilada, em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.....	48
TABELA 2.3 Média de amônio + nitrato lixiviado acumulado, de um Nitossolo Vermelho submetido a dezenove percolações com água destilada, em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.....	51

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1.1** Quantidades acumuladas de amônio lixiviado de um Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo, e submetido a dezenove percolações com água destilada. Média de três repetições. (Médias seguidas pela mesma letra ou número, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%: maiúscula compara adubos na ausência de SFT, minúscula compara adubos na presença de SFT, e números comparam o efeito do SFT dentro de cada adubo).17
- FIGURA 1.2** Concentração de amônio lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições18
- FIGURA 1.3** Quantidades acumuladas de nitrato + nitrito lixiviados de um Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo, e submetido a dezenove percolações com água destilada. Média de três repetições.(Médias seguidas pela mesma letra ou número, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%: maiúscula compara adubos na ausência de SFT, minúscula compara adubos na presença de SFT, e números comparam o efeito do SFT dentro de cada adubo).22
- FIGURA 1.4** Concentração de nitrato lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições.23
- FIGURA 1.5.** Valores de amônio + nitrato remanescentes no solo após dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições. (Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%, comparando o efeito do SFT dentro de cada adubo).25
- FIGURA 1.6** Quantidades acumuladas de amônio + nitrato + nitrito lixiviadas de um Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo, e submetido a dezenove percolações com água destilada. Média de três repetições. (Médias seguidas pela mesma letra ou número, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%: maiúscula compara adubos na ausência de SFT, minúscula compara adubos na presença de SFT, e números comparam o efeito do SFT dentro de cada adubo).26

FIGURA 1.7 Concentração de cálcio lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições.....	27
FIGURA 1.8 Concentração de magnésio lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições.....	28
FIGURA 1.9 Concentração de potássio lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições.....	29
FIGURA 1.10 Valores de pH em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições	30
FIGURA 1.11 Valores da condutividade elétrica em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições	31
FIGURA 2.1 Quantidades acumuladas de amônio e nitrato lixiviadas de um Nitossolo Vermelho submetido a dezenove percolações com água destilada, em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.....	46
FIGURA 2.2 Valores de amônio e nitrato remanescentes no solo após dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições. (Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%; maiúscula comparando pH dentro dos tratamentos e minúscula comparando os tratamentos em cada valor de pH. ^{ns} Não-significativo).....	47
FIGURA 2.3 Concentração de nitrato lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.....	49
FIGURA 2.4 Concentração de cálcio lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH tratado. Média de três repetições.....	52
FIGURA 2.5 Concentração de magnésio lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.....	53
FIGURA 2.6 Concentração de potássio lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.....	54
FIGURA 2.7 Valores de pH em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.....	55

FIGURA 2.8 Valores da condutividade elétrica em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.....56

INTRODUÇÃO GERAL

O nitrogênio é o nutriente de maior exigência pela maioria das plantas cultivadas, pois, apresenta efeito considerável no rendimento de grãos, principalmente quando os demais se encontram disponíveis em quantidades adequadas e as condições climáticas são favoráveis. As formas preferenciais de absorção de N pelas plantas são amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), na proporção em que eles se encontram no solo.

O nitrogênio é o elemento mais difícil de ser manejado no solo devido à multiplicidade de reações químicas e biológicas a que esta sujeito e à dependência das condições ambientais. Estas dificuldades se intensificam devido ao grande numero de perdas que ocorrem através de erosão, volatilização, imobilização biológica e lixiviação. Das perdas, a lixiviação, que consiste no movimento vertical do nitrogênio no perfil do solo para profundidades abaixo daquelas exploradas pelas raízes. É a reação mais importante que ocorre com o N nos solos brasileiros em regiões com baixa eficiência dos fertilizantes nitrogenados e alta precipitação pluviométrica, causando prejuízo econômico para os produtores com reflexos na queda de rendimento vegetal.

A magnitude do nitrogênio perdido por lixiviação depende da existência do nutriente em quantidades significativas na solução do solo e da percolação de água, seja da chuva ou de irrigação. A lixiviação de N é preocupante porque os solos brasileiros possuem

essencialmente cargas elétricas negativas na camada arável, e porque a quase totalidade do N mineral do solo se encontra na solução e na forma de nitrato (NO_3^-). Como o nitrato possui o mesmo tipo de carga que as partículas de solo e ele não é adsorvido à fase sólida por nenhum mecanismo além do eletrostático, tende a permanecer na solução e pode ser lixiviados pelas águas de percolação, resultando em perda de N que poderia ser utilizado pelas plantas, e em contaminação de lençóis freáticos e cursos d'água.

Na forma amoniacal, as perdas de nitrogênio podem ocorrer principalmente por volatilização, quando o solo possui pH alto, e por lixiviação, mas em menor magnitude que a nítrica, pois precisa sofrer o processo de nitrificação. A forma amídica é aquela em que o N se encontra na uréia, sendo hidrolisada rapidamente e passando para a forma de amônio. Parte deste amônio pode ser retido pelas cargas e parte sofrer nitrificação, formando nitrato, possível de ser perdido por lixiviação. A transformação do N amoniacal em nítrico (nitrificação) é um processo que ocorre naturalmente nos solos bem drenados, porém é indesejável. Quando os fertilizantes nitrogenados são incorporados ao solo, a perda de nitrogênio por lixiviação aumenta devido ao maior contato do fertilizante com o solo, aumentando a concentração do nutriente na solução do solo.

A acidificação do solo é uma alternativa para diminuir a lixiviação de nitrogênio, pois diminui a nitrificação. As taxas de nitrificação são geralmente baixas em solos ácidos, devido ao efeito negativo da acidez sobre a atividade dos microorganismos. A acidificação do solo também tem a possibilidade de aumentar as cargas positivas, diminuindo, consequentemente, a lixiviação. A aplicação de adubos de reação ácida, a exemplo do superfosfato triplo, junto com os fertilizantes nitrogenados pode diminuir a lixiviação de nitrogênio porque, ao acidificar o solo, diminui a velocidade da nitrificação e ao mesmo tempo, pode criar cargas positivas onde o NO_3^- poderá ser adsorvido eletrostaticamente.

A lixiviação varia com o tipo de solo e com o tipo de fertilizante nitrogenado aplicado, assim como com a magnitude das reações que ocorrem com os fertilizantes no solo, sendo maior com os fertilizantes nitrogenados nítricos do que com os amoniacais ou amídicos, porque a nitrificação não é instantânea e durante um período o NH_4^+ fica adsorvido às cargas negativas do solo.

O presente trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar a lixiviação de nitrogênio a partir do uso de fertilizantes minerais nitrogenados em combinação com um fertilizante fosfatado acidificante e em níveis de acidez. Foram realizados dois experimentos de laboratório. No primeiro experimento, utilizou-se três fontes de nitrogênio, na ausência e na presença de superfosfato triplo em solo com pH baixo; no segundo, utilizou-se fertilizante nitrogenado na forma de uréia na ausência e na presença de superfosfato triplo em dois níveis de pH.

I. CAPÍTULO - MOBILIDADE DE NITROGÊNIO NUM SOLO ÁCIDO DECORRENTE DA APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES NITROGENADOS E SUPERFOSFATO TRIPLO

1.1 RESUMO

O nitrogênio é o nutriente exigido em maior quantidade pelas plantas e é o único que pode ser absorvido tanto na forma de ânion (NO_3^-) como de cátion (NH_4^+). No solo, está sujeito a um grande número de reações, sendo, por isso, difícil de ser manejado eficientemente. Uma das principais perdas é a lixiviação, a qual é importante em locais com elevadas precipitações, e depende da forma de fertilizante nitrogenado aplicado. O presente trabalho objetivou avaliar a lixiviação de nitrogênio a partir do uso de fertilizantes minerais em combinação com um fertilizante fosfatado acidificante, num solo com pH baixo. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, em colunas de PVC, no ano de 2003, num Nitossolo Vermelho (NV), com pH 4,8, 760 g kg^{-1} de argila, 40 g kg^{-1} de matéria orgânica. Os tratamentos consistiram de fontes de nitrogênio (uréia, sulfato de amônio e nitrato de cálcio), além de uma testemunha, na presença ou não de SFT. As doses de N e de P foram respectivamente 150 mg kg^{-1} e 751 mg kg^{-1} . A cada sete dias, durante dezenove semanas, foram realizadas percolações, adicionando-se 300 ml de água destilada em cada unidade experimental. A lixiviação total de nitrogênio, incluindo o somatório de $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$, após dezenove percolações, decorrente da adição de fertilizantes nitrogenados, seguiu a seguinte ordem: sulfato de amônio > nitrato de cálcio > uréia > testemunha, na ausência de SFT; na presença de SFT, a ordem foi: sulfato de amônio = uréia > nitrato de cálcio > testemunha. A lixiviação de nitrogênio na forma de amônio foi pequena e varias vezes menor que a de nitrato. Em todos os tratamentos, a perda de amônio foi antecipada pela adição de SFT, porém naqueles com uréia e sulfato de amônio só foi intensificada após a oitava percolação. A lixiviação total de nitrato seguiu a seguinte ordem: nitrato de cálcio > sulfato de amônio > uréia > testemunha, na ausência de SFT; na presença de SFT ocorreu na seguinte ordem: uréia = nitrato de cálcio > sulfato de amônio > testemunha. A adição de SFT antecipou a lixiviação de nitrato no tratamento que recebeu uréia, não interferiu naquele com sulfato de amônio, e retardou no tratamento com nitrato de cálcio. A lixiviação de nitrato no tratamento que recebeu nitrato de cálcio ocorreu nas primeiras percolações independentemente da presença de SFT; nos demais fertilizantes, a

lixiviação só foi intensificada a partir da sexta percolação. A lixiviação de cálcio apresentou o mesmo comportamento que a de nitrato, evidenciando que eles lixiviaram associados. Conclui-se, portanto, que os fertilizantes nítricos lixiviam nitrogênio mais rapidamente que os amoniacais ou amídicos, e que a adição de SFT junto com fertilizantes nitrogenados antecipa a lixiviação de nitrogênio.

I. CHAPTER 1 – NITROGEN MOBILITY IN AN ACID SOIL AS AFFECTED BY NITROGEN FERTILIZERS AND TRIPLE SUPERPHOSPHATE

1.1 SUMMARY

Nitrogen is the most demanded nutrient by plants and its the only one that can be taken up as an anion (NO_3^-) or a cation (NH_4^+). N is affected by several reactions in the soil which makes its management difficult. One of the major sources of N losses is leaching, an important process in regions with high pluvial precipitation, depending on the form of nitrogen fertilizer applied to the soil. This work aimed to evaluate the effect of several types of nitrogen fertilizers, in combination with an acid source of phosphate fertilizer, on nitrogen leaching in a soil with low pH. A greenhouse experiment was carried out, using PVC columns, during the year of 2003, in a Oxisol, with a pH of 4,8, clay and organic matter contents of 760 g kg^{-1} and 40 g kg^{-1} , respectively. Treatments were set up as a combination of three nitrogen sources (urea, ammonium sulfate and calcium nitrate), plus a control, in the presence or absence of triple superphosphate (TSP). The rates of N and P were 150 mg kg^{-1} e 751 mg kg^{-1} , respectively. At each seven days, during 19 weeks, percolation were performed adding 300 ml of distilled water to each experimental unit. In the absence of P, total N leaching ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) after 19 weeks presented the following order: ammonium sulfate > calcium nitrate > urea > control. When TSP was applied, total nitrogen leaching showed the following sequence: ammonium sulfate = urea > calcium nitrate > control. N leaching as ammonium was small and several times lower than as nitrate. Ammonium loss was anticipated by the addition of TSP in all treatments, but it was only intensified after the eight percolation when urea and ammonium sulfate were used. Total nitrate leaching presented the following order in the absence of TSP: calcium nitrate > ammonium sulfate > urea > control. When TSP was applied, total nitrate leaching presented the following sequence:: urea = calcium nitrate > ammonium sulfate > control. The addition of TSP anticipated nitrate leaching when urea was applied, did not interfere with the process when ammonium sulfate was used and delay NO_3^- leaching loss when calcium nitrate was fertilized. Nitrate leaching occurred in the initial percolations when calcium nitrate was used, regardless of the presence of TSP. Conversely, NO_3^- leaching was only intensified after the sixth percolation with the other two fertilizers. Calcium leaching had the same behavior observed with nitrate showing that both ions leached associated to each other. Overall, our results show that N leaching is faster with the addition

of nitric fertilizers than with the application of nitrogen sources containing ammonium or amide. They also demonstrate that the addition of SFT with nitrogen fertilizers anticipate nitrogen leaching.

1.2 INTRODUÇÃO

O nitrogênio é o nutriente exigido em maior quantidade pelas plantas, e é o único que pode ser absorvido tanto na forma de ânion (NO_3^-) como de cátion (NH_4^+). No solo, está sujeito a um grande número de reações, sendo, por isso, difícil de ser manejado eficientemente. Uma das principais perdas é a lixiviação, a qual é importante em locais com elevadas precipitações e é responsável pela inexistência de efeito residual de nitrogênio no solo.

A lixiviação ocorre quando há o transporte de cátions e ânions para as camadas mais profundas do solo, fora do alcance do sistema radicular, através de íons que possuam o mesmo sinal das cargas das partículas do solo, que se ligam a outros íons presentes na solução do solo, movimentando-se através de um fluxo descendente de água. (Quaggio, 1986). Para que haja lixiviação é necessário, portanto, que ocorra precipitação pluviométrica suficiente para promover a descida de água. O movimento de íons está relacionado com a intensidade de percolação com as reações de cada solo (Drouineau, 1969).

Os íons presentes na solução do solo podem ser adsorvidos à fase sólida, através das cargas elétricas existentes nas superfícies orgânicas ou inorgânicas, absorvidos pelas plantas, ou lixiviados das camadas superficiais do solo. Alguns íons, quando presentes na solução do solo, são rapidamente deslocados no perfil, como é o caso do nitrato. A movimentação de

nitrato para camadas profundas é indesejável, pois, além de diminuir o uso do N pelas plantas, pode contaminar as águas subterrâneas (Aulakh et al., 2000; Ottman & Pope, 2000). A percolação de água no perfil do solo diminui substancialmente a concentração e a atividade de todos os cátions na solução do solo (Ernani & Barber, 1993). Em decorrência disso, os solos que apresentarem maior número de sítios de ligação, adsorverão mais nutrientes, resultando em menor lixiviação. A fração adsorvida constitui o reservatório de nutrientes às plantas, os quais se mantém protegidos do risco de lixiviação.

A lixiviação é um fenômeno natural, mas a magnitude com que ela ocorre poderá ser aumentada ou diminuída pela adoção de determinadas práticas agrícolas. A aplicação de quantidades excessivas de fertilizantes nitrogenados tem sido freqüentemente sugerida como a principal fonte de contaminação de águas subterrâneas (Spalding et al. 1982). Assim, após a adição de fertilizantes ao solo, o retardamento da lixiviação é extremamente desejável, pois permite um maior período de absorção pelas plantas, aumentando, com isso, a utilização dos nutrientes.

O N mineral existe no solo principalmente nas formas de amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-). Em solos com predominância de cargas negativas o amônio por ser um cátion, fica parcialmente retido nas cargas do solo. O NO_3^- , o qual adsorve-se ao solo somente por ligações eletrostáticas, e por isso, permanece na solução do solo, podendo ser lixiviado no perfil para profundidades inexploradas pelas raízes (Ceretta & Fries, 1997).

A existência de cargas positivas no solo, em adição às negativas, pode dificultar a lixiviação, pois o deslocamento dos nutrientes no perfil promove um aumento dessas cargas, possibilitando a adsorção eletrostática do ânion (Black & Waring, 1976; Wong et al., 1990). O mecanismo de retenção retarda a lixiviação de nitrato (Raij & Camargo, 1974; Wong et al., 1987, 1990) em relação a frente de água que se desloca, uma vez que os elementos somente se deslocam quando estão eletricamente neutros.

Para uma mesma quantidade de adubo aplicado, as perdas por lixiviação serão maiores quanto mais arenoso for o solo. A aplicação de doses moderadas ou altas de sais solúveis ao solo altera o equilíbrio químico de alguns elementos minerais, com reflexos na disponibilidade de nutrientes aos vegetais e na lixiviação de íons (Ernani & Barber, 1993). A diminuição da dose de N a ser aplicada, ou o seu parcelamento (Errebhi et al., 1998; Basso & Ceretta, 2000), assim como o uso de plantas com sistema radicular profundo (Menezes et al., 1997; Aulakh et al., 2000), seriam algumas alternativas para minimizar as perdas de N por lixiviação. Esta é a razão por que, freqüentemente, se recomenda o parcelamento de adubação de alguns nutrientes como o K.

A absorção dos nutrientes pelos vegetais ocorre somente a partir da solução, pois os elementos têm que estar dissolvidos para que possam ser absorvidos. Isso nos leva a pensar que seria vantajoso que toda a quantidade de um dado nutriente se encontrasse nessa forma. No entanto, uma grande quantidade na solução provocaria um aumento excessivo na concentração salina, que impediria a planta de absorver água e os próprios nutrientes. Além disso, uma concentração alta na solução proporcionaria perdas elevadas dos nutrientes por lixiviação, se houvesse percolação de água no perfil. Assim o aumento do uso de fertilizantes no solo eleva as perdas de nutrientes por lixiviação (Bolton et al. 1970)

A eficiência dos fertilizantes nitrogenados depende, com intensidades diferentes, das interações biológicas a que o nutriente é submetido no solo, do manejo do sistema de produção agrícola, e obviamente da relação custo:benefício para cada situação. A uréia, além das características desejáveis de baixo custo por unidade de N e alta concentração de N, necessita de duas reações até atingir a forma de nitrato (hidrólise e nitrificação). Isto tende a retardar a lixiviação de nitrato uma vez que o amônio pode ser retido pelas cargas elétricas negativas do solo antes de ser nitrificado. Em trabalho realizado por Ernani el al. (2002) constataram que quando a uréia foi incorporada, não houve influência do pH do solo na

lixiviação de N, mas quando foi aplicada sobre a superfície, a lixiviação total de N, incluindo do solo e o da uréia, foi maior no pH 7,0 do que no pH 5,5. Quando somente o N oriundo da uréia é considerado, a lixiviação de N foi maior com uréia incorporada do que com uréia na superfície do solo, e nos menores valores de pH. Nos menores valores de pH ou quando o fertilizante nitrogenado é aplicado sobre a superfície do solo, a lixiviação total máxima acontece mais tarde, favorecendo a absorção do N pelas plantas.

A adição de sulfato de amônio diminui o pH do solo, podendo inibir a nitrificação (Strong et al., 1997). Assim, se por um lado a aplicação deste adubo pode aumentar o teor de nitrato no solo em presença de calagem, por outro lado a própria reação do fertilizante no solo pode, dependendo do pH inicial, inibir a nitrificação, permanecendo o N na forma amoniacal, menos sujeita à lixiviação.

O uso de nitrato de cálcio normalmente não altera o pH do solo, mas pode, em determinadas circunstâncias, elevar o pH da rizosfera, em função de que as plantas absorvem o nitrato mais rapidamente do que o cálcio. Sendo assim, a aplicação de altas doses desse fertilizante ao solo pode promover rápida lixiviação devido o N estar todo na forma de nitrato.

Uma alternativa para diminuir as perdas de nitrogênio, após a adição de fertilizante nitrogenados, principalmente na forma de nitrato, é inibir a reação de nitrificação. Isso pode ocorrer pela diminuição do pH do solo através da adição de fertilizante de ação acidificante juntamente com os adubos nitrogenados amidicos ou amoniacaais, mantendo parte do nitrogênio na forma amoniacal. A dissolução do superfosfato triplo diminui o pH ao redor do grânulo (Figueiredo, 1985; Ernani et al., 2000), podendo ser importante, principalmente nos períodos iniciais subseqüentes à aplicação dos fertilizantes, onde a magnitude das reações é grande.

O presente trabalho objetivou avaliar a lixiviação de nitrogênio a partir do uso de fertilizantes minerais, em combinação com um fertilizante fosfatado acidificante, num solo ácido não calcariado.

1.3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, no Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lages, SC, em 2003. Utilizou-se um Nitossolo vermelho (NV), coletado em área de campo nativo deste município, com $\text{pH-H}_2\text{O} = 4,8$, $\text{Al}^{3+} = 30 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, $\text{Ca} = 7 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, $\text{Mg} = 5 \text{ mmol}_c \text{ kg}^{-1}$, $\text{P} = 1,8 \text{ mg L}^{-1}$, $\text{K} = 58 \text{ mg L}^{-1}$, 760 g kg^{-1} de argila, e 40 g kg^{-1} de matéria orgânica (M.O).

Os tratamentos consistiram de um fatorial envolvendo fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Como fonte de N, usou-se uréia, sulfato de amônio e nitrato de cálcio, além de um tratamento sem nitrogênio. A dose de N utilizada foi de 150 mg kg^{-1} , e a de P foi de 751 mg kg^{-1} , totalizando, respectivamente, 200 e 1000 mg de N e P por unidade experimental. Os tratamentos foram arranjados no delineamento experimental completamente casualizado, com três repetições.

As unidades experimentais foram constituídas por colunas de lixiviação, confeccionadas a partir de canos de PVC e tinham 30 cm de altura e 10 cm de diâmetro. A base de cada coluna foi hermeticamente vedada com uma tampa ('cap') de PVC, na qual fez-se um orifício na parte central, com aproximadamente 3 mm de diâmetro, para permitir a saída gravitacional da solução percolada. A metade inferior de cada coluna foi envolta com um saco

plástico transparente, ajustado na forma de funil, o qual continha um furo na extremidade inferior para facilitar a saída da solução percolada diretamente para os frascos de coleta.

Em cada coluna, acondicionou-se 1,33 kg de solo (base seca), numa camada de 25 cm, perfazendo um volume ocupado de aproximadamente 1,9 L. Os cinco centímetros da parte superior de cada coluna não continham solo para facilitar a adição de água por ocasião das percolações. Os 5 cm superficiais ocupados com solo assim como os 15 cm da parte inferior continham solo natural, sem nenhum tratamento; o solo contendo os tratamentos foi acondicionado entre essas duas camadas, ocupou uma camada de 5 cm de espessura e correspondeu a 20% do volume total do solo de cada unidade experimental.

Após o preenchimento das colunas com solo, elas foram acondicionadas lado a lado em suportes longitudinais de madeira, cuja base inferior ficava 20 cm acima da superfície de apoio, a fim de permitir a colocação dos frascos de coleta embaixo das mesmas.

Uma semana após a transferência do solo para as colunas, iniciaram-se as percolações, as quais foram repetidas a cada sete dias, durante dezenove semanas. Em cada percolação, adicionaram-se 300 mL de água destilada sobre a superfície de cada coluna, na velocidade aproximada de 5 mL por minuto, por meio de uma bomba peristáltica. A solução percolada foi coletada no dia seguinte, e nela determinou-se o volume, pH, condutividade elétrica, as concentrações de amônio e nitrato, cálcio, magnésio e potássio. O pH e a condutividade elétrica foram determinados em aparelhos por meio do uso de potenciometria e condutivimetria, respectivamente. O nitrogênio foi determinado por arraste de vapor, em aparelho semi-micro-Kjehdahl, de acordo com Tedesco et al. (1985); Ca, Mg por espectrofotometria de absorção atômica; e K por espectrofotometria de emissão.

Ao término das percolações, amostras de solo foram coletadas em cada unidade experimental para quantificação das quantidades de amônio e nitrato remanescentes. Essas

formas foram extraídas do solo com KCl 1,0 mol L⁻¹, e determinadas por meio dos mesmos procedimentos utilizados na análise da solução percolada, descritos anteriormente.

Ao invés de comparar os tratamentos estatisticamente em cada uma das percolações, fez-se isso em apenas quatro períodos seqüenciais. O primeiro período envolveu o somatório das cinco primeiras percolações; o segundo, da sexta à décima; o terceiro, da décima-primeira à décima quinta; e o quarto da décima-sexta à décima-nona. Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($P<0,05$), e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey.

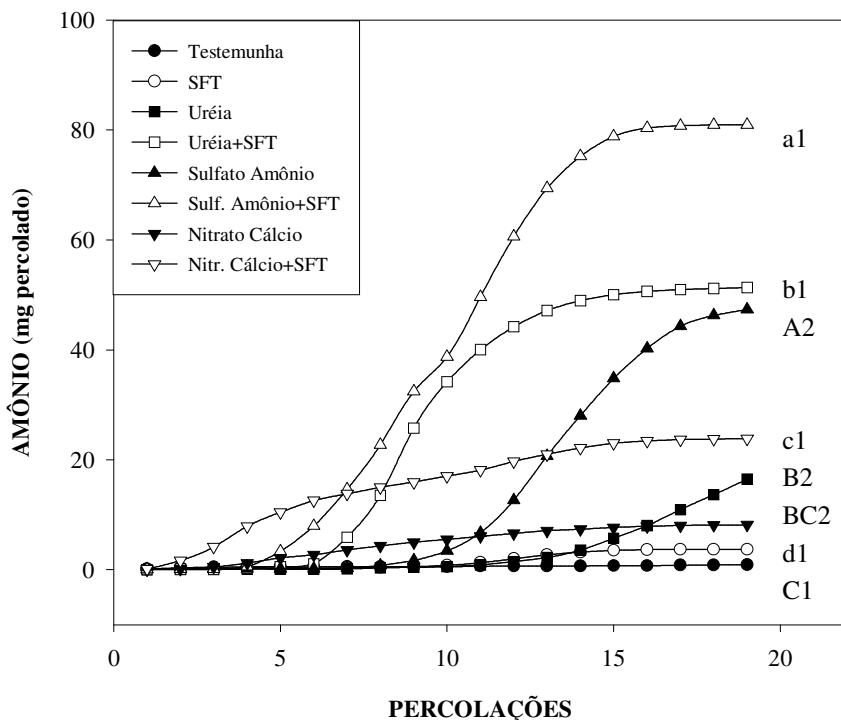
1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.4.1 Lixiviação de amônio

A lixiviação de amônio variou com os fertilizantes nitrogenados, tanto na presença como na ausência de superfosfato triplo (SFT) (Figura 1.1). Na ausência de SFT, a lixiviação foi maior com sulfato de amônio, seguido da uréia e do nitrato de cálcio que não diferiram entre si e, por último, da testemunha que não diferiu do nitrato de cálcio. Na presença de SFT, a lixiviação de amônio foi maior com sulfato de amônio, seguido da uréia, do nitrato de cálcio, e da testemunha. No tratamento onde não foi aplicado nitrogênio e naquele com SFT, praticamente não houve perda de amônio no decorrer das percolações (Figura 1.1 e 1.2).

No tratamento que recebeu uréia, a lixiviação total acumulada de amônio foi maior na presença (50 mg) do que na ausência (16 mg) de SFT (Figura 1.1). A maior perda de amônio em função da adição de SFT é devido principalmente ao efeito da competição do cálcio integrante do SFT com o amônio pelas cargas negativas do solo. O amônio deslocado das cargas vai para a solução e combina com ânions, incluindo o fosfato adicionado, e pode se perder por lixiviação. Quando a uréia foi combinada com SFT, a lixiviação de amônio iniciou a partir da sexta percolação e atingiu o máximo, de aproximadamente 50 mg L^{-1} , na nona

percolação (Figura 1.2). Quando a uréia foi aplicada sozinha, a perda de amônio iniciou a partir da décima-primeira e foi aumentando gradativamente até a última percolação, atingindo a concentração máxima de aproximadamente 10 mg L^{-1} percolação⁻¹ (Figura 1.2). O fato do



início da lixiviação de amônio ter começado após várias percolações provavelmente se deve à adsorção eletrostática inicial desse cátion nas cargas negativas do solo.

FIGURA 1.1 Quantidades acumuladas de amônio lixiviado de um Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo, e submetido a dezenove percolações com água destilada. Média de três repetições. (Médias seguidas pela mesma letra ou número, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%: maiúscula compara adubos na ausência de SFT, minúscula compara adubos na presença de SFT, e números compararam o efeito do SFT dentro de cada adubo).

No tratamento onde se aplicou sulfato de amônio, as maiores perdas acumuladas de amônio também ocorreram na presença (80 mg) do que na ausência (50 mg) de SFT (Figura 1.1). A lixiviação de amônio, na ausência de SFT, iniciou a partir da décima percolação, e

atingiu o valor máximo (34 mg L^{-1}) da décima-terceira à décima-quinta percolação (Figura 1.2). Na presença de SFT, a perda de amônio iniciou a partir da quinta percolação e atingiu o valor máximo (60 mg L^{-1}) na décima-primeira percolação (Figura 1.2). A demora para iniciar a lixiviação de amônio, à semelhança do que ocorreu com a uréia, provavelmente aconteceu porque nas primeiras semanas a maior parte do amônio aplicado fica retido nas cargas negativas do solo. À medida que a nitrificação prossegue, a concentração de amônio na solução do solo diminui e parte da fração retida nas cargas negativas começa a migrar progressivamente para a solução. Quando combinado ao SFT, esta perda foi antecipada devido ao deslocamento de parte do amônio das cargas elétricas pelo cálcio adicionado pelo adubo fosfatado.

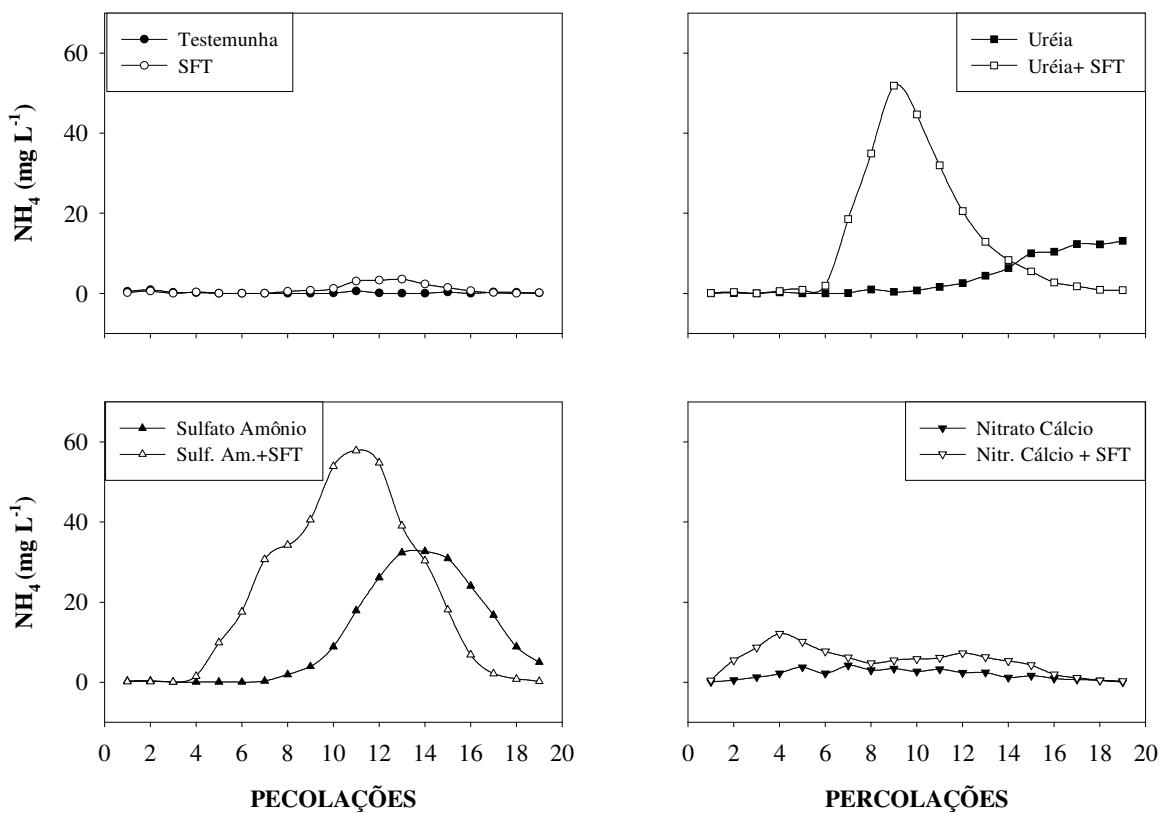


FIGURA 1.2 Concentração de amônio lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições

TABELA 1.1 Concentrações de amônio e de nitrato lixiviadas em mg percolado, acumuladas em segmentos seqüenciais de 5 ou 4 percolações com água destilada, de um nitossolo vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições.

	AMÔNIO		NITRATO	
	Sem SFT	Com SFT	Sem SFT	Com SFT
1 – 5 percolações				
Testemunha	0,5 aA	0,3 aB	0,2 aB	0,9 aB
Uréia	0,1 aA	0,5 aB	0,6 aB	1,7 aB
Sulfato de Amônio	0,2 aA	3,3 aB	1,2 aB	2,4 aB
Nitrato de Cálcio	0,1 bA	10,5 aa	54,1 aA	39,6 bA
6-10 percolações				
Testemunha	0,02 aA	0,5 aC	0,3 bC	6,6 aC
Uréia	0,5 bA	33,6 aa	4,4 bBC	41,9 aA
Sulfato de Amônio	3,2 bA	35,4 aa	8,8 bB	20,4 aB
Nitrato de Cálcio	3,4 aA	6,6 aB	43,3 aA	25,9 bB
11 – 15 percolações				
Testemunha	0,2 aC	2,7 aC	0,7 bC	21,6 aC
Uréia	5,2 bB	15,8 aB	19,8 bB	50,9 aA
Sulfato de Amônio	31,4 bA	40,1 aA	49,5 aA	39,2 bB
Nitrato de Cálcio	2,2 bBC	5,9 aC	17,1 bB	24,4 aC
16 – 19 percolações				
Testemunha	0,1 aB	0,2 aA	1,4 bC	10,0 aB
Uréia	10,7 aA	1,4 bA	25,7 aB	17,8 bAB
Sulfato de Amônio	12,5 aA	2,1 bA	42,1 aA	23,0 bA
Nitrato de Cálcio	0,6 aB	0,8 aA	8,02 aC	12,4 aB
Total				
Testemunha	0,9 aC	3,7 aD	2,6 bD	39,2 aC
Uréia	16,5 bB	51,4 ab	50,4 bC	112 aA
Sulfato de Amônio	47,4 bA	80,9 aa	102 aB	85,0 bB
Nitrato de Cálcio	8,2 bBC	23,8 aC	122 aA	102 bAB

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%. Maiúscula compara os fertilizantes nitrogenados; minúsculas o efeito do SFT dentro de cada tratamento de nitrogênio.

No tratamento onde foi aplicado nitrato de cálcio, a lixiviação de amônio foi pequena porque esse fertilizante não contém amônio (Figura 1.1). A perda total acumulada de amônio foi de aproximadamente 8 e 20 mg, respectivamente na ausência e presença de SFT. Ela

ocorreu nas primeiras percolações e foi maior junto com SFT, novamente devido ao efeito da competição do cálcio com o amônio existente no solo pelas cargas negativas (Figura 1.2). O amônio lixiviado nesse tratamento possivelmente é oriundo da mineralização da matéria orgânica nativa do solo.

A lixiviação de amônio, ao longo das percolações, diferiu entre os fertilizantes nitrogenados nos quatro períodos avaliados, tanto na ausência como na presença de SFT (Tabela 1.1). No primeiro período, que vai da primeira à quinta percolação, a lixiviação de amônio foi muito pequena e a maior perda ocorreu no tratamento que recebeu nitrato de cálcio na presença SFT, enquanto na ausência de SFT não ocorreu diferença entre os tratamentos. No segundo período, que vai da sexta à décima percolação, não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos na ausência de SFT; na presença de SFT, a lixiviação seguiu a seguinte ordem: sulfato de amônio = uréia > nitrato de cálcio > testemunha. No terceiro período, que envolve a décima-primeira até a décima-sexta percolação, a lixiviação de amônio teve comportamento semelhante, independente da presença ou não de SFT, e seguiu a ordem: sulfato de amônio > uréia > nitrato de cálcio = testemunha. No ultimo período, que vai da décima sexta até a décima nona percolação, a uréia e o sulfato de amônio proporcionaram a maior lixiviação de amônio na ausência de SFT; na presença de SFT a perda foi semelhante em todos os tratamentos (Tabela 1.1).

O amônio remanescente no solo após as dezenove percolações foi maior na ausência do que na presença de SFT e só diferiu entre os fertilizantes nitrogenados quando aplicados sem SFT (Figura 1.5). Na ausência de SFT, as quantidades de amônio remanescentes no solo foram altas, principalmente para a uréia, aproximadamente 45 mg kg^{-1} . Na presença de SFT, o nitrogênio remanescente foi bem mais baixo e não diferiu entre os fertilizantes.

1.4.2 Lixiviação de nitrato

A lixiviação de nitrato variou com os fertilizantes nitrogenados, independente da adição ou não de SFT (Figura 1.3). Na ausência de SFT, a perda seguiu a seqüência: nitrato de cálcio > sulfato de amônio > uréia > testemunha. Na presença de SFT, a perda de nitrato foi maior para uréia e para o nitrato de cálcio, seguido do sulfato de amônio e do tratamento com apenas SFT. No tratamento sem nitrogênio e sem P, praticamente não houve lixiviação de nitrato no decorrer das percolações, pois totalizou apenas 2,5 mg, e naquele com apenas SFT a perda se elevou para 39,2 mg (Figura 1.3). A adição de SFT ao solo aumenta a lixiviação de nitrato provavelmente devido ao estímulo na mineralização da matéria orgânica e na nitrificação indiretamente proporcionado pelo fósforo. Nesse tratamento, o nitrato lixívia combinado com o cálcio ou mesmo com algum outro cátion deslocado das cargas negativas pelo cálcio.

No tratamento onde foi aplicado uréia, a lixiviação total acumulada de nitrato foi maior na presença (113 mg) do que na ausência (50,4 mg) de SFT (Figura 1.4). No decorrer das percolações, a perda unitária máxima de nitrato chegou a 30 mg L^{-1} na décima-sétima percolação, na ausência de SFT. A adição de SFT junto com uréia antecipou a perda de nitrato para a sexta percolação, tendo havido dois picos, respectivamente na oitava percolação, de aproximadamente 55 mg L^{-1} , e na décima terceira, de aproximadamente 70 mg L^{-1} (Figura 1.4). Ernani et al., (2002) observaram que parte do N mineral adicionado na forma de uréia ao solo não lixiviou, mesmo após dez percolações sucessivas com água destilada. No primeiro período de percolação, a adição de SFT junto com a uréia não influenciou a perda de nitrato; no segundo e no terceiro períodos, a lixiviação de nitrato foi maior com SFT, invertendo-se no último período (Tabela 1.1). Tanto a antecipação das perdas como a maior lixiviação de nitrato em função da adição de SFT junto com a uréia ocorreu, provavelmente, devido ao

estímulo ocasionado pelo fósforo na nitrificação e à combinação do nitrato com o cálcio, ou com parte dos cátions deslocados por ele das cargas para a solução do solo.

No tratamento que recebeu sulfato de amônio, a lixiviação de nitrato foi antecipada, mas diminuiu pela adição de SFT, (85 mg) em relação ao tratamento sem o fertilizante fosfatado (102 mg) (Figura 1.3). A perda de nitrato iniciou na sétima percolação com o máximo tendo ocorrido na décima primeira percolação, com aproximadamente 60 mg L^{-1} , para o sulfato de amônio sozinho, e na décima terceira e na décima sétima percolações, com aproximadamente 55 mg L^{-1} , quando o fertilizante foi adicionado junto com SFT (Figura 1.4).

No primeiro período de percolação, a adição de SFT não influenciou na perda de nitrato, aumentou no segundo período, e diminuiu nos últimos dois períodos (Tabela 1.1).

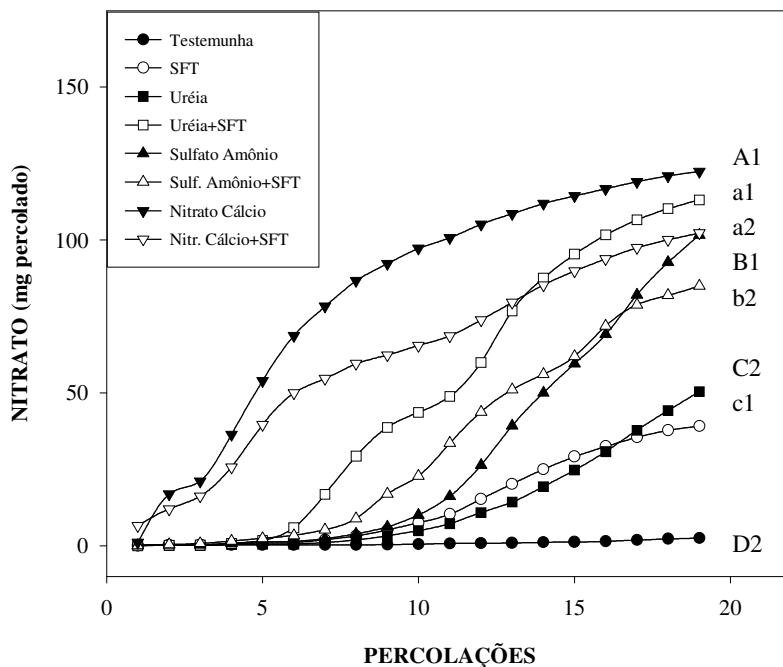


FIGURA 1.3 Quantidades acumuladas de nitrato + nitrito lixiviados de um Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo, e submetido a dezenove percolações com água destilada. Média de três repetições. (Médias seguidas pela mesma letra ou número, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%: maiúscula compara adubos na ausência de SFT, minúscula compara adubos na presença de SFT, e números compararam o efeito do SFT dentro de cada adubo).

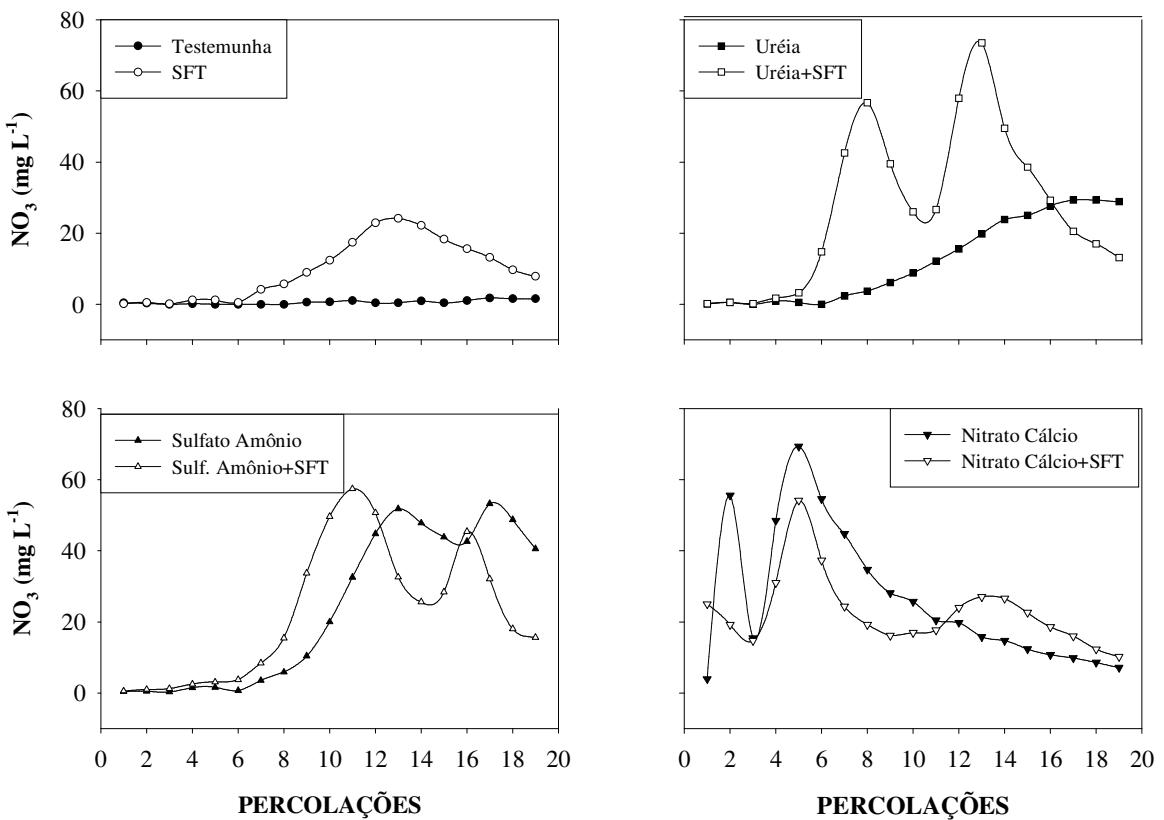


FIGURA 1.4 Concentração de nitrato lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições.

No tratamento com nitrato de cálcio, a perda de nitrato ocorreu praticamente toda no inicio das percolações e foi maior na ausência do na presença de SFT (Figura 1.4). No total das percolações, a lixiviação de nitrato no tratamento que recebeu nitrato de cálcio sozinho ou junto com SFT foi respectivamente de 122 mg e 102 mg. Sem SFT, a lixiviação iniciou na segunda percolação, com aproximadamente 55 mg L^{-1} , com pico máximo na quinta percolação, de aproximadamente 70 mg L^{-1} , decrescendo nas subseqüentes. Quando combinado com o SFT, a lixiviação iniciou já na primeira percolação, com aproximadamente 25 mg L^{-1} , com pico maior na quinta percolação, de aproximadamente 50 mg L^{-1} , mantendo uma perda média nas percolações subseqüentes de 20 mg L^{-1} (Figura 1.4). A adição de SFT

junto com nitrato de cálcio diminuiu a lixiviação de nitrato no primeiro e segundo período das percolações, aumentou no terceiro e não diferiu no último (Tabela 1.1). A perda de nitrato nas primeiras percolações foi alta quando se aplicou nitrato de cálcio porque todo o N já está na forma nítrica, não necessitando ser nitrificado. Como o nitrato não é adsorvido por meio de complexos de superfície, ele permanece todo na solução do solo, podendo ser lixiviado facilmente. A adição de SFT juntamente com o nitrato de cálcio não influenciou a lixiviação de nitrato porque o nitrato de cálcio já tem o cálcio como um cátion acompanhante, e não necessita de nitrificação.

O nitrato remanescente no solo após as dezenove percolações diferiu entre os adubos nitrogenados, porém só na ausência de SFT (Figura 1.5). Nos tratamentos só com SFT, na testemunha (sem nitrogênio e sem fósforo), e naquele com nitrato de cálcio, a quantidade remanescente de nitrogênio no solo foi de aproximadamente 10 mg kg^{-1} ; no tratamento com uréia a quantidade de nitrogênio remanescente foi a mais alta, de aproximadamente 50 mg kg^{-1} , e naquele com sulfato de amônio, foi de aproximadamente 25 mg kg^{-1} . Na presença de SFT, o nitrogênio remanescente foi baixo e semelhante para todos os fertilizantes.

1.4.3 Lixiviação de amônio + nitrato

A quantidade acumulada de amônio + nitrato lixiviada variou com os fertilizantes nitrogenados, independente ou não da adição de SFT (Figura 1.6). Na ausência de SFT, a lixiviação seguiu a sequencia: sulfato de amônio (149 mg) = nitrato de cálcio (130 mg) > uréia (67 mg) > testemunha (3,4 mg). Na presença de SFT, a seqüência foi: sulfato de amônio (166 mg) = uréia (164 mg) > nitrato de cálcio (126 mg) > tratamento sem nitrogênio (43 mg). A adição de SFT juntamente com os fertilizantes nitrogenados aumentou a lixiviação acumulada de nitrogênio total mineral (amônio + nitrato) somente no tratamento com

aplicação de uréia e na testemunha; naqueles com sulfato de amônio ou nitrato de cálcio, a adição de SFT não influenciou a lixiviação total acumulada de nitrogênio mineral (Figura 1.6).

O SFT antecipou a lixiviação de nitrogênio mineral ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) na uréia e no sulfato de amônio devido ao deslocamento de amônio para a solução pelo cálcio. Parte desse amônio nitrifica, ficando mais amônio e nitrato na solução.

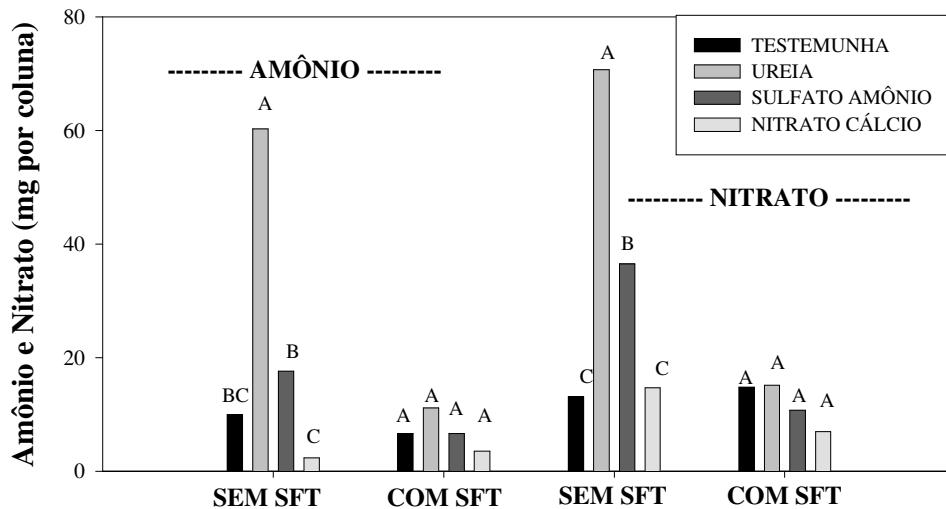


FIGURA 1.5. Valores de amônio + nitrato remanescentes no solo após dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições. (Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%, comparando o efeito do SFT dentro de cada adubo).

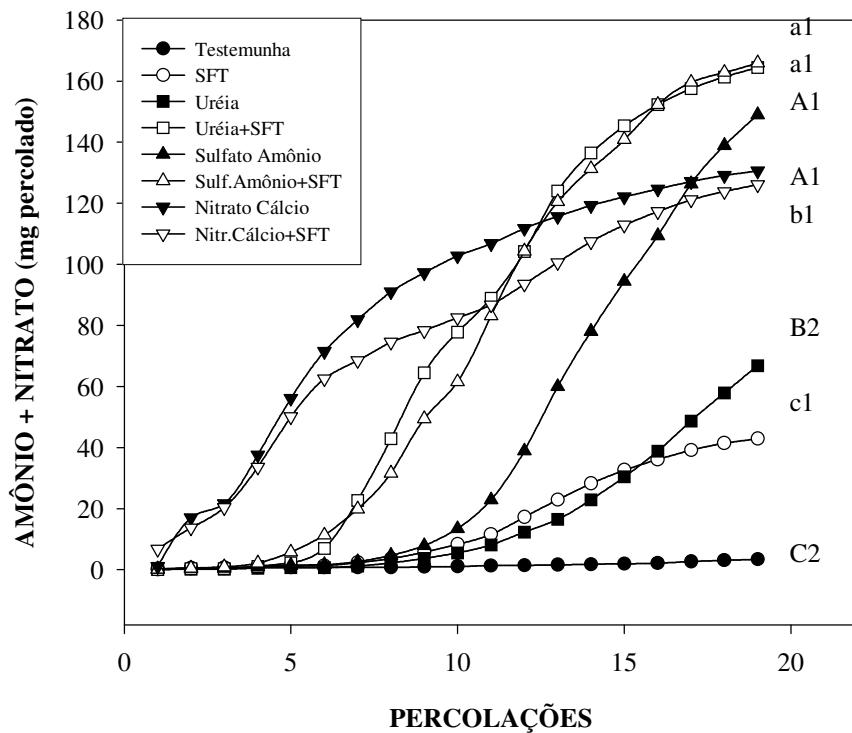


FIGURA 1.6 Quantidades acumuladas de amônio + nitrato + nitrito lixiviadas de um Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo, e submetido a dezenove percolações com água destilada. Média de três repetições. (Médias seguidas pela mesma letra ou número, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%: maiúscula compara adubos na ausência de SFT, minúscula compara adubos na presença de SFT, e números compararam o efeito do SFT dentro de cada adubo).

1.4.4 Lixiviação de cálcio magnésio e potássio e comportamento do pH e condutividade

A lixiviação de cálcio, magnésio e potássio teve comportamento semelhante ao longo das dezenove percolações (Figuras 1.7, 1.8 e 1.9). Na testemunha e no tratamento só com SFT, a lixiviação desses nutrientes foi muito baixa.

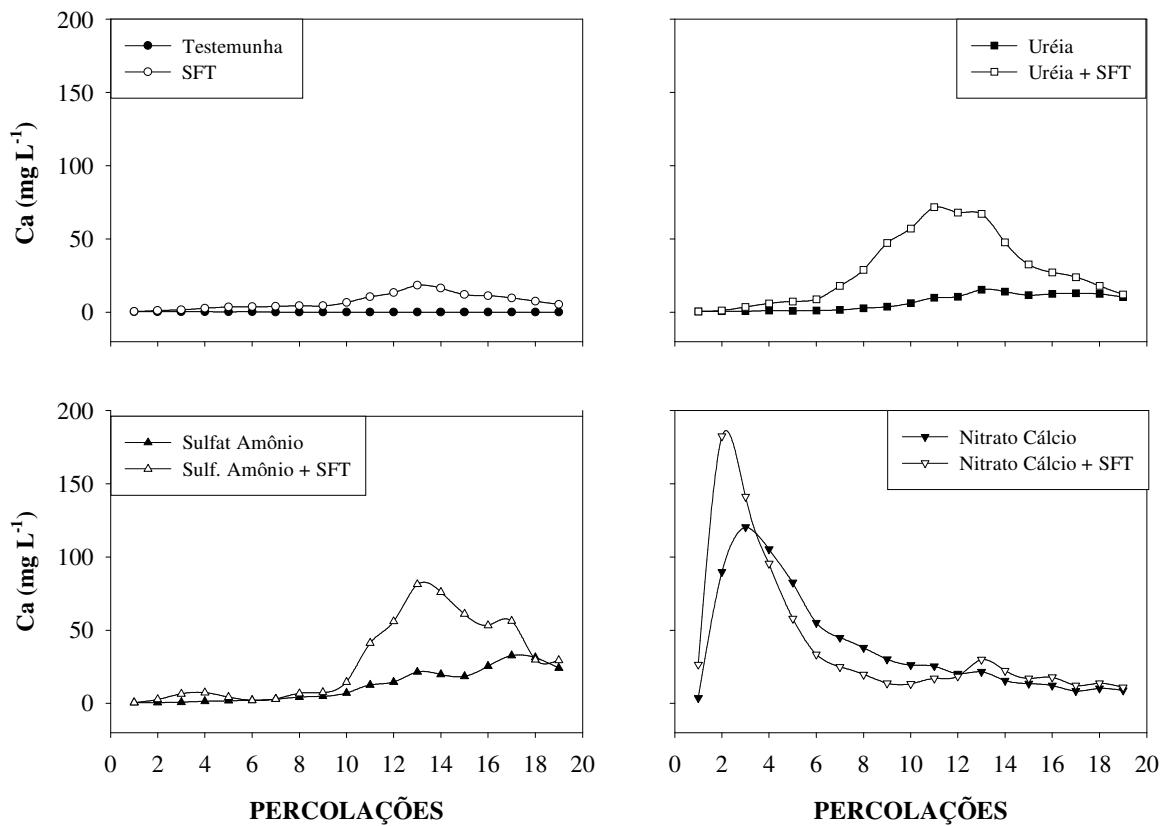


FIGURA 1.7 Concentração de cálcio lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições.

A lixiviação de cálcio só ocorreu significativamente onde foi aplicado nitrato de cálcio ou com adubos nitrogenados combinados com SFT. Os picos de perda coincidiram com os de lixiviação de nitrato mostrando que, pelo menos em parte, o nitrato desceu ligado ao cálcio (Figura 1.7). A lixiviação de cálcio, na ausência de SFT foi pequena para uréia e para o sulfato de amônio; com o nitrato de cálcio a lixiviação de cálcio ocorreu basicamente nas primeiras percolações, e atingiu pico máximo de 120 mg L^{-1} na terceira percolação. A adição de SFT aumenta a lixiviação em todos os tratamentos com fertilizantes nitrogenados: na uréia e no sulfato de amônio a lixiviação máxima ocorreu na décima-primeira percolação com 70 e 41 mg L^{-1} respectivamente; com nitrato de cálcio ocorreu na segunda percolação com 180 mg L^{-1}

L^{-1} . A alta mobilidade vertical de Ca no solo também é proveniente da aplicação de sais neutros como nitrato e sulfato, devido a incorporação de ânions acompanhantes que ficam disponíveis na solução do solo (Ritchey et al., 1980; Ernani, 1986)

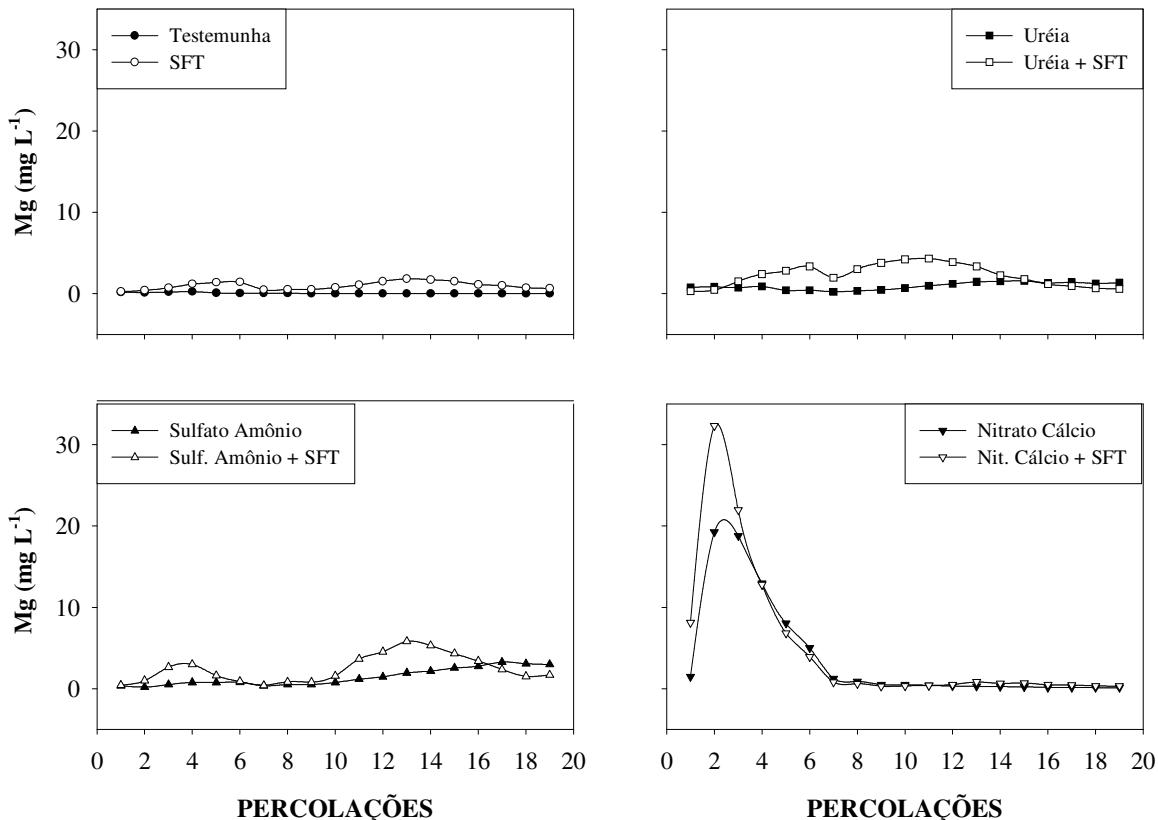


FIGURA 1.8 Concentração de magnésio lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições.

A lixiviação de magnésio ocorreu somente no tratamento com nitrato de cálcio, a qual foi intensificada pela adição de SFT. A lixiviação máxima ocorreu na segunda percolação, com 19 mg L^{-1} na ausência de SFT, e 32 mg L^{-1} em combinação com SFT (Figura 1.8). A lixiviação de magnésio foi causada após seu deslocamento pelo cálcio das cargas negativas, o qual se movimentou associado com nitrato.

A lixiviação de potássio foi pequena, em todos os tratamentos, e foi aumentada e antecipada pela adição de SFT. As perdas foram de 12 mg L^{-1} para uréia e de 14 mg L^{-1} para o sulfato de amônio combinadas com SFT (Figura 1.9).

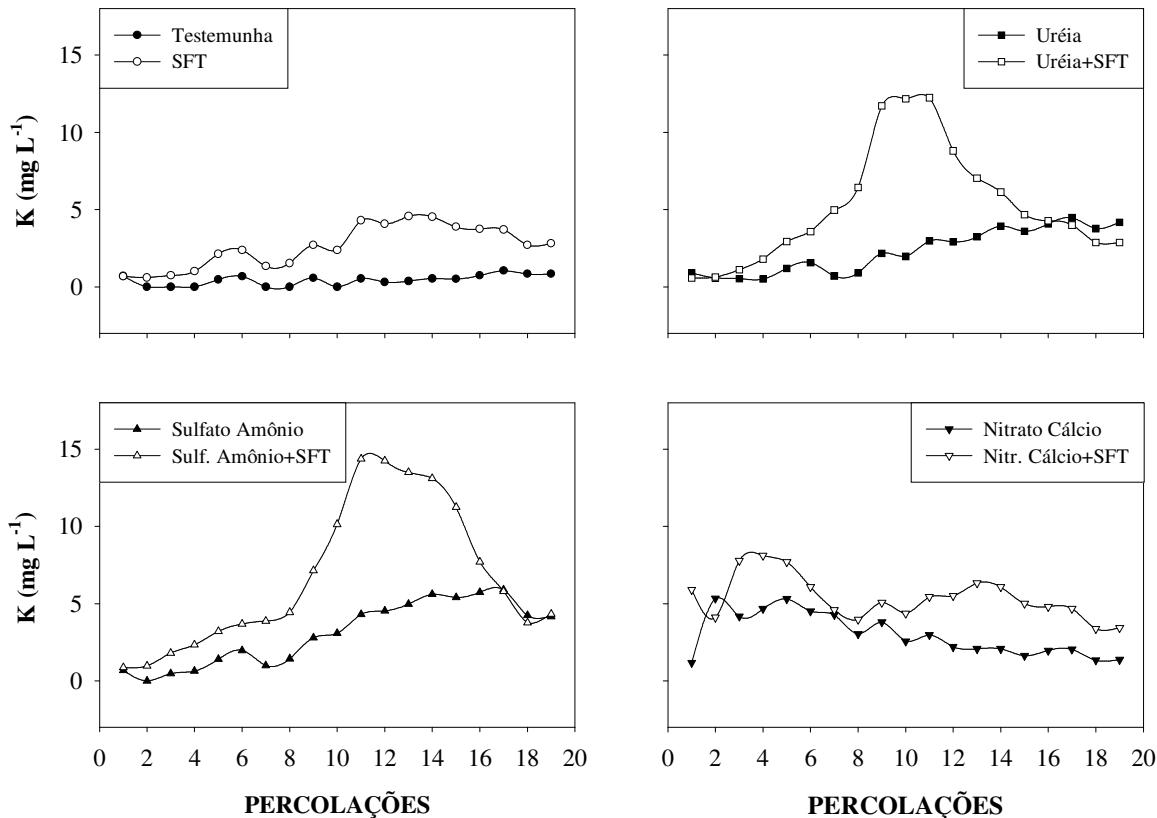


FIGURA 1.9 Concentração de potássio lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições.

A adição dos fertilizantes nitrogenados diminui o pH da solução percolada (Figura 1.10). Além do aumento da concentração de sais (Ernani & Almeida, 1986), o abaixamento do pH se deve ao deslocamento de Al das cargas elétricas pelos cátions integrantes dos fertilizantes, que em solução, o alumínio hidrolisa e diminui o pH (Ernani et al. 2004). A nitrificação também diminui o pH, devido a liberação de átomos de hidrogênio que tem efeito ácido (Blevins et al., 1983) e na dissolução do SFT que diminui o pH ao redor do grânulo (Figueiredo, 1985).

A adição de SFT, um fertilizante de dissolução ácida, diminuiu o pH da solução lixiviada somente em combinação com a testemunha e com a uréia, provavelmente porque a uréia eleva o pH nas primeiras fases de sua hidrólise (Ernani et al., 2000).

A condutividade elétrica variou com os fertilizantes e com o tempo ao longo das percolações (Figura 1.11). Em todos os tratamentos, a aplicação de SFT aumentou a condutividade elétrica no solo, mas com menor diferença no nitrato de cálcio, possivelmente devido a maior solubilidade do nitrato de cálcio que é lixiviado nas primeiras percolações. A variação nesse parâmetro foi muito similar ao comportamento verificado na lixiviação dos íons uma vez que ela reflete o incremento na concentração eletrolítica da solução do solo.

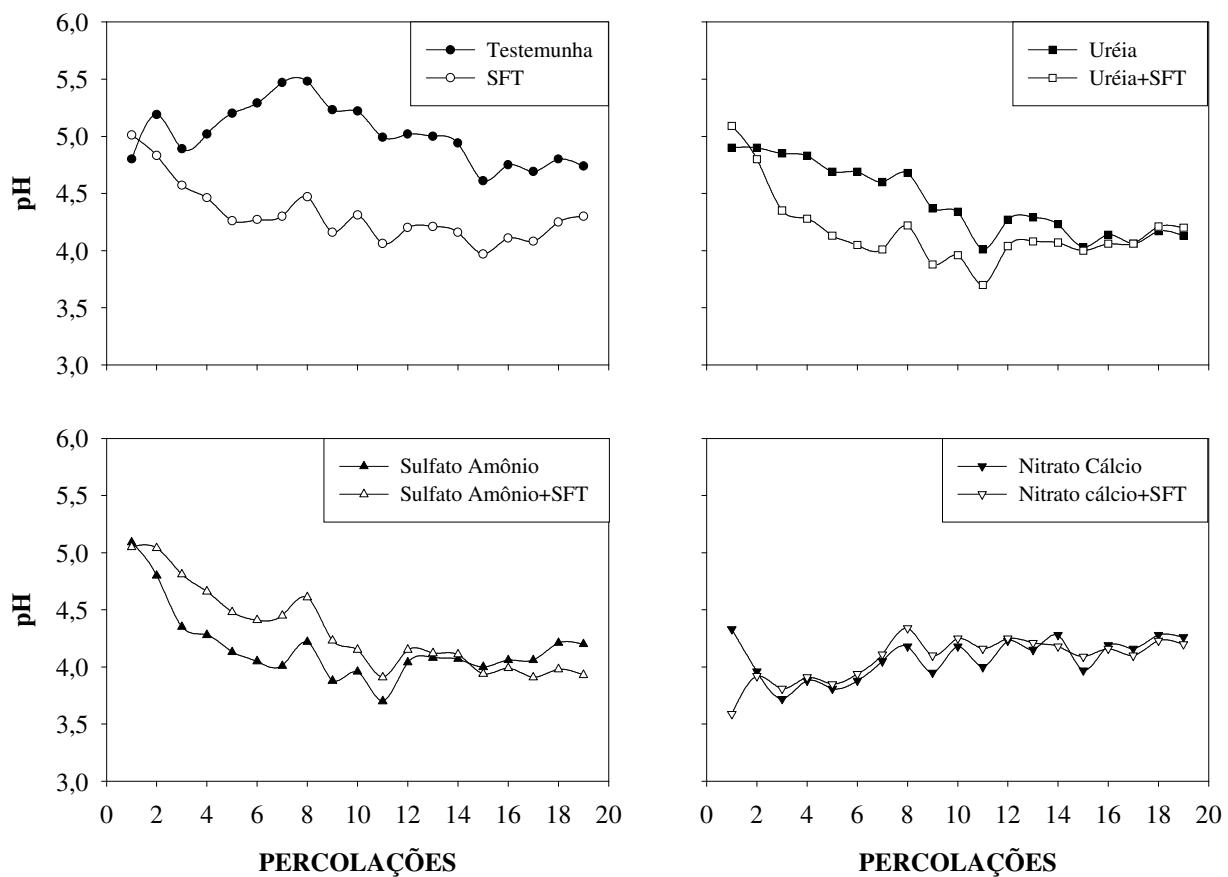


FIGURA 1.10 Valores de pH em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições.

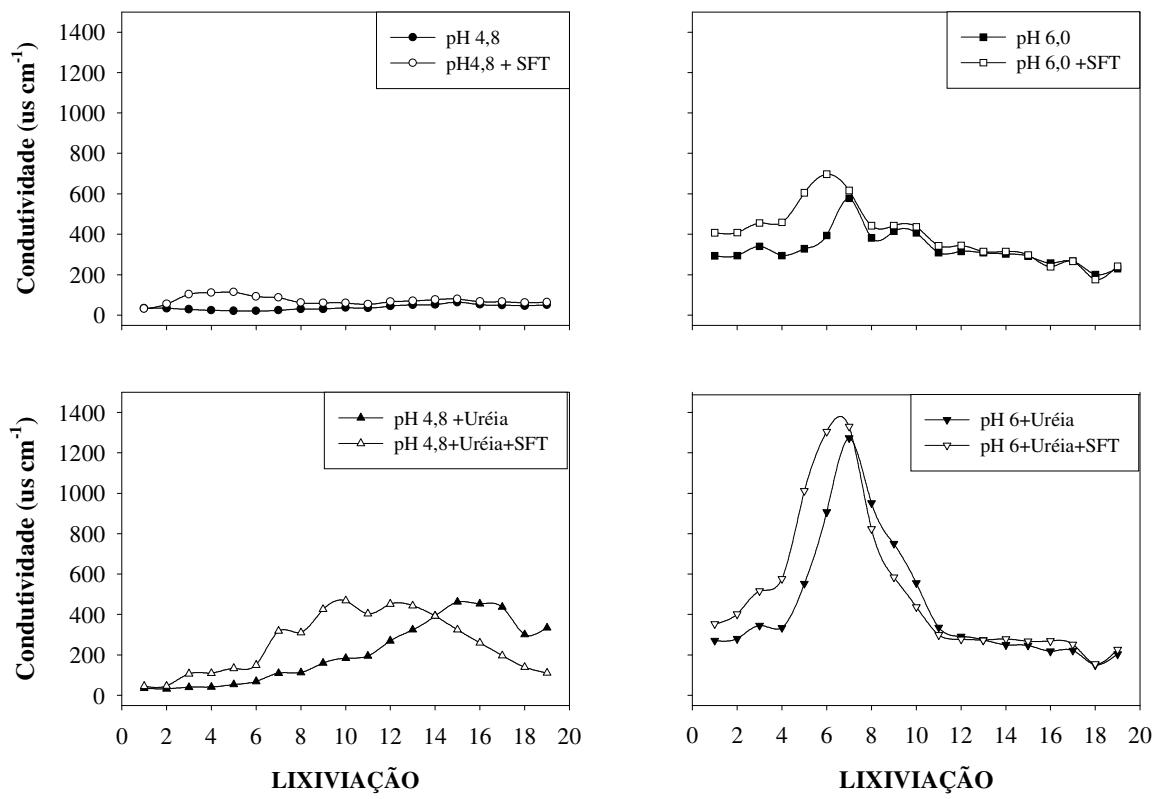


FIGURA 1.11 Valores da condutividade elétrica em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho tratado com fertilizantes nitrogenados, combinados ou não com superfosfato triplo. Média de três repetições.

1.5 CONCLUSÕES

1. A lixiviação total de nitrogênio variou com o tipo de fertilizante nitrogenado aplicado e com a presença ou não de superfosfato triplo. A forma amoniacal lixiviou muito pouco, diferentemente da forma nítrica.
2. A adição do N na forma nítrica antecipou a lixiviação de nitrato em relação à adição de N amoniacal ou amídico, pois essas duas últimas formas levam algum tempo até nitrificar.
3. O SFT aumentou a lixiviação de nitrogênio. Sendo assim, o efeito do abaixamento do pH proporcionado pelo fosfato tanto na diminuição da nitrificação quanto no aumento das cargas positivas foi menos importante do que o deslocamento do amônio das cargas negativas ocasionado pelo cálcio.
5. A lixiviação de cálcio teve um comportamento semelhante a de nitrato, evidenciando que, pelo menos em parte, esses dois íons desceram associados.

1.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AULAKH, M.S.; KHERA, T.S.; DORAN, J.W.; SINGH, K. & SINGH, B. Yields and nitrogen dynamics in a rice-wheat system using green manure and inorganic fertilizer. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 64:1867-1876, 2000.

BASSO, C.J. & CERETTA, C.A. Manejo do nitrogênio no milho em sucessão a plantas de cobertura de solo, sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, 24:905-915, 2000.

BLACK, A.S.; WARING, S.A. Nitrate leaching and adsorption in a krasnozen from Redland Bay, Qld. II. Soil factors influencing adsorption. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, 14:181-188, 1976.

BLEVINS, R.L.; THOMAS, G.W.; SMITH, M.S.; FRYE, W.W. & CORNELIUS, P.L. Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. **Soil Till. Res.**, 3:135-146, 1983.

BOLTON, E.F.; AYLESWORTH, J.W. & HORE, F.R. Nutrient losses through tile drains under three cropping systems and two fertility levels on a braokston clay soil. **Can. J. Soil Sci.**, Ottawa, 50:275-279, 1970.

CERETTA, C.A.; FRIES, M.R. **Adubação nitrogenada no sistema plantio direto**. In: NUERNBERG, N.J. Plantio direto: Conceitos, fundamentos e práticas culturais. Sociedade Brasileira de Ciência do solo, Núcleo Regional Sul, 1997. Cap 7, p. 111-120.

DROUINEAU, G. Influence of irrigation on the distribution of fertilizer elements in the soil profile. In: COLLOQUIUM OF THE INTERNATIONAL POTASH INSTITUTE, 7., Israel 1969. **Anais. Bern, International Potash Institute**, 1969. p. 96-105.

ERNANI, P.R.; BARBER, S.A.. Composição da solução do solo e lixiviação de cátions afetados pela aplicação de cloreto e sulfato de cálcio em um solo Ácido. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, 17: 41-46, 1993.

ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, J.A.L.; CAMPOS, M.L. et al. Influencia da combinação de fósforo e calcário no rendimento de milho. **R. Brás. Ci. Solo**, Viçosa, 24:537-544, 2000.

ERNANI, P.R.. Alterações em algumas características químicas da camada arável do solo pela aplicação de gesso agrícola sobre a superfície de campos nativos. **R. Brás. Ci. Solo**, Campinas, 10:241-245, 1986.

ERNANI, P.R.; ALMEIDA, J.A.. Comparação de métodos analíticos para avaliar a necessidade de calcário dos solos do estado de Santa Catarina. **R. Brás. Ci. Solo**, Campinas, 10:143-150, 1986.

ERNANI, P.R.; BAYER, C.; RIBEIRO, M.F.S.. Chemical modifications caused by liming below the limed layer in a predominantly variable charge acid soil. Communications In **Soil Science And Plant Analysis**, New York, USA, 35:889-901, 2004.

ERNANI, P.R.; SANGOI, L.; RAMPAZZO, C.. Lixiviação e imobilização de nitrogênio num Nitossolo como variáveis da forma de aplicação da uréia e da palha de aveia. **R. Brás. Ci. Solo**, Viçosa, 26:993-1000, 2002.

ERREBHI, M.; ROSEN, C.J.; GUPTA, S.C. & BIRONG, D.E. Potato yield response and nitrate leaching as influenced by nitrogen management. **Agron. J.** Madison, 90:10-15, 1998.

FIGUEIREDO, O. A.L. **Reações de superfosfato triplo e de cama de galinha poedeira com um Latossolo Bruno**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. 85p. (Tese de Mestrado).

MENEZES, R.S.C.; GASCHO, G.J.; HANNA, W.W.; CABRERA, M.L. & HOOK, J.E. Subsoil nitrate uptake by grain pearl millet. **Agron. J.** Madison, 89:189-194, 1997.

OOTMAN, M.J. & POPE, N.V. Nitrogen fertilizer movement in the soils as influenced by nitrogen rate and timing in irrigated wheat. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 64:1883-1892, 2000.

QUAGGIO, J.A. Reação do Solo e seu controle. In: SIMPÓSIO AVANÇADO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, Piracicaba, 1986. Anais. Campinas: **Fundação Cargill**, 1986. p.53-59.

RAIJ, B. & CAMARGO, O.A. de. Nitrate elution from soil columns of three Oxisols and one Alfisol. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 10., 1974, Moscow. Transactions... Moscow: Nauka Publ. House, 1974. v.2, p.385-391.

RITCHEY, K.D.; SOUZA, D.M.G.; LOBATO, E. & CORREA, O. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian savannah oxisol. **Agron. J.**, Madison, 72:40-44, 1980.

SPALDING,R.F.; EXNER, M.E.; LINDAU, C.W.; EATON, D.W. Investigation of sources of groundwater nitrate contamination in the Burbank Wallula area of Washington, USA. **Journal Hydrology**, 58:307-324. 1982.

STRONG, D.T.; SALE, P.W.G.; HELYAR, K.R. Initial soil pH affects the pH at which nitrification ceases due to self-induced acidification of microbial microsites. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, 35:565-570, 1997.

TEDESCO, M.J; VOLKWEISS, S.J; BOHNEN, H. **Análises de solo, plantas e outros materiais.** Porto Alegre: Faculdade de Agronomia, Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 188p. (Boletim Técnico, 5).

WONG, M.T.F.; HUGHES, R.; ROWELL, D.L. Retarded leaching of nitrate in acid soils from the tropics: measurement of the effective anion exchange capacity. **Journal of Soil Science, Oxford**, 41:655-663, 1990.

WONG, M.T.F.; WILD, A.; JUO, A.S.R. Retarded leaching of nitrate measured in monolith lysimeters in south east Nigeria. **Journal of Soil Science, Oxford**, 38:511-518, 1987.

II. CAPÍTULO - LIXIVIAÇÃO DE NITROGÊNIO A PARTIR DA URÉIA INFLUENCIADA PELO pH DO SOLO E PELA ADIÇÃO DE SUPERFOSFATO TRIPLO

2.1 RESUMO

A disponibilidade de N aos vegetais depende dos fatores que afetam suas reações no solo, dentre os quais: o pH, a forma de N aplicado, o fluxo de água, o tipo de solo, o teor de matéria orgânica, e as condições de mineralização. O presente trabalho objetivou avaliar a lixiviação de nitrogênio no solo a partir da adição de uréia em função de sua combinação com um fertilizante fosfatado acidificante, em dois valores de pH. O experimento foi conduzido em laboratório, num Nitossolo Vermelho (NV), com pH 4,8, 760 g kg^{-1} de argila, 40 g kg^{-1} de matéria orgânica. Os tratamentos consistiram de dois níveis de N (sem e com uréia), dois de P (sem e com SFT), na presença ou não de calagem. As doses de N e de P foram respectivamente 150 mg kg^{-1} e 751 mg kg^{-1} . A cada sete dias, durante dezenove semanas, foram realizadas percolações, adicionando 300 mL de água destilada em cada unidade experimental. A lixiviação de amônio + nitrato foi maior em pH 6,0 do que em pH 4,8, na presença do que na ausência de uréia, e na presença do que na ausência de SFT. A perda de amônio por lixiviação foi pequena, mesmo nos tratamentos com uréia, evidenciando que essa forma de N é retida nas cargas elétricas negativas. A lixiviação de nitrato foi antecipada e intensificada pela calagem, e iniciou a partir da quarta percolação mesmo nos tratamentos com uréia, evidenciando que a nitrificação demora algumas semanas para acontecer. O SFT antecipou a lixiviação de nitrato, mas não influenciou a quantidade perdida. A lixiviação de cálcio e magnésio teve o mesmo comportamento que a lixiviação de nitrato, evidenciando que, esses íons desceram associados. Conclui-se, portanto, que a lixiviação de nitrogênio é antecipada pela calagem ou pela adição de SFT, e aumentada somente pela adição de calcário.

II. NITROGEN LEACHING FROM UREA AS AffECTED BY SOIL PH AND THE ADDITION OF TRIPLE SUPERPHOSPHATE

2.1 SUMMARY

Nitrogen availability to plants depends on factors that affect N reactions in the soil, such as: pH, source of nitrogen, water flux, type of soil, organic matter content and mineralization conditions. This work was conducted aiming to evaluate nitrogen leaching derived from the addition of urea, combined with an acid source of phosphate fertilizer, at two pH values. A lab experiment was conducted in an Oxisol, with an original pH of 4,8, 760 g kg⁻¹ and 40 g kg⁻¹ of clay and organic matter, respectively. Treatments were arranged as a factorial combination of two levels of N (with and without urea), two levels of P (with and without triple superphosphate) in the presence or absence of liming. Nitrogen and phosphorus rates were 150 mg kg⁻¹ and 751 mg kg⁻¹. At each seven days, during 19 weeks, percolations were performed adding 300 ml of distilled water to each experimental unit. The ammonium + nitrate leaching was higher when liming was performed and when urea and triple superphosphate(TSP) were applied to the soil. The ammonium loss was small, even when urea was applied, showing that this form of N is retained by the soil negative electric charges. Nitrogen leaching was anticipated and stimulated by liming, beginning in the fourth percolation, even when urea was applied, which confirms that nitrification takes some time to start. The TSP accelerated nitrogen leaching but did not influence the quantity of NO₃⁻¹ lost. Calcium and magnesium leaching presented the same pattern observed with nitrate, providing evidence that these ions leached associated to each other. In conclusion, the results show that nitrogen leaching is anticipated by liming or the addition of TSF and increased only by the application of lime.

2.2 INTRODUÇÃO

O nitrogênio é um nutriente difícil de ser manejado no solo, devido ao grande número de reações que está sujeito. A dinâmica desse nutriente no solo pode causar grandes perdas, principalmente por lixiviação, a qual é influenciada pelo pH e quantidade de matéria orgânica (Ernani et al., 2002), tipo de solo (Aulakh et al., 2000; Sangoi et al., 2003), preparo do solo (Sims et al., 1998), forma de aplicação dos fertilizantes nitrogenados (Howard & Essigton, 1998; Sims et al., 1998) e pelo fluxo de água no solo (White, 1987).

O pH do solo afeta as perdas de nitrogênio como também sua disponibilidade no solo, devido a maior atividade dos microrganismos (Ernani et al., 2005), ao aumento na quantidade de cargas elétricas (Albuquerque et al., 2000), à estabilidade dos agregados, e às reações de troca de cátions e ânions, de adsorção química, precipitação, dissolução e oxi-redução.

A calagem é realizada com o objetivo de reduzir a acidez e a atividade do alumínio na solução, e assim como a adubação fosfatada, influencia na capacidade de adsorção de amônio. Tanto a calagem quanto a adubação fosfatada causam aumento na quantidade de cargas negativas e concomitante redução da quantidade de cargas positivas do solo (Smyth & Sanchez, 1980; Naidu et al., 1990). Com o aumento das cargas elétricas negativas, diminui a lixiviação de amônio, que migra da solução do solo para as cargas negativas criadas, e aumenta a lixiviação de nitrato devido a inexistência de qualquer mecanismo de adsorção.

Além disso, a calagem aumenta a mineralização (Gianello et al., 2000; Rosolem et al., 2003) e a nitrificação (Rosolem et al., 1991; Hayatsu & Kosuge, 1993; Kreutzer, 1995; Silva & Vale, 2000; Rosolem et al., 2003) disponibilizando nitrogênio às plantas e aumentando a lixiviação de nitrato no perfil do solo, independentemente do modo de aplicação do corretivo (Rosolem et al., 2003). Quando há percolação de água no solo, as perdas de N por lixiviação podem ser altas, independentemente do manejo da adubação nitrogenada. Em solo com pH baixo, a lixiviação de N é retardada quando o fertilizante nitrogenado é aplicado sobre a superfície do solo (Ernani el al., 2002) e isto pode facilitar a absorção do N pelas plantas. Em solos com boa aeração e pH não muito baixo, o amônio é convertido rapidamente em nitrato (Raij, 1983). Essa reação é indesejável, pois enquanto o amônio pode ficar retido nas cargas elétricas negativas, o nitrato permanece totalmente na solução do solo, passível de ser lixiviado, caso haja percolação de água no perfil do solo.

A uréia é o fertilizante nitrogenado mais usado no Brasil, principalmente em função do baixo custo e da alta concentração de nitrogênio. Ela contém o N na forma amídica ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$), com necessidade de duas reações até atingir a forma de nitrato: hidrolise, para atingir a forma de amônio, e posterior nitrificação. A necessidade dessas reações tende a retardar o início do processo de lixiviação, uma vez que o amônio é retido pelas cargas elétricas negativas do solo antes de ser nitrificado. Na reação de hidrólise, que é efetuada pela enzima uréase, há formação de carbonato de amônio que se decompõe rapidamente, produzindo amônio, hidroxila e o ânion bicarbonato. A hidroxila e o bicarbonato elevam o pH do solo ao redor dos grânulos de uréia (Ernani et al., 2001). Nesta reação, se a uréia for aplicada na superfície do solo, o amônio produzido em contato com pH mais elevado converte-se em amônia. Parte dela se perde-se por volatilização; se for incorporado ao solo, as mesmas reações ocorrem, porém, durante a difusão da amônia em direção à superfície do solo, ela encontra partículas de solo com valores de pH mais baixo que aqueles existentes ao

redor dos grânulos e se transforma em amônio novamente, que pode ser adsorvido às cargas negativas do solo ou ser transformado em nitrato. Na segunda reação (nitrificação), ocorre a liberação de dois átomos de hidrogênio para cada molécula de amônio nitrificada, diminuindo assim o pH, com o efeito ácido da nitrificação do amônio (Blevins et al., 1983). O nitrato por ser extremamente móvel no solo e não ser adsorvido quimicamente, permanece todo na solução do solo, sujeito a ser lixiviado.

Uma alternativa para diminuir as perdas de nitrogênio por lixiviação, principalmente na forma de nitrato, é inibir a reação de nitrificação, e isso pode ser feito pela diminuição do pH do solo através da adição de algum fertilizante de ação acidificante juntamente com os fertilizantes nitrogenados amídicos ou amoniacais. A dissolução do superfosfato triplo (SFT) diminui o pH ao redor do grânulo (Figueiredo, 1985; Ernani et al., 2000). Quando o SFT é aplicado a campo, as alterações de pH ocorrem somente nas regiões adjacentes aos grânulos, mas podem ser importantes, principalmente nos períodos iniciais subsequentes à aplicação dos fertilizantes, onde a magnitude das reações é grande.

O SFT é um fosfato de cálcio que além de fósforo também supre cálcio ao solo. A aplicação de SFT aumenta o cálcio trocável principalmente na ausência de calagem (Ernani et al., 2000). Em solos calcariados, a eficiência do SFT em suprir cálcio dependerá do tipo de precipitado de fósforo que se formará, pois um aumento dos valores de cálcio poderá resultar em maior precipitação desse nutriente com o fósforo (Akinremi & Cho, 1991). O aumento de Ca^{2+} no solo poderá competir e deslocar outros cátions das cargas negativas do solo para solução, ou ficar na solução, podendo ser perdido por lixiviação juntamente com um ânion.

O presente trabalho objetivou avaliar a lixiviação de nitrogênio no solo em função da adição de uréia, combinada ou não com fertilizantes acidificantes, em diferentes valores de pH do solo.

2.3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em laboratório, no Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV) da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), em Lages, SC, em 2004. Foi utilizado um Nitossolo vermelho (NV), coletado em área de campo nativo deste município, com pH-H₂O = 4,8, Al³⁺ = 30 mmol_c kg⁻¹, Ca = 7 mmol_c kg⁻¹, Mg = 5 mmol_c kg⁻¹, P = 1,8 mg L⁻¹, K = 58 mg L⁻¹, 760 g kg⁻¹ de argila; 40 g kg⁻¹ de matéria orgânica (M.O.), e uma necessidade de calcário para elevar o pH-H₂O até 6,0 de 10 t ha⁻¹.

Os tratamentos consistiram da combinação fatorial de dois níveis de nitrogênio (sem e com uréia), dois níveis de fósforo (sem e com superfosfato triplo, SFT) e dois valores de pH (sem e com calagem). As doses de N e de P foram respectivamente de 150 e 751 mg kg⁻¹, (com base em solo seco), totalizando respectivamente 200 e 1000 mg por unidade experimental. Nos tratamentos com calcário, foi utilizada uma proporção de três partes de carbonato de cálcio para uma parte de carbonato de magnésio, totalizando 5,0 g kg⁻¹ de solo. Os tratamentos foram arranjados no delineamento completamente casualizado, com três repetições.

As unidades experimentais foram constituídas por colunas de lixiviação, confeccionadas a partir de canos de PVC com 30 cm de altura e 10 cm de diâmetro. A base das colunas foi vedada com uma tampa, também de PVC, a qual continha um orifício central

com aproximadamente 3 mm de diâmetro para permitir a saída gravitacional da solução percolada. A metade inferior da coluna foi envolta com saco plástico transparente, na forma de funil, que continha um furo na extremidade inferior para facilitar a saída da solução percolada diretamente para os frascos de coleta. Em cada coluna o volume ocupado pelo solo foi de aproximadamente 1,9 L, sendo que cada unidade experimental continha 1,33 kg de solo (base seca) distribuídos nos 25 cm inferiores ficando 5 cm na parte superior da coluna sem solo para facilitar a adição de água. Os tratamentos foram misturados com 40% do volume total do solo incorporado a 5 cm de profundidade ficando 20% do solo na superfície e os 40% restantes na parte inferior. As colunas foram acondicionadas em suportes de madeira, a fim de permitir a colocação dos frascos de coleta embaixo delas.

Uma semana após a transferência do solo para as colunas, iniciaram-se as percolações. A cada sete dias, durante dezenove semanas, adicionaram-se 300 mL de água destilada sobre a superfície de cada coluna, na velocidade aproximada de 5 mL por minuto, por meio de equipo de soro. A solução percolada foi coletada no dia seguinte, e nela determinou-se o volume, pH, condutividade elétrica, as concentrações de amônio e nitrato, cálcio, magnésio e potássio. O nitrogênio foi determinado por arraste de vapor, em aparelho semi-micro-Kjehdahl, de acordo com Tedesco et al. (1985); Ca, Mg por espectrofotometria de absorção atômica e K por espectrofotometria de emissão.

A quantidade total de cada nutriente lixiviado durante as dezenove lixiviações em que o experimento foi conduzido foi calculada e dividida em períodos de 1 a 5, 6 a 10, 11 a 15 e 16 a 19 lixiviações somando-se a quantidade lixiviada em cada período.

Ao final do experimento, coletou-se amostras de solo de cada unidade experimental e nelas quantificou-se o amônio e nitrato remanescente, extraída com KCl 1 mol L^{-1} , determinado como descrito anteriormente.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F ($P<0,05$), e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey.

2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.4.1 Lixiviação de amônio

A lixiviação de amônio foi pequena e variou com o pH e com a adição de uréia e SFT, mas não houve interação entre os tratamentos de nitrogênio e de fósforo (Tabela 2.1). No solo sem calagem, com pH 4,8, a lixiviação total acumulada foi maior na presença (13,7 mg) do que na ausência (2,7 mg) de uréia, e na presença de SFT (10,5 mg) em relação à ausência desse fertilizante fosfatado (5,9 mg). Quando o solo recebeu calcário, elevando o pH para 6,0, a lixiviação total de amônio não foi influenciada pela adição de uréia, porém foi menor nos tratamentos com SFT do que sem SFT. Isso mostra que o amônio adicionado fica retido nas cargas elétricas negativas, pois o tratamento com uréia recebeu 200 mg de N por coluna.

TABELA 2.1 Média de amônio lixiviado acumulado, de um Nitossolo Vermelho submetido a dezenove percolações com água destilada, em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.

Tratamentos	pH 4,8		pH 6,0	
	Sem SFT	Com SFT	Sem SFT	Com SFT
----- mg percolado -----				
Sem uréia	B 2.7 b		A 9.3 a	
Com uréia	A 13.7 a		A 9.3 b	
Média SFT	5,9 B	10,5 A	9,9 A	8,7 B

Médias seguidas pela mesma letra, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%: letra maiúscula antes da média, na coluna, compara o efeito da uréia em cada pH, letra minúscula, na linha, compara o efeito do pH na ausência e na presença de uréia; e letra maiúscula após as médias posterior, na linha, compara o efeito do SFT em cada pH.

A lixiviação total acumulada de amônio nos tratamentos que receberam uréia, independente da adição ou não de SFT, foi maior no pH 4,8 do que em pH 6,0; nos tratamentos sem uréia, ocorreu o contrário, ou seja, a lixiviação de amônio foi maior no pH 6,0 do que no pH 4,8 (Tabela 2.1). Com a aplicação de calcário ao solo, há um aumento das cargas elétricas negativas, que pode ter contribuído para maior retenção de amônio (Araújo et al., 2004), disponibilizando-o em menor quantidade para a solução do solo. Nos tratamentos onde não foi aplicado nitrogênio, as perdas foram maiores no solo calcariado (Figura 2.1), possivelmente em função do efeito benéfico da elevação do pH sobre a mineralização da matéria orgânica do solo (Gianello et al., 2000).

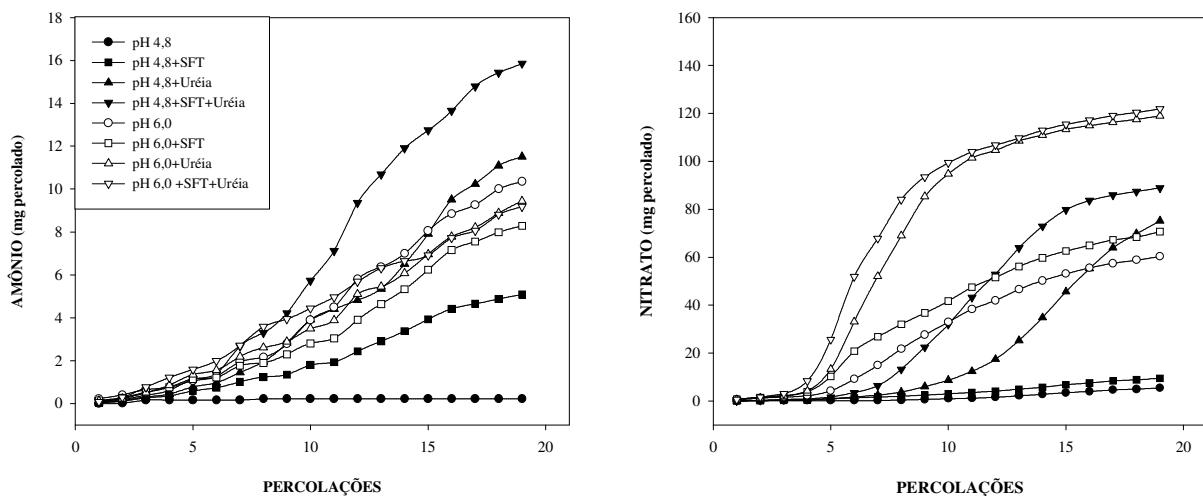


FIGURA 2.1 Quantidades acumuladas de amônio e nitrato lixiviadas de um Nitossolo Vermelho submetido a dezenove percolações com água destilada, em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.

A lixiviação de amônio nos diversos tratamentos teve o mesmo comportamento ao longo das percolações (Figura 2.1). Ela foi intensificada em todos os tratamentos a partir sexta ou sétima percolação. No solo sem calagem e onde não foi aplicado nitrogênio, a lixiviação foi praticamente nula ao longo das dezenove percolações; naquele somente com SFT, ela aumentou, principalmente a partir da décima-segunda percolação. Neste mesmo pH, a lixiviação de amônio onde foi aplicado uréia apresentou maior pico entre a décima e a

décima-segunda percolação; e no tratamento com uréia em combinação com SFT o pico de maior lixiviação ocorreu entre a décima-terceira e décima-quarta percolação, sendo este o tratamento que proporcionou a maior quantidade de amônio lixiviada. No solo calcariado, com pH 6,0, a lixiviação de amônio teve comportamento semelhante entre os tratamentos no decorrer das percolações.

O amônio remanescente no solo após as dezenove percolações não diferiu entre os tratamentos (Figura 2.2). A máxima quantidade remanescente não ultrapassou aos 18 mg kg^{-1} , evidenciando que no final das dezenove semanas praticamente todo o N adicionado pela uréia foi convertido para nitrato.

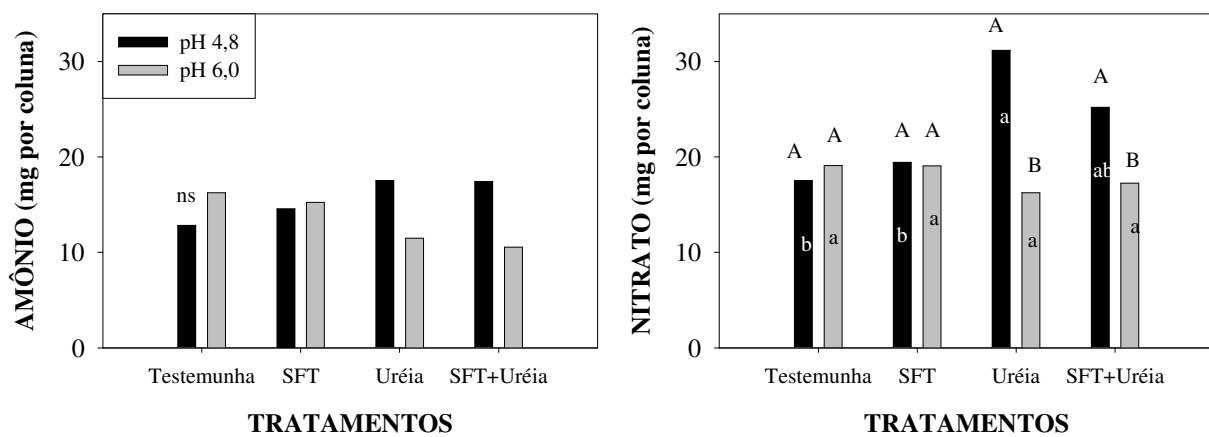


FIGURA 2.2 Valores de amônio e nitrato remanescentes no solo após dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições. (Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%; maiúscula comparando pH dentro dos tratamentos e minúscula comparando os tratamentos em cada valor de pH. ^{ns} Não-significativo).

2.4.2 Lixiviação de nitrato

A lixiviação de nitrato variou com o pH do solo (Tabela 2.2). Não houve interação entre o pH e a adição de SFT como também entre a adição de N e SFT. No tratamento onde não houve a aplicação de fertilizante nitrogenado, a perda de nitrato foi elevada no solo com acidez corrigida, sendo significativamente superior ao tratamento sem correção. Na presença de uréia, a perda de nitrato também foi maior no solo calcariado, à semelhança do obtido por Araújo et al. (2004). A lixiviação de nitrato em todos os tratamentos que receberam calcário foi maior do que naqueles sem calagem provavelmente devido ao aumento da quantidade de cargas negativas no solo, uma vez que o nitrato não é adsorvido por complexos de esfera interna (Albuquerque et al., 2000), e da taxa de nitrificação (Silva & Vale, 2000) o proporcionada pela elevação do pH.

TABELA 2.2 Média de nitrato lixiviado acumulado, de um Nitossolo Vermelho submetido a dezenove percolações com água destilada, em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.

Tratamentos	pH 4,8	pH 6,0
----- mg percolado -----		
Sem Uréia	7,5 bB	65,5 aB
Com uréia	82,1 bA	120 aA

Médias seguidas pela mesma letra, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%: letra maiúscula, na coluna, compara o efeito da uréia em cada pH, e letra minúscula, na linha, compara o efeito do pH na ausência e na presença de uréia.

A lixiviação de nitrato variou com a adição de uréia (Tabela 2.2). Tanto no solo sem calagem como naquele calcariado, a lixiviação total de nitrato foi maior nos tratamentos que receberam uréia relativamente àqueles sem N. No solo com pH 4,8, a perda de nitrato no tratamento sem uréia foi de apenas 8%, enquanto que no solo com pH 6,0 foi de 35% do total. A maior lixiviação de nitrato na testemunha calcariada se deveu a maior mineralização da matéria orgânica do solo proporcionada pela elevação do pH.

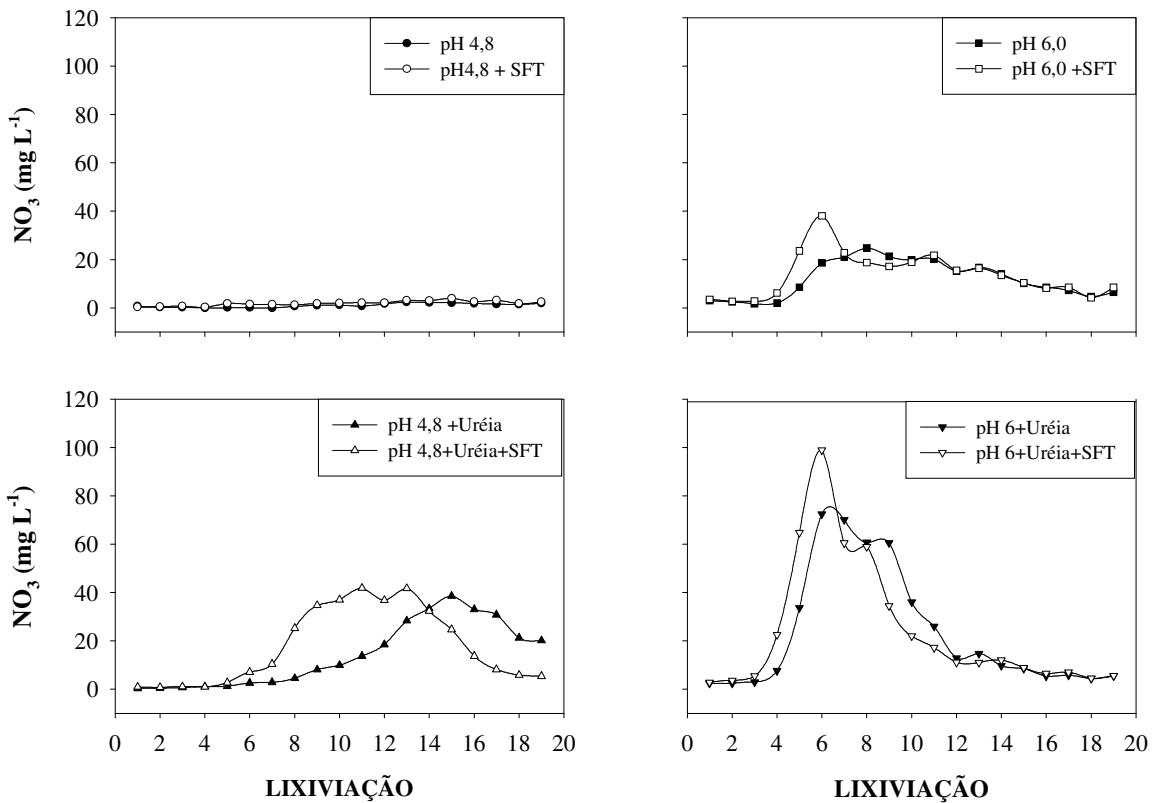


FIGURA 2.3 Concentração de nitrato lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.

Considerando a média dos fatores principais, a lixiviação de nitrato foi maior no pH 6,0 (92,0 mg) do que no pH 4,8, (44,8 mg); maior com uréia, (101 mg), do que sem uréia (36,5 mg); e maior com SFT (72,8 mg) do que sem SFT (65,0 mg).

A lixiviação total acumulada de nitrato variou com os tratamentos (Figura 2.1). No pH 4,8, sem aplicação de nenhum fertilizante, e no tratamento com SFT, a lixiviação acumulada de nitrato foi pequena, totalizando 5,5 e 9,5 mg, respectivamente; no solo calcariado, a lixiviação acumulada foi de 60 e 70 mg, respectivamente, nesses mesmos tratamentos. Nos tratamentos com uréia, a lixiviação acumulada foi de 75 e 89 mg, respectivamente na ausência e na presença de SFT no pH 4,8; e de 119 e 122 mg, respectivamente, no pH 6,0. Estas perdas elevadas de nitrato, podem contaminar as águas subterrâneas (Muchovej & Rechcigl, 1995).

A perda de nitrato durante as dezenove percolações foi antecipada pela calagem (Figura 2.3). No pH 4,8, na ausência de uréia, a lixiviação de nitrato foi praticamente nula, independente da presença ou não de SFT. No pH 6,0, na ausência e na presença de SFT, a lixiviação foi bem maior e iniciou na quinta percolação: na presença de SFT o pico máximo foi de aproximadamente 40 mg L^{-1} na sexta percolação enquanto que, na ausência de SFT foi de aproximadamente 25 mg L^{-1} , na oitava percolação. Nos tratamentos com uréia, em pH 4,8, a lixiviação de nitrato foi antecipada pela adição de SFT, com perda a partir da sexta percolação e pico máximo de aproximadamente 40 mg L^{-1} na décima-primeira percolação; na ausência de SFT a lixiviação iniciou a partir da nona percolação e o pico máximo ocorreu na décima-quinta com aproximadamente 40 mg L^{-1} . Nos tratamentos com uréia, em pH 6,0, a lixiviação iniciou na quarta percolação com máximo na sexta percolação, tanto na presença como na ausência de SFT, cujos valores máximos foram de aproximadamente 100 e 70 mg L^{-1} , respectivamente (Figura 2.3). A lixiviação de nitrato foi antecipada e ocorreu em maior quantidade no solo calcariado devido a maior rapidez da mineralização e posteriormente da nitrificação do N do solo. O mesmo ocorreu nos tratamentos com SFT provavelmente devido ao estímulo ocasionado pelo fósforo na nitrificação associado à combinação do nitrato com o cálcio presente neste adubo, ou com cátions deslocados pelo cálcio das cargas para a solução do solo.

O nitrato remanescente variou com o pH e com a adição de N (Figura 2.2). O nitrato remanescente no solo não diferiu entre os quatro tratamentos no pH 6,0; no pH 4,8, entretanto, o tratamento com uréia apresentou os maiores valores, de aproximadamente $30 \text{ mg coluna}^{-1}$. Na comparação entre os valores de pH, o N remanescente foi maior no pH 4,8 do que no pH 6,0 porém só para os dois tratamentos com uréia.

2.4.3 Lixiviação de amônio + nitrato

A lixiviação de amônio + nitrato foi influenciada pelo pH, tanto na presença como na ausência de uréia (Tabela 2.3). Nos dois valores de pH, a lixiviação de amônio + nitrato foi maior na presença do que na ausência de uréia. Tanto na presença como na ausência de uréia, a lixiviação de nitrogênio mineral foi bem maior no pH 6,0 do que no pH 4,8. No solo sem calagem, a perda de amônio + nitrato no tratamento sem N foi de apenas 10%, enquanto que no solo calcariado foi de 37%. A lixiviação de amônio + nitrato foi semelhante à lixiviação de nitrato, devido a quantidade de nitrato ter sido varias vezes maior que a de amônio, diferindo um pouco na quantidade, mas não no comportamento.

Considerando-se a média dos efeitos principais, a lixiviação de amônio + nitrato foi maior no pH 6,0 (102 mg), do que no pH 4,8 (53 mg); foi maior com uréia (112 mg) do que sem (42 mg); e foi maior com SFT (82 mg) do que sem SFT (72 mg).

TABELA 2.3 Média de amônio + nitrato lixiviado acumulado de um Nitossolo Vermelho submetido a dezenove percolações com água destilada, em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.

Tratamentos	pH 4,8	pH 6,0
	mg percolado	
Sem Uréia	10,2 bB	74,8 aB
Com uréia	95,7 bA	130 aA

Médias seguidas pela mesma letra, não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5%: letra maiúscula na coluna, compara o efeito da uréia em cada pH, e letra minúscula na linha, compara o efeito do pH na ausência e na presença de uréia.

2.4.4 Lixiviação de cálcio magnésio e potássio e comportamento do pH e condutividade

A lixiviação de cálcio e magnésio teve comportamento semelhante em todos os tratamentos nas dezenove percolações (Figuras 2.4 e 2.5). No solo com pH 4,8, a lixiviação de cálcio e magnésio foi praticamente nula, mesmo quando foi aplicado SFT. Onde foi aplicada uréia, neste mesmo pH, a lixiviação aumentou com pico máximo de aproximadamente 30 mg

L^{-1} para cálcio e 15 mg L^{-1} para magnésio. A lixiviação desses cátions foi antecipada pela presença de SFT (Figura 2.4 e 2.5) e coincidiu com a lixiviação de nitrato. Quando o solo foi calcariado, as quantidades máximas lixiviadas de cálcio nos tratamentos sem uréia e sem SFT, sem uréia e com SFT, com uréia e sem SFT, e com uréia e com SFT foram respectivamente de 45, 75, 90 e 110 mg L^{-1} , e as de magnésio foram respectivamente de 15, 30, 40 e 55 mg L^{-1} (Figura 2.4 e 2.5). As perdas desses cátions coincidiram com as de nitrato, mostrando que estes íons lixiviaram associados (Cahn et al., 1993). Nos solos que recebem calcário, o cálcio e o magnésio passam a predominar as cargas negativas, e a partir das percolações, parte deles são deslocados para a solução do solo, que em combinação com nitrato e através do fluxo de água são perdidos por lixiviação. Este mesmo comportamento ocorreu quando foi aplicado SFT devido ao cálcio presente no SFT.

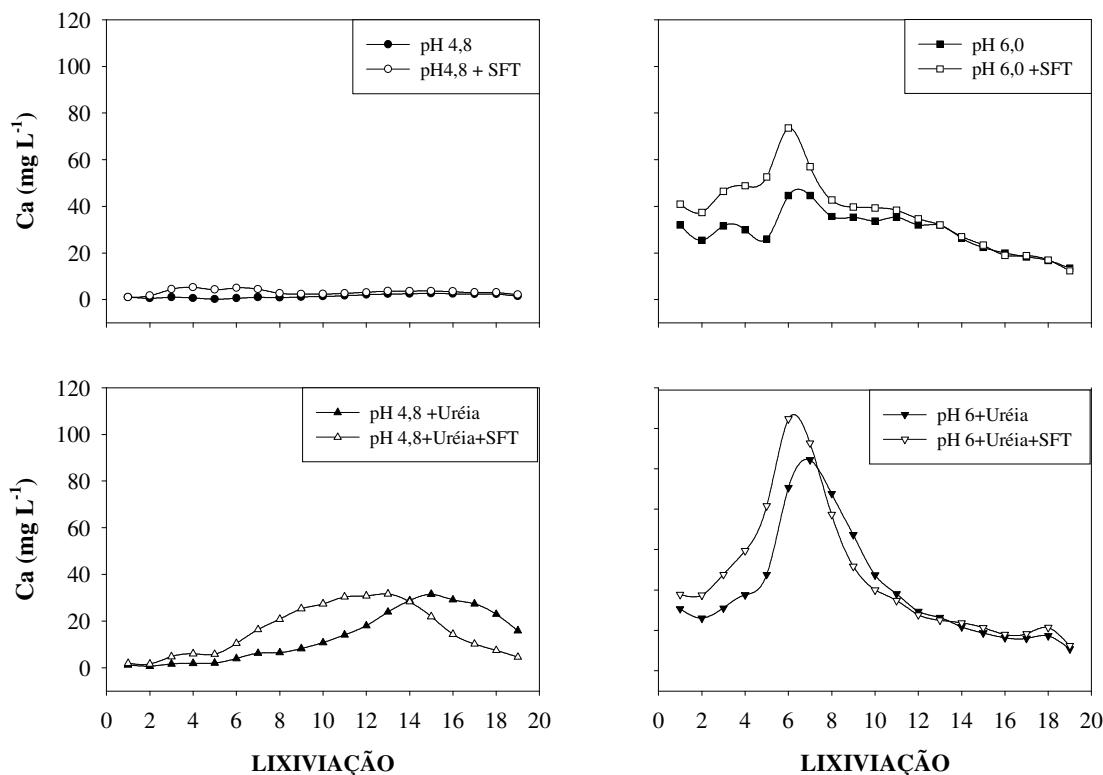


FIGURA 2.4 Concentração de cálcio lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH tratado. Média de três repetições.

A lixiviação de potássio ocorreu apenas nos tratamentos com uréia, no solo não calcariado (Figura 2.6). A perda foi maior com SFT do que sem SFT, e em ambos os casos, o amônio e o cálcio competiram com o potássio pelas cargas negativas. Nos demais tratamentos a lixiviação de potássio foi pequena, à semelhança dos dados obtidos por Chaves & Libardi (1995). A redução das perdas de potássio pela calagem está associada ao aumento da retenção de bases provocada pela liberação de cargas negativas dependentes do pH (Quaggio et al. 1982).

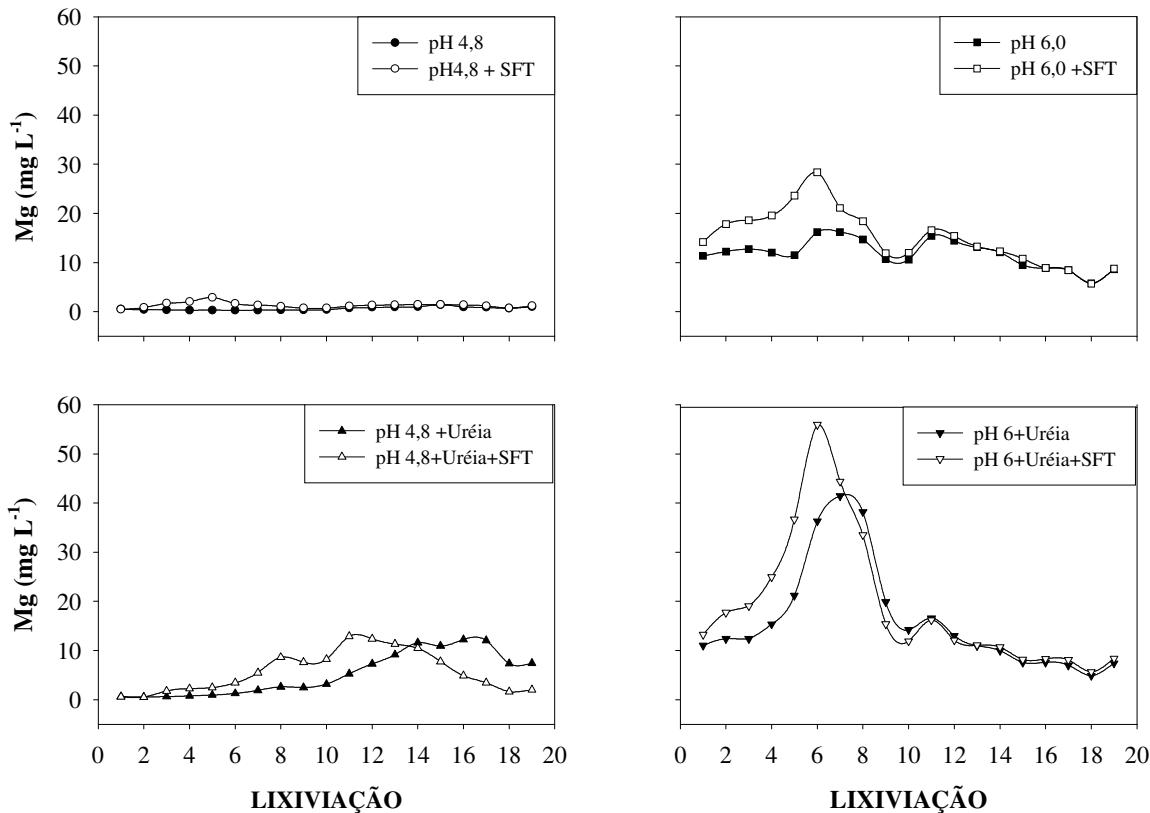


FIGURA 2.5 Concentração de magnésio lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.

No solo sem calagem, a adição de uréia bem como de SFT diminuíram o pH da solução percolada (Figura 2.7). A diminuição do pH se deveu ao deslocamento do alumínio das cargas negativas pelo, o qual cálcio e amônio hidrolisa na solução liberando íons H^+ . No

solo calcariado, o pH da solução percolada praticamente não foi afetado por nenhum tratamento.

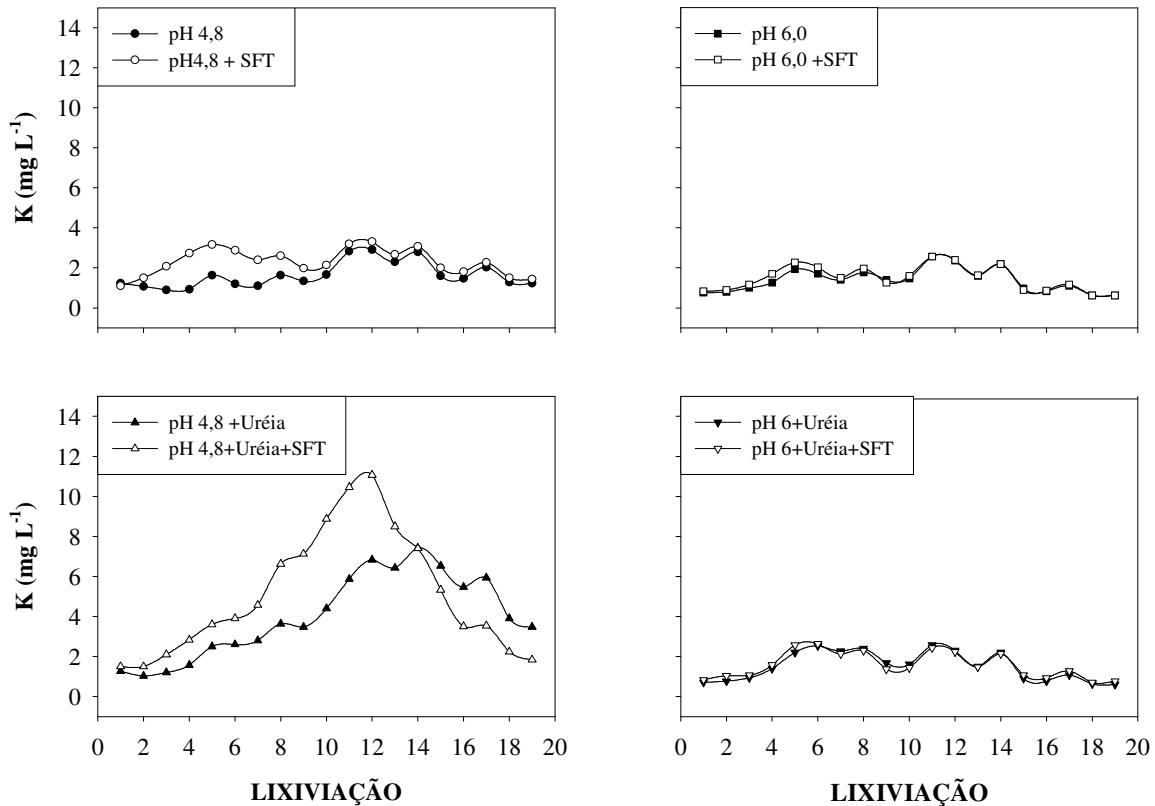


FIGURA 2.6 Concentração de potássio lixiviado em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.

A condutividade elétrica da solução percolada teve o mesmo comportamento verificado na lixiviação de cálcio, magnésio e nitrato (Figura 2.8), uma vez que o aumento desses íons na solução aumenta a concentração eletrolítica da mesma.

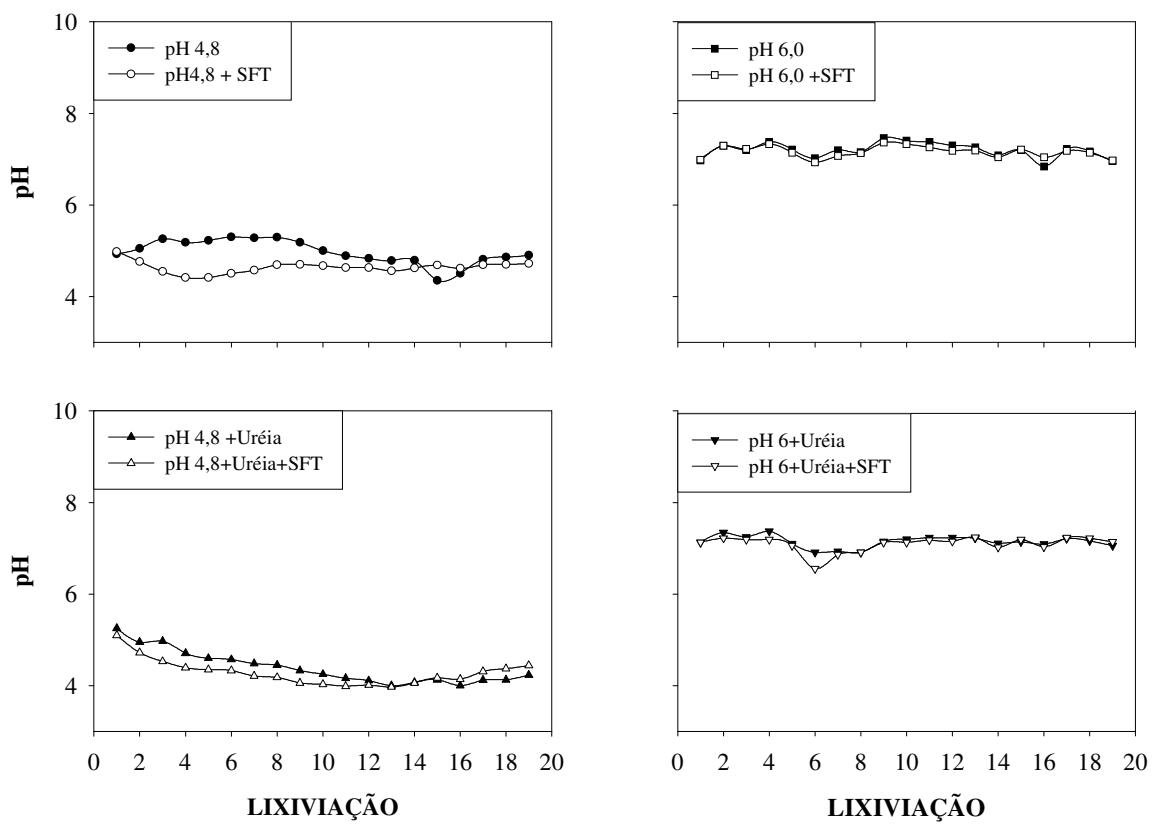


FIGURA 2.7 Valores de pH em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.

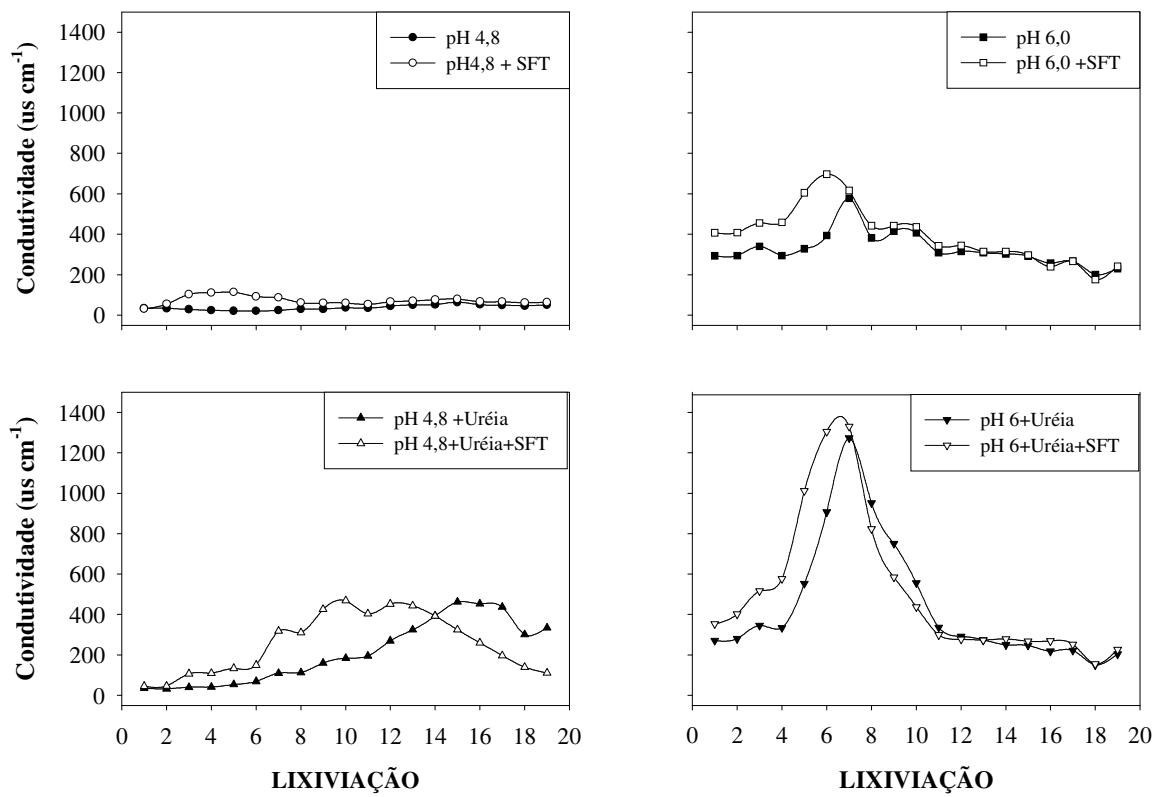


FIGURA 2.8 Valores da condutividade elétrica em cada uma das dezenove percolações com água destilada a que foi submetido num Nitossolo Vermelho em função da combinação de uréia e superfosfato triplo em dois valores de pH. Média de três repetições.

2.5 CONCLUSÕES

1. A correção da acidez do solo para pH 6,0 proporciona maior lixiviação de amônio + nitrato na presença de uréia e SFT.
2. A perda de amônio por lixiviação é pequena, mesmo nos tratamentos que recebem uréia, mostrando que esse cátion é retido pelas cargas negativas do solo.
3. A lixiviação de nitrato é antecipada e intensificada pela calagem. As perdas iniciam somente a partir da quarta percolação, mesmo na presença do fertilizante nitrogenado. O SFT antecipa a lixiviação de nitrato no solo calcariado, mas não influencia a quantidade lixiviada. No solo sem calagem, a perda de nitrato, oriundo da uréia é antecipada pela combinação com SFT, mas não intensificada.
4. A lixiviação de cálcio e magnésio apresenta o mesmo comportamento que a lixiviação de nitrato, evidenciando que, pelo menos em parte, o nitrato desce associado a esses dois cátions.

2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKINREMI, O.O. & CHO, C.M. Phosphate transport in calcium-saturated systems: II. Experimental results in a model system. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 55:1282-1287, 1991.
- ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; ERNANI, P.R. & FONTANA, E.C. Propriedades físicas e eletroquímicas de um latossolo Bruno afetadas pela calagem. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, 24:295-300, 2000.
- ARAÚJO, A.R.; CARVALHO, J.L.N.; GUILHERME, L.R.G.; CURI, N & MARQUES, J.J. Movimentação de nitrato e amônio em colunas de solo. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, 28:537-541, 2004.
- AULAKH, M.S.; KHERA, T.S.; DORAN, J.W.; SINGH, K. & SINGH, B. Yields and nitrogen dynamics in a rice-wheat system using green manure and inorganic fertilizer. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 64:1867-1876, 2000.
- BLEVINS, R.L.; THOMAS, G.W.; SMITH, M.S.; FRYE, W.W. & CORNELIUS, P.L. Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. **Soil Till. Res.**, 3:135-146, 1983.
- CAHN, M.D.; BOULDIN, D.R.; CRAVO, M.S.; BOWEN, M.T. Cation and nitrate leaching in an Oxisol of the Brazilian Amazon. **Agronomy Journal**, Madison, 85:334-340, Mar./Apr. 1993.
- CHAVES, L.H.G. & LIBARDI, P.L. Lixiviação de potássio e cálcio mais magnésio influenciada pelo pH. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, 19:145-148, 1995.
- ERNANI, P.R; SANGOI, L & RAMPAZZO, C. Influência do método de aplicação da uréia e dos restos culturais de aveia preta na lixiviação de nitrogênio e no rendimento de matéria seca do milho. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v.25, 2002.
- ERNANI, P.R.; NASCIMENTO, J.A.L.& CAMPOS, M.L. et al. Influencia da combinação de fósforo e calcário no rendimento de milho. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, 24:537-544, 2000.

ERNANI, P.R.; SANGOI, L. & RAMPANZO, C.. Lixiviação e imobilização de nitrogênio num Nitossolo como variáveis da forma de aplicação da uréia e da palha de aveia. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, 26: 993-1000, 2002.

ERNANI, P.R.; STECKLING, C. & BAYER, C. Características químicas de solo e rendimento de massa seca de milho em função do método de aplicação de fosfatos, em dois níveis de acidez. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, 25:939-946, 2001.

ERNANI, P. R.; SANGOI, L.; LECH, V. A. & RAMPANZO, C. A forma de aplicação da uréia e dos resíduos vegetais afeta a disponibilidade de nitrogênio. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 1, 2005. (No prelo).

FIGUEIREDO, O.A.L. **Reações de superfosfato triplo e de cama de galinha poedeira com um Latossolo Bruno**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. 85p. (Tese de Mestrado).

GIANELLO, C.; CAMARGO, F.A.O.; REICHMANN, E. & TEDESCO, M.J. Avaliação da disponibilidade de nitrogênio do solo estimada por métodos químicos. **R. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, 24:93-101, 2000.

HAYATSU, M.& KOSUGE, N. Effects of urea fertilization and liming on nitrification in Cerrados soils (Brazil). **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokyo, 39:367-371, 1993.

HOWARD, D.D. & ESSINGTON, M.E. Effects of surface-applied limestone on the efficiency of urea-containing nitrogen sources for no-till corn. **Agron. J.**, 90:523-528, 1998.

KREUTZER, K. Effects of forest liming on soil processes. **Plant and Soil**, Dordrecht, 168/169:447-470, 1995.

MUCHOVÉJ, R.M.C.& RECHCIGL, J.E. Nitrogen fertilizers In: RECHCIGL, J.E. (Ed.) **Soil amendments and environmental quality**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1995. p.1-64.

NAIDU, R.; SYERS, J.K.; TILLMAN, R.W. & KIRKMAN, J.H. Effect of liming and added phosphate on charge characteristics of acid soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, 41:157-164, 1990.

QUAGGIO, J.A.; DECHEN, A.R. & RAIJ, B. Efeito da aplicação de calcário e gesso sobre a produção de amendoim e lixiviação de bases no solo. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, 6:189-194, 1982.

RAIJ, B. van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba, Instituto Internacional da Potassa, 1983. 142p.

ROSOLEM, C.A.; PEREIRA, H.F.M.; BESSA, M.A. & AMARAL, P.G. Nitrogen in soil and cotton growth as affected by liming and nitrogen fertilizer. In: WRIGHT, R. J. (Ed.). **Plant-soil interactions at low pH**. Dordrecht: Kluwer, 1991. p. 321-325.

ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S. & OLIVEIRA, R.H. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, 38:301-309, 2003.

SANGOI, L.; ERNANI, P.R.; LECH, V.A. & RAMPAZZO, C. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da uréia e manejo dos restos culturais de aveia em solos com texturas contrastantes. **Ciência Rural**, Santa Maria, 33:65-70, 2003.

SILVA, C. A. & VALE, F. R. do. Disponibilidade de nitrato em solos brasileiros sob efeito da calagem e de fontes e doses de nitrogênio. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, 35:2461-2471, 2000.

SIMS, A.L.; SCHEPERS, J.S.; OLSON, R.A. & POWER, J.F. Irrigated corn yield and nitrogen accumulation response in a comparison of no-till and conventional till: tillage and surface-residue variables. **Agron. J.**, 90:630-637, 1998.

SMYTH, T.J. & SANCHEZ, P.A. Effects of lime, silicate and phosphorus application to an Oxisol on phosphorus sorption and ion retention. **Soil Science Society of America. Journal**, Madison, 44:500-505, 1980.

TEDESCO, M.J; VOLKWEISS, S.J; BOHNEN, H. **Análises de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia**, Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 188p. (Boletim Técnico, 5).

WHITE, R.E. Leaching. In: WILSON, J. R. **Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems**. Wallingford : C.A.B. International, 1987. p.193-211.