

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Potencialidade de impacto ambiental por nitrato, doses de N e flutuações do lençol freático para a cultura do milho sob sistema de drenagem

Marcos Emanuel da Costa Veloso

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Agronomia. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Piracicaba
2006

V
E
L
O
S
O

M
E
C

D
O
U
T
O
R
A
D
O

2
0
0
6

Marcos Emanuel da Costa Veloso
Engenheiro Agrônomo

**Potencialidade de impacto ambiental por nitrato, doses de N e flutuações do lençol freático
para a cultura do milho sob sistema de drenagem**

Orientador:

Prof. Dr. **SERGIO NASCIMENTO DUARTE**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Agronomia. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem**

Piracicaba

2006

A Deus,

Aos meus pais Antônio Veloso e Maria Veloso,

À minha esposa Madaila,

A todos os meus familiares,

Aos meus amigos.

DEDICO

Ao meu irmão Joaquim da Costa Veloso e
minha sogra Edite da Rocha Guimarães
(*ambos in memoriam*)

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

A Deus, presente em todos os momentos, pela fé e perseverança.

À Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), pela oportunidade de realização do Curso.

À Escola Superior de Agronomia “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), por intermédio do Departamento de Engenharia Rural, pela oportunidade oferecida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Prof. Dr. Sergio Nascimento Duarte, pelos anos de convívio, pelo apoio, pelas eficientes orientações, pela compreensão, pelos conhecimentos e, sobretudo, pela amizade.

Aos professores Dr. Durval Dourado Neto, Dr. Jarbas Honorio e Dr. Décio Eugênio Cruciani, pelas contribuições e pelas sugestões feitas no exame de qualificação.

Aos meus pais, pela minha formação com base nos ensinamentos cristãos.

À Madaíla, pelo carinho, pela compreensão, pelo estímulo e pela sua participação na coleta de dados, nos feriados e finais de semana, do nosso trabalho de tese.

Aos meus irmãos, pelo incentivo.

Aos professores Dr. José Antonio Frizzone, Dr. Durval Dourado Neto, Dr. Marcos Vinicius Folegatti, Dr. Paulo Leonel Libardi, Dr. Paulo César O. Trivelin, Dr. Antonio Roberto Pereira, Dr. Jorge Gustavo da Graça Raffo, Dr. Antônio Carlos A. Gonçalves, Dr. Décio Barbin e Dr. Iran José Oliveira da Silva pelos ensinamentos, exemplo e amizade.

Ao Pesquisador da Embrapa Meio-Norte Dr. Valdemício Ferreira de Sousa pela sua disponibilidade, orientação e acompanhamento junto a Embrapa, em nível de conselheiro institucional.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP Sra. Davilmar, Sr. Antônio, Afonso, Gilmar e Hélio; do Departamento de Produção Vegetal Helena, Erreinaldo e Wilson, pela amizade e pelo auxílio indispensável durante a fase experimental do trabalho.

Ao colega Dr. Carlos Pereira pelas orientações na coleta de dados do milho no estádio fenológico de grãos farináceos, em nível de campo.

Aos meus amigos Francisco Edinaldo e Francilene, Nildo Dias, Edson Cabral e Lazara, Luiz Gonzaga e Cleide, Marconi Batista, Dolorice Moreti, Ana Maria, Miguel Toledo e Chrystiane, Lúcio Flavo e Toinha, Eugênio Emérito e Jamila, Rodrigo Câmara e Priscylla, Rogério Airoidi, Tadeu Miranda, Hudson Carvalho, Ralini Melo, Tales Miler, Waleska Eloi, Manuel Januário, Antônio Claretti, Euro e Margarida, Ceres e Brivaldo, Sérgio Weiner, César Nogueira e Liliosa, Kelte e Saionara, Ronaldo Soares e demais colegas contemporâneos da pós-graduação pela amizade e convivência fraterna em todos os momentos.

E finalmente, a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho, meus agradecimentos.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	8
ABSTRACT	9
2 DESENVOLVIMENTO	12
2.1 Revisão bibliográfica.....	12
2.1.1 Considerações gerais	12
2.1.2 Sistemas de drenagem artificial e o ambiente.....	14
2.1.3 Solos de várzeas e as perdas de N por desnitrificação	23
2.1.4 Adubação nitrogenada na cultura do milho	25
2.1.5 Recomendações, uso e manejo do nitrogênio na cultura do milho	34
2.1.6 Soma do excesso de água (SEW ₃₀)	39
2.2 Material e métodos	40
2.2.1 Local e caracterização da área experimental	40
2.2.2 Implantação da cultura do milho na área experimental.....	44
2.2.3 Análise química do teor de N total no florescimento e após a maturação fisiológica	47
2.2.4 Avaliações fenológicas no estágio farináceo e após a maturação fisiológica do milho.....	48
2.2.5 Produção de milho e seus componentes	51
2.2.6 Instalação de equipamentos e monitoramento de parâmetros hídricos	54
2.2.7 Análise de nitrato nos efluentes	60
2.2.8 Análise estatística.....	60
2.3 Resultados e discussão	61
2.3.1 Caracterização das precipitações pluviais	61
2.3.2 Tensão da água no solo.....	63
2.3.3 Recargas do lençol freático.....	65
2.3.4 Caracterização das descargas dos drenos subterrâneos.....	66
2.3.5 Índice de estresse na cultura do milho (SEW ₃₀)	68
2.3.6 Concentrações de nitrato nos drenos, poços de observação, extratores de solução e valetas.....	70
2.3.7 Teor de N total nas plantas de milho	76
2.3.7.1 Teor de N total nas folhas de milho	76
2.3.7.2 Teor de N total na matéria seca da parte aérea do milho	78

2.3.7.3 Teor de N total na massa seca dos grãos de milho	80
2.3.8 Índice de área foliar	81
2.3.9 Índice de colheita	83
2.3.10 Componentes da planta e produtividade do milho	85
2.3.10.1 Estande final do experimento	85
2.3.10.2 Nitrogênio total na parte aérea de plantas de milho	86
2.3.10.3 Teor de nitrogênio total nos grãos de milho	87
2.3.10.4 Altura de plantas e de inserção de espigas de milho	88
2.3.10.5 Produtividade de grãos de milho (13% de teor de água)	89
2.3.10.6 Produtividade de massa seca da palhada de milho	94
2.3.10.7 Produtividade de brácteas secas de milho	96
2.3.10.8 Produtividade de massa seca de sabugo de milho	97
2.3.10.9 Número de espigas por hectare	98
2.3.10.10 Número de fileiras de grãos por espiga de milho	99
2.3.10.11 Massa de mil grãos de milho	101
2.3.10.12 Comprimento médio das espigas de milho	104
2.3.10.13 Diâmetro das espigas de milho	105
2.3.10.14 Número de grãos por espiga de milho	106
2.3.10.15 Número de grãos por fileira de espiga de milho	108
2.3.10.16 Prolificidade de espiga de milho	109
3 CONCLUSÕES	111
REFERÊNCIAS	112

RESUMO

Potencialidade de impacto ambiental por nitrato, doses de N e flutuações do lençol freático para a cultura do milho sob sistema de drenagem

O nitrogênio é o nutriente absorvido em maior quantidade pelo milho, o de maior custo e influencia diretamente na resposta da cultura em produtividade de grãos, sendo a uréia o fertilizante mais utilizado na agricultura brasileira; entretanto, o manejo inadequado do nitrogênio pode trazer sérios problemas de poluição para o ambiente. Os objetivos do presente trabalho foram: (a) verificar a potencialidade de poluição por nitrato em áreas de várzea cultivadas com milho com diferentes doses de nitrogênio, na forma de uréia; (b) quantificar o efeito das flutuações do lençol freático e das doses de nitrogênio na produtividade da cultura relativa de milho; e (c) verificar o efeito do nitrogênio nos componentes da planta e produção do milho. O experimento foi desenvolvido na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, em Piracicaba-SP. O sistema de drenagem foi constituído por 15 drenos subterrâneos de 45 m, espaçados de 10 m. Utilizou-se um delineamento experimental de blocos casualizados, com cinco tratamentos (0; 50; 100; 150 e 200 kg ha⁻¹ de N) e três repetições. Cada parcela possuía um dreno subterrâneo e um poço de observação. Foram realizados monitoramentos de nitrato, avaliações fenológicas, concentração de N na folha de milho, produção de milho e seus componentes. A precipitação pluvial registrada no período foi de 562 mm. Concluiu-se que a adubação nitrogenada não afetou a qualidade de água nas descargas dos drenos por nitrato; que o índice de estresse (SEW₃₀) respondeu de forma linear crescente às produtividades relativas dos grãos de milho revelando que as flutuações do lençol freático, em função das chuvas, ao longo do ciclo da cultura, contribuíram para o aumento da produtividade de grãos da cultura de milho; que a aplicação de nitrogênio em dose crescente proporcionou aumento de forma linear e positivo para os parâmetros de teor de nitrogênio total na folha e nos grãos; que houve resposta quadrática às doses crescentes de nitrogênio para altura de planta e de inserção de espiga de milho; produtividade de grãos (13% de teor de água); massa de matéria seca da palhada de milho e brácteas; número de grãos por espiga e número de grãos por fileira.

Palavras-chave: *Zea mays*, drenos, lixiviação, ambiente, uréia

ABSTRACT

Potentiality of environmental impact for nitrate, N rates and water table fluctuation for crop corn under drainage system

The nitrogen is the nutrient mostly absorbed by corn, being largest cost and which best responds to grain productivity. The urea is mostly used the fertilizer in Brazilian agriculture and inadequate nitrogen management practices can bring serious pollution problems to the environment. The objectives of the present work were: (a) to verify the pollution potentiality for nitrate in low land cultivated with corn with different nitrogen rates, in the urea form; (b) to quantify the effect of the water table fluctuation and nitrogen rates in the relative productivity of the corn crop; and (c) to verify the nitrogen effect on plant components and corn yield. The field experiment was carried out at Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", University of São Paulo, in São Paulo state, Brazil. The drainage system consisted of 15 underground drains of 45 m, 10 m spaced. The experimental design consisted of complete randomized blocks with five treatments (0; 50; 100; 150 and 200 kg ha⁻¹ N) and three replications. Each plot had an underground drain and an observation well. Drainage nitrate concentration was accomplished, phenological evaluation, nitrogen concentration in the corn leaves, corn yield and its components, were done. The registered rainfall in the period was 562 mm. It was concluded that the application of nitrogen did not affect water quality in drain discharges in relation to nitrate; the stress index (SEW₃₀) responded in a growing linear way for the relative grain corn productivities, showing that water table fluctuations due to rainfall, during the crop cycle, contributed to increase corn productivity; nitrogen application in growing rates lead to a linear and positive increase of nitrogen content in leaf and grain; a quadratic response to growing nitrogen rates was found in relation to plant height and corn cob insertion; grain yield (13% moisture); straw dry mass; dry mass of husk; number of grains per corn cob and number of grains per row.

Keywords: *Zea mays*, drains, leaching, environment, urea

INTRODUÇÃO

A crise ambiental é cada vez maior na Terra, crescendo juntamente com o aumento desordenado da população, que ocorre em forma exponencial, especialmente nos grandes centros urbanos, contribuindo para a redução da qualidade de vida e provocando um desequilíbrio nos recursos naturais e aumento da poluição, especialmente a médio e longo prazo. A população do planeta passou de 2,5 bilhões em 1950 para seis bilhões em 2000. Esse aumento acentuado da população começou a ocorrer após a Revolução Industrial (BRAGA et al., 2002).

O milho, em função de seu uso na alimentação humana, animal, biocombustível e um elevado potencial produtivo, associado a sua composição química e valor nutritivo, constitui-se num dos mais importantes cereais cultivados e comercializados no mundo. O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, superado pelos EUA seguido da China. O nitrogênio (N) é o nutriente absorvido em maior quantidade por essa cultura, o de maior custo, e também o que mais influencia na resposta em produtividade de grãos, sendo a uréia o fertilizante nitrogenado mais utilizado na agricultura brasileira; entretanto, o manejo inadequado do N pode trazer sérios problemas de poluição para o ambiente.

As áreas de várzeas no Brasil são estimadas em trinta milhões de hectares. Essas áreas caracterizam-se por apresentar problemas de drenagem, possuir solos de média a alta fertilidade, apresentar proximidade a corpos d'água, representando grande potencial para a produção de alimentos. A exploração racional dessas áreas requer, geralmente, a implantação de sistema de drenagem e um manejo adequado do sistema solo-água-plantat-atmosfera. A exploração intensiva de várzeas drenadas, geralmente, tem levado à aplicação de altas dosagens de fertilizantes, podendo contribuir para o desequilíbrio ambiental, especialmente por nitrato (NO_3^-).

O nitrato é um íon que promove o crescimento de algas e outras plantas aquáticas nos corpos d'água de superfície, o que afeta a qualidade da água para uso doméstico, recreação e dizima a população de peixes, por reduzir o teor de oxigênio na água. Para a saúde humana, a toxicidade de NO_3^- em altas doses tem efeito vasodilatador/cardiovascular e pode causar envenenamento fatal em crianças por escassez de oxigênio (metahemoglobinemia).

O custo para a remoção do íon NO_3^- da água por troca iônica ou outro método de tratamento é elevado. Portanto, a identificação de fontes de NO_3^- e uso de boas práticas de manejo agrícola na bacia hidrográfica pode contribuir para reduzir o movimento de NO_3^- que chega aos reservatórios para consumo humano.

O nitrato é uma substância química altamente solúvel que pode ser facilmente lixiviada da zona radicular das plantas e, assim, pode contaminar a água subterrânea. Entretanto, descargas de água subterrânea oriunda de drenos são escoadas naturalmente para os corpos d'água de superfície onde o nitrogênio lixiviado do sistema radicular aparece.

Uma boa alternativa para avaliar e conhecer os níveis de nitrato presente nos campos agrícolas em regiões úmidas é monitorar o efluente de drenos, para o qual, geralmente, são convergidos todos os possíveis resíduos de fertilizantes utilizados. Nas regiões de clima úmido do Brasil há carência de estudos de lixiviação de nitrato nas descargas dos drenos, em função de doses crescentes de N no cultivo do milho em solos de várzeas com sistemas de drenagem subterrânea implantados. O melhor conhecimento desse fenômeno dentro das condições brasileiras é muito importante, pois propiciará a elaboração de estratégias e medidas preventivas ou minimizadoras de prováveis impactos ambientais, facilitando a gestão dos recursos hídricos da região.

Do exposto anteriormente, considera-se relevante o desenvolvimento de pesquisa sobre o comportamento do íon nitrato em áreas de várzeas das regiões brasileiras de clima sub-úmido e úmido, cultivada com milho sob adubação nitrogenada e que contribua efetivamente para o desenvolvimento sustentável e melhoria da qualidade de vida do homem nessas regiões. Neste contexto estabeleceram-se as hipóteses de que o incremento da dose de N potencializa a lixiviação de nitrato em solos de várzea; a altura da oscilação do lençol freático afeta a produção do milho e o aumento na dose de nitrogênio influencia nos componentes de planta e produção, aumentando o rendimento do milho. Os objetivos deste trabalho foram:

A - Verificar a potencialidade de poluição por nitrato em áreas de várzea cultivada com milho com doses crescentes de adubação nitrogenada na forma de uréia.

B - Quantificar o efeito das flutuações do lençol freático e das doses de nitrogênio na produtividade relativa da cultura de milho.

C - Verificar o efeito do nitrogênio nos componentes da planta e produção do milho.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Considerações gerais

Nos últimos anos o crescimento da população mundial foi duplicado e o consumo de água foi multiplicado por sete (CHRISTOFIDIS, 2001). Para o cenário de fome previsto para 2025, necessita-se aumentar a produção de alimentos em 100%, com um incremento da oferta de água da ordem de 15% a 20% do suprimento atual para a agricultura (SANTANA; COUTO; BRITO, 2003). A escassez e o uso inadequado de água pressupõe uma crescente e séria ameaça à humanidade nos próximos 50 anos. Os lençóis freáticos vêm sendo rebaixados em diversas partes do mundo e muitos deles estão sendo contaminados juntamente com outras fontes de água com elevadas concentrações de sais, íons tóxicos, metais pesados, níveis elevados de nitrato, fósforo, concentrações residuais dos agrotóxicos, ou de seus metabólitos (resultantes de processos de biodegradação desses compostos ocorridos no solo) e outros poluentes, ameaçando o ambiente, podendo comprometer a qualidade das águas superficiais e subterrâneas. A recuperação dessas fontes de água é de elevado custo financeiro e social.

O uso de produtos químicos na agricultura tem contribuído significativamente para o aumento da produção de alimentos e fibra no mundo. Entretanto, nas últimas duas décadas, concentrações de agroquímicos na água subterrâneas e de superfície têm sido progressivamente aumentadas em muitas áreas, produzindo sérios impactos para o ambiente (PANG et al., 1998; SKAGGS; BREVE; WILLIAM, 1994).

A drenagem e a irrigação contribuíram fortemente para o desenvolvimento da agricultura. Inicialmente, entre a metade da década de 1960 e a metade da década de 1980, ocorreu a expansão da irrigação a qual possibilitou um aumento global de mais de 50% na produção de alimentos e fibras, sendo que, em alguns países, como a Índia, a contribuição foi de 100%. Tudo isso aconteceu por causa do acesso à água, sementes de boa qualidade, fertilizantes e outros insumos. Entretanto, em muitos países, sistemas adequados de drenagem não foram instalados e/ou mantidos, e a promessa do benefício da irrigação foi frustrada, em muitos lugares. Por outro lado, em várias partes do mundo a população está enfrentando a escassez da água, sérios problemas com o ambiente, resultante das práticas agrícolas, e utilizando sistemas de produção

agrícola que não são sustentáveis. Solos encharcados e altos níveis de salinidade em muitos projetos de irrigação têm contribuído para a redução de produção das culturas (MOHAMED; DUDA, 1999).

Atualmente, há controvérsia sobre a drenagem de terras alagadas para permitir cultivos agrícolas e fazer-se agricultura intensiva. Estuda-se o uso de alternativas para implementar-se melhores práticas de manejo para controle da poluição agrícola oriunda da drenagem antrópica em terras cultivadas. Essa exploração requer uma maior avaliação dos impactos ambientais, da viabilidade econômica e da garantia de uma agricultura sustentável utilizando sistemas de drenagem e irrigação racionais, para que se possa contribuir para o aumento na produção de alimentos e redução da fome no mundo (MOHAMED; DUDA, 1999).

Altas produtividades agrícolas e sistemas de agricultura sustentáveis são implementados em solos drenados no mundo inteiro. Embora a drenagem permita a exploração de áreas úmidas, o escoamento de água para os drenos subterrâneos transporta nutrientes, sedimentos, pesticidas e potencialmente outros poluentes para a água de superfície e subsuperfície, sob alguns sistemas de manejo de drenagem, contribuindo para a degradação do ambiente. O público em geral às vezes tem sido levado a acreditar que todos os sistemas de drenagem causam mal, o que tem resultado em pressão pública para reduzir e/ou acabar com os projetos de drenagem. Assim, para atender a demanda crescente por alimentos, fibra e energia, é essencial a implantação de novos projetos de drenagem que permitam converter áreas úmidas naturais em terras agrícolas. O desafio é desenvolver um sistema de manejo integrado de drenagem com outras práticas culturais que possibilitem uma agricultura sustentável ou produção florestal que minimize a degradação do ambiente (GILLIAM; BAKER; REDDY, 1999).

Mais de 2,5 milhões de hectares das terras cultivadas nas províncias de Ontário e Quebec no Canadá têm drenagem subterrânea, principalmente para a produção de milho (*Zea mays* L.) e de soja (*Glycine max* L.) (ICID, 2001).

Os problemas com a contaminação por nitrato oriundo da água dos drenos subterrâneos vêm acontecendo há vários anos em Quebec e nos EUA. O transporte de nitrato via água nos escoamentos de drenos dos sistemas de drenagem frequentemente excede a 10 mg L^{-1} , nível máximo de contaminação permitido para água de beber estabelecido pela U.S.E.P.A, nos Estados Unidos da América, oriunda do cinturão do milho. Esses efluentes são frequentemente despejados no rio Mississippi e ao chegarem no México contribuem para o agravamento dos

problemas de hipoxia no Golfo do México. Muitos dos impactos ambientais do N-NO_3^- na água de superfície dentro do meio oeste do cinturão do milho nos EUA são provenientes da área de drenagem subterrânea da agricultura (JAYNES et al., 2004).

A água drenada de áreas agrícolas na parte do meio oeste dos EUA tem sido identificada como uma fonte potencial não pontual de contaminação superficial com N-NO_3^- , que pode ter efeito adverso na saúde do homem e de animais. As altas concentrações de N-NO_3^- no rio Mississippi tem estado associadas ao fluxo tributário e ao sistema extensivo de drenagem subterrânea na parte superior do meio oeste (RANDALL, 1998; DAVIS et al., 2000).

A bacia do rio Neuse, localizada na região de Jones, no Estado da Carolina do Norte, EUA possui 17 mil hectares com drenagem. A agricultura abrange 60% e floresta 40%. Smeltz et al. (2005) testaram um plano de manejo de N e drenagem, em uma área piloto representativa dessa bacia, monitorando 15 locais, objetivando a redução das perdas de N nas descargas dos drenos e concluíram que o uso de melhores práticas de manejo de drenagem e nutrientes contribuíram para a redução das descargas nos drenos e perdas de N-NO_3^- em 23,1% e 11,5%, respectivamente, quando comparado com a drenagem convencional.

A drenagem artificial subterrânea é necessária para manter a produtividade em solos alagados. As águas de drenagem dessas áreas têm sido citadas como fonte de contaminação por N-NO_3^- nos corpos d'água de superfície e no lençol freático (KANWAR; BJORNEBERG; BAKER, 1999).

Historicamente os sistemas de drenagem agrícola foram projetados e manejados apenas objetivando produção. Entretanto, nos últimos anos, tem-se evidenciado mais uma finalidade que é a de proteção do ambiente. Atualmente existem boas práticas de manejo de drenagem as quais podem satisfazer aos objetivos da produção e proteção do ambiente. O melhor sistema e manejo da drenagem agrícola são aqueles que maximizam a produção economicamente e minimizam os efeitos maléficos ao ambiente (GILLIAM; BAKER; REDDY, 1999).

2.1.2 Sistemas de drenagem artificial e o ambiente

A drenagem interna inadequada de alguns solos é um problema em regiões úmidas, especialmente em áreas com solos de textura argilosa. Condições de solos encharcados diminuem a respiração das raízes das plantas e impedem o crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular, e conseqüentemente reduzem a produtividade e a qualidade da produção das culturas.

Os sistemas de drenagem artificial melhoram a produtividade dessas terras por aumentar a profundidade do lençol freático e melhorar as condições de aeração. Em regiões de clima árido e semi-árido permitem também o controle dos efeitos da salinidade no solo. Na América do Norte estas práticas têm sido bastante utilizadas, para melhorar o crescimento e o desenvolvimento das culturas, garantindo a produção e elevando a produtividade (ICID, 2001).

O sistema de produção utilizado atualmente pela agricultura intensiva caracteriza-se pelo uso intensivo de agroquímicos para aumentar a produtividade das culturas. Entretanto, nos sistemas de drenagem subterrânea têm sido detectados transportes de nutrientes das plantas no escoamento para os drenos, oriundos da agricultura. Dentre esses nutrientes, destaca-se o nitrato (NO_3^-), por ser altamente solúvel em água e de fácil lixiviação, em função da sua carga negativa, aparecendo freqüentemente nas descargas dos drenos dos sistemas de drenagem subterrânea. Como essa vazão é descarregada nos corpos d'água adjacentes de superfície, ocorre uma contribuição para a redução da qualidade dessas águas e desequilíbrio do ambiente, podendo causar eutrofização, desenvolvimentos de algas cianogênicas e trazer sérios problemas para a saúde humana e desequilíbrio aquático. No Oeste do Canadá, tem sido encontrado com freqüência elevada concentração de NO_3^- , em torno de 40 mg L^{-1} , na água de drenagem subterrânea. O limite da concentração de nitrato (NO_3^-) na água para consumo humano é de 10 mg L^{-1} (MILBURN; RICHARDS; GARTLEY, 1990; MADRAMOOTOO; WIYO; ENRIGHT, 1992).

A quantidade de água que vai para os drenos é fortemente influenciada pelo espaçamento dos drenos, pela condutividade hidráulica lateral (K_o) e pelos parâmetros da curva de retenção. A quantidade de nitrato na descarga do dreno depende também da macroporosidade. Quanto maior o meio poroso do solo, maiores são as perdas de nitrato através dos drenos nos tubos de cerâmica. Entretanto, a macroporosidade tem menor efeito sobre a descarga do dreno quando comparado com o espaçamento e com a K_o . As plantas também têm influências na concentração de nitrato nas águas dos drenos de cerâmica, dependendo da caracterização química e física do solo (WALKER et al., 2000).

Práticas agrícolas podem afetar a dinâmica da água no solo e alterar o comportamento da infiltração de soluções contendo nitrato. O preparo do solo com arado de aiveca e de disco, altera a estrutura do solo e o movimento da água no solo é menor que no plantio direto (SMITH; CASSEL, 1991). O plantio direto em virtude do não revolvimento do solo mantém fendas,

orifícios e galerias feitas, oriundas da decomposição de raízes, pela meso e macrofauna a mais de um metro de profundidade (DICK et al., 1991; SINGH; KANWAR, 1991). Tais fendas e orifícios induzem movimento preferencial da água e assim afetam o processo de transporte de soluto no perfil do solo (KANWAR; COLVIN; KARLEN, 1997).

Bakhsh et al. (2002) conduziram trabalho de campo por um período de seis anos (1993-1998) em solo com drenagem subterrânea implantada para quantificar o impacto de dois sistemas de preparo do solo (arado de aiveca versus plantio direto) e duas práticas de manejo de N fertilizante (uma única aplicação no pré-plantio versus parcelada) em perdas por lixiviação de N-NO_3^- nas descargas dos drenos subterrâneos em uma rotação de cultura de milho (*Zea mays* L.) e de soja (*Glycine max* L.). Baseado nas análises dos seis anos de medida de dados de vazão nos drenos e análise de amostras de água de drenagem, concluíram que: (1) a diferença de vazão dos drenos subterrâneos devido às chuvas criou um efeito significativo de perdas de N-NO_3^- na água de drenagem e também mostrou uma alta correlação ($R^2 = 0,89$) entre o volume de descarga dos drenos e as perdas por lixiviação de N-NO_3^- na água de drenagem subterrânea; (2) o preparo do solo com arado de aiveca, em média, resultou em uma perda de 16% inferior de N-NO_3^- na água de drenagem subterrânea em comparação com o plantio direto (16 vs. 19 kg ha^{-1} de N), sendo a produção de grãos de milho 11% superior; (3) a aplicação parcelada de N, em média, resultou em 25% menos perdas de lixiviação N-NO_3^- na água de drenagem subterrânea em comparação com a aplicação única no pré plantio (15 vs. 20 kg ha^{-1} de N) e uma produção de milho de 13% superior (8,4 vs. 7,4 Mg ha^{-1}); (4) as perdas, em média, de N-NO_3^- nos seis anos na água de drenagem nas parcelas de rotação de soja e milho não foram estatisticamente diferentes; (5) os resultados deste estudo indicam que o preparo do solo com arado de aiveca e parcelamento nas aplicações de N podem reduzir as perdas por lixiviação de N-NO_3^- na água de drenagem subterrânea e aumentar a produção de grãos no Estado de Iowa, EUA.

Poole et al. (2005) estudaram por um período de três anos o efeito da profundidade/espacamento dos drenos subterrâneos nas descargas dos drenos e nas perdas de nitrato na água drenada e concluíram que a redução da profundidade dos drenos e espaçamento diminuíram as descargas em 17,8%. Os drenos rasos exportaram 8,5% menos nitrato que os drenos mais profundos. O resultado desse estudo indica que sistemas de drenagem subterrânea mais rasos e uso de menores espaçamentos entre drenos exportam menos nitrato; entretanto há um aumento nos custos de implantação.

Nangia et al. (2005) avaliaram o efeito do espaçamento e profundidade de drenos subterrâneos nas perdas de N-NO_3^- na região sudeste de Minnesota, EUA, em um plantio milho e soja, em rotação de cultura. Os resultados mostraram que o aumento do espaçamento em 240% (27 para 100 m) reduziu a descarga dos drenos e as perdas de N-NO_3^- em 33% e 71%, respectivamente e pode também servir para resgatar o excesso das perdas de N-NO_3^- no solo.

Os principais fatores que influenciam nas perdas de nitrato para o ambiente são as precipitações pluviais, a temperatura, a taxa de aplicação de fertilizante, as práticas de plantio e as práticas de manejo da drenagem. Embora, alguns desses sejam fatores que ocorrem naturalmente, sendo assim incontroláveis, existem aqueles que envolvem uma certa interação humana e que podem ser manejados para minimizar a poluição por N, sendo mantido o benefício do fertilizante. Entretanto, deve-se observar às variabilidades espaciais e temporais nas propriedades físicas e químicas e biológicas do solo, de natureza de retorno não linear, como o transporte dos contaminantes, associados ao fator de incerteza climática e à complexidade da interação das propriedades do solo (SPITZ; MORENO, 1996).

Walker et al. (2000) citam que a vazão dos drenos é sensível ao espaçamento, profundidade da malha de drenagem e das propriedades hidráulicas do solo, especialmente umidade de saturação, condutividade hidráulica, tendo forte influência nas perdas de nitrato em drenos subterrâneos.

Bakhsh et al. (2001) avaliaram a qualidade de água na zona radicular em Iowa, EUA, no ano de 1996 para três tratamentos de adubação nitrogenada (baixa - 67 kg ha^{-1} , média - 135 kg ha^{-1} e alta - 202 kg ha^{-1}) e no ano de 1998 (baixa - 57 kg ha^{-1} , média - 115 kg ha^{-1} e alta - 172 kg ha^{-1}) na produção de milho e as perdas de NO_3^- via água de drenagem subterrânea. No ano 1997 cultivou-se soja sem o uso de adubação nitrogenada. As perdas de N-NO_3^- observadas no campo no escoamento dos drenos de cerâmica aumentavam e/ou diminuíram em função das precipitações pluviais e do N-fertilizante aplicado. Em todos os tratamentos os níveis de nitrato foram superiores a 10 mg L^{-1} , nível máximo recomendado para água para o consumo humano, e aumentaram em função das doses de N-fertilizante aplicados, com uma média, no período dos dois anos, de $11,1 \text{ mg L}^{-1}$, $14,1 \text{ mg L}^{-1}$ e $18,9 \text{ mg L}^{-1}$ para as doses crescentes dos tratamentos, respectivamente.

Os fertilizantes industriais nitrogenados e a matéria orgânica podem contribuir para a lixiviação de NO_3^- via excesso de água no perfil do solo contribuindo para a contaminação do

ambiente a jusante do sistema de drenagem. Zhu e Fox (2003) citam que o uso de 150 a 200 kg ha⁻¹ de N contribuíram para o aumento da produtividade do milho em rotação com soja e as perdas por lixiviação por NO₃⁻ foram insignificantes.

Lawlor et al. (2005) avaliaram doses de N e lixiviação de NO₃⁻ na cultura do milho em rotação com soja por um período de 16 anos, em uma área com sistema de drenagem subterrânea, dividido em três fases: fase 1 (1989-1993) - 0, 56, 112 e 168 kg ha⁻¹ de N, fase 2 (1994-1999) - 45, 90, 134 e 179 kg ha⁻¹ de N e fase 3 (2000-2004) - 168 e 252 kg ha⁻¹ de N. As descargas dos drenos variaram em função das precipitações pluviais. Obtiveram as concentrações de N-NO₃⁻ nas descargas dos drenos de 9,9, 11,1, 13,1 e 12,0 mg L⁻¹ de NO₃⁻, na fase 1, de 5,7, 8,1, 11,9 e 13,2 mg L⁻¹ de NO₃⁻, na fase 2 e 15,5 e 23,4 mg L⁻¹ de NO₃⁻ na fase 3. A produtividade média de milho da fase 1 foi de 5078, 6572, 8211 e 8404 kg ha⁻¹, da fase 2 foi de 6230, 7164, 7610 e 7964 kg ha⁻¹ e da fase 3 foi de 8657 e 9313 kg ha⁻¹. Em todos os anos de estudo obtiveram forte correlação entre doses de N, precipitação pluvial, concentração de NO₃⁻ e produtividade do milho. As concentrações de nitrato nas descargas dos drenos aumentaram em função das doses de N aplicadas na cultura do milho e das precipitações pluviais. O aumento das doses de N contribuíram também para a elevação da produtividade do milho.

Madramootoo; Helwing e Dodds (2001) investigaram em um campo agrícola com a monocultura do milho, em Quebec, no Canadá, nos anos 1998 e 1999 (maio a dezembro) o uso do manejo do lençol freático como uma medida potencial de controle do ambiente para diminuir o fluxo total de água para os drenos subterrâneos e assim reduzir as perdas de N por lixiviação. No trabalho, os autores, utilizaram um sistema de drenagem livre com lençol freático a 1,0 m de profundidade e um sistema de subirrigação com lençol freático a 0,6 m de profundidade e duas doses de adubação nitrogenada (120 kg ha⁻¹ de N e 200 kg ha⁻¹ de N). Foi monitorada a umidade volumétrica do solo para 0,25 e 0,50 m, a profundidade do lençol freático e o fluxo de água na drenagem subterrânea e constataram que a descarga da água de drenagem, na subirrigação, foi 20% menor que para a drenagem livre no ano de 1998, entretanto isso não ocorreu em 1999, devido às condições de seca durante os meses de verão; a concentração média de N-NO₃⁻ na água de drenagem para subirrigação foi de 74,0% e 80,3% menor que a drenagem livre em 1998 e 1999, respectivamente; houve uma perda de 25% na produção de milho sob subirrigação no ano mais chuvoso, 1998, mostrando que há necessidade de melhorar o nível de manejo do lençol freático do sistema de subirrigação.

Segundo Kanwar e Baker (1991), citados por Mitchell et al. (2000), a aplicação de 125 kg ha⁻¹ de N-fertilizante em plantio direto na cultura do milho, três vezes durante a estação de crescimento, conduziu a uma concentração de N-NO₃⁻ nos drenos subterrâneos de aproximadamente 11 mg L⁻¹. Quando foram aplicados 175 kg ha⁻¹ de N em sistema de plantio direto e aração convencional, encontraram-se 15 e 23 mg L⁻¹, respectivamente, o que mostra a importância do sistema de plantio para a redução das perdas de NO₃⁻ e preservação do ambiente.

Mitchell et al. (2000) quantificaram o efeito do sistema de manejo de cultivo no movimento de nitrato para um reservatório de água para consumo humano em uma bacia hidrográfica com sistema de agricultura intensiva e com drenagem subterrânea implantada, em Illinois, EUA. As concentrações de nitrato e as descargas para os drenos subterrâneos de cerâmica foram monitorados por seis anos em campos com várias culturas e práticas de manejo de plantio; oito áreas com sistemas de drenagem subterrânea possuíam tamanhos que variaram de três a 21 ha. As concentrações de nitrato foram determinadas em vários locais ao longo do canal principal da bacia. As concentrações de N-NO₃⁻ medidas no rio foram sazonais, com concentração máxima entre 10 e 15 mg L⁻¹, ocorrendo na primavera e concentração mínima de 0 a 5 mg L⁻¹, no outono. As concentrações de nitrato nos drenos de cerâmica variaram de 0 a 39 mg L⁻¹ e diferiram entre os campos e os sistemas de manejo de plantio usados. As concentrações de N-NO₃⁻ no efluente dos drenos foram mais altas nas áreas agrícolas que aplicaram maiores quantidades de fertilizantes nitrogenados. O sistema de aplicação pré-plantio com uma aplicação média de 107 kg ha⁻¹ de N por ano produziu uma concentração média de 16,8 mg L⁻¹ de NO₃⁻ na vazão dos drenos de cerâmica, o qual foi significativamente maior que a concentração de 10,2 mg L⁻¹ N-NO₃⁻ do local de referência, o qual recebeu uma aplicação de 93 kg ha⁻¹ de N por ano oriundo de esterco. A concentração média de nitrato nas descargas dos drenos da área plantada com grama permanente foi de 1,0 mg L⁻¹. Perdas de NO₃⁻ nos campos de plantio variaram de 14 a 35 kg ha⁻¹ de N por ano, dependendo do manejo do sistema, o qual corresponderam de 14% a 36% da aplicação do nitrogênio. Perdas da área plantada com grama foram de 3,8 kg ha⁻¹ por ano e na estação de coleta localizada na parte superior do rio foi de 11 kg ha⁻¹ de N-NO₃⁻ por ano.

A dose ótima de N pode variar ao longo do ano em função da taxa de mineralização do solo, matéria orgânica e lixiviação do nitrato no solo e principalmente pelos valores de precipitação pluvial no período de condução da cultura do milho. Jaynes e Colvin (2005) avaliaram a produção de grãos de milho e perdas de nitrato nas descargas dos drenos em função

da aplicação de N, utilizando como fonte o fertilizante líquido UAN com 28% de N, nos anos agrícolas de 2000 e 2002, em uma área de 22 ha, com sistema de drenagem - drenos subterrâneos instalados a 1,45 m de profundidade, em Iowa, EUA. As chuvas para cada um dos 4 anos, quando foi cultivado milho em rotação com soja, foram menores que a média da série histórica de 40 anos. Em 2002 foi particularmente seco, havendo uma precipitação pluvial de 2240 mm, sendo que no mês de abril não ocorreu precipitação pluvial. A semeadura do milho (Golden Harvest 8890Bt) foi realizada em 25/04/2000 com 0,75 m de espaçamento e população de 71.000 plantas ha⁻¹. Em 20/04/2002, semearam a cultivar de milho Pioneer 35Y55 com uma população de 57.000 plantas ha⁻¹. Os tratamentos de N consistiram de (1) aplicação de 138 kg de N ha⁻¹, aplicados na emergência; (2) 69 kg ha⁻¹ de N aplicados na emergência e (3) aplicação de 69 kg ha⁻¹ de N na emergência e 69 kg ha⁻¹ de N em 27/06/2000 e 17/06/2002. A produção de grãos de milho cresceu nos dois anos. A produção de grãos de milho, em 2000, para o tratamento três (10,27 Mg ha⁻¹) foi maior significativamente que os outros tratamentos (9,56 Mg ha⁻¹). Em 2002, o tratamento três aumentou a produção (11,62 Mg ha⁻¹) comparado com o tratamento dois (10,70 Mg ha⁻¹), mas foi menor que a produção do tratamento um (12,42 Mg ha⁻¹). A concentração de nitrato nos drenos subterrâneos foi maior para o tratamento um e três, mas não houve diferença significativa (P>0,05). A concentração de nitrato variou de 3,0 mg L⁻¹ a 28,3 mg L⁻¹ durante os quatro anos. No mês de julho de 2000 e maio e junho de 2002, a concentração média de nitrato excedeu a 10 mg L⁻¹.

O melhoramento da eficiência do sistema de drenagem subterrânea diminui as perdas de N orgânico na água de drenagem, mas aumenta a descarga de N-NO₃⁻. O aumento das perdas de N-NO₃⁻ é geralmente maior no sistema com boa drenagem subterrânea. A quantidade de perdas de N do sistema com boa drenagem subterrânea é fortemente influenciada pela quantidade de N aplicado na cultura (GILLIAM; BAKER; REDDY, 1999).

O aumento da concentração de N-NO₃⁻ na água de drenagem subterrânea e o aumento da contaminação do lençol freático devido às altas taxas de aplicação dos fertilizantes nitrogenados vêm ocorrendo, praticamente, no mundo inteiro; este fato se deve à busca de produtividade cada vez maior sem se observar, geralmente, o conseqüente impacto ambiental. Nesse contexto, o efeito da taxa de aplicação de N, a produtividade e as perdas de N-NO₃⁻ na água de drenagem subterrânea necessita ser quantificado para permitir adequado desenvolvimento econômico e ao

mesmo tempo, garantir o desenvolvimento sustentável das práticas agrícolas (BAKHSH et al., 2000).

O N inorgânico oriundo dos fertilizantes é altamente solúvel em água; após a primeira chuva depois da fertilização tende a se mover para dentro do solo predominantemente por fluxo de massa. Há uma variação grande nas perdas de N nas descargas dos drenos subterrâneos nos campos agrícolas que receberam aplicações de adubação nitrogenadas. No cultivo do milho houve uma perda média de N-NO_3^- em Iowa de 38 kg ha^{-1} por ano (BAKER; JOHNSON, 1981), em Minnesolta de 75 kg ha^{-1} por ano (RANDALL et al., 1990) e em Michigan de 14 kg ha^{-1} por ano (FOGIEL et al., 1991) citados por Gilliam; Baker e Reddy (1999).

A razão para a larga variação das perdas é que há vários tipos de solos e fatores culturais e climáticos que influenciam nas perdas adicionais para o sistema de drenagem. Entretanto, com poucas exceções, o melhoramento da drenagem subterrânea tem resultado em substancial aumento nas perdas de N-NO_3^- para as águas de superfície. A média de concentração N-NO_3^- em água de drenagem subterrânea encontrada freqüentemente é de 8 a 20 mg L^{-1} , a qual é considerada mais alta do que a concentração de água de drenagem superficial (GILLIAM; BAKER; REDDY, 1999).

Gilliam e Skaggs (1986) consideraram drenagem subterrânea pobre, intermediária e boa, aquelas que perdem em média quantidades de N-NO_3^- , anualmente, de $3,7 \text{ kg ha}^{-1}$, $15,7 \text{ kg ha}^{-1}$ e $32,4 \text{ kg ha}^{-1}$; quantidades de N-total de $13,6 \text{ kg ha}^{-1}$, $20,0 \text{ kg ha}^{-1}$ e $42,1 \text{ kg ha}^{-1}$ e quantidades de fósforo total de $0,21 \text{ kg ha}^{-1}$, $0,33 \text{ kg ha}^{-1}$ e $0,53 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente.

As descargas anuais nos drenos subterrâneos são extremamente variadas de um ano para o outro, em função principalmente da distribuição das precipitações pluviais da região. Jaynes et al. (2004) obtiveram em parcelas individuais uma faixa de variação 136 a 617 mm em 2001, 196 a 504 mm em 2002 e 112 mm a 530 mm em 2003, entretanto não houve diferença significativa entre os tratamentos estudados.

Miller et al. (2000) verificaram em três locais (G1, G2 e G3) de um campo agrícola cultivado em rotação de milho com soja em Illinois, EUA, com sistema de drenagem subterrânea, implantado, que em 60% do efluente do local G1 a concentração de nitrato excedia a 10 mg L^{-1} , nível máximo recomendado na água para consumo humano, com uma variação de 37,04 a $0,44 \text{ mg L}^{-1}$. Para os locais G2 e G3 os níveis máximos e mínimos de nitrato foram de $28,52 \text{ mg L}^{-1}$ e $< 0,01 \text{ mg L}^{-1}$ e $50,09 \text{ mg L}^{-1}$ e $< 0,01 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente.

A água de drenagem dos sistemas agrícolas com drenagem artificial implantada contém mais contaminantes que a água oriunda de terras úmidas com vegetação natural. Entretanto, há muitas alternativas de manejo que podem reduzir significativamente a carga de poluentes na água drenada da agricultura. Os sistemas de drenagem deveriam ser projetados e manejados para maximizar a produção e a qualidade de água (GILLIAM; BAKER; REDDY, 1999).

Uma boa drenagem subterrânea com um manejo adequado pode ser usada para reduzir as perdas de N-NO_3^- e de P. No estado da Carolina do Norte, esses dois nutrientes foram reduzidos 45 e 35 %, respectivamente, na água superfície (GILLIAM; BAKER; REDDY, 1999).

Os sistemas de drenagem são projetos instalados para remover o excesso de água do solo e lixiviar os sais dissolvidos da zona radicular. Historicamente, esses sistemas têm sido utilizados apenas para o controle do lençol freático em função da taxa de percolação da irrigação e do “seepage” proveniente de canais. Os projetos de drenagem subterrânea manejados com a finalidade de manter a qualidade de água em áreas irrigadas requerem o uso de modelos hidrodinâmicos que definam a parte do movimento da água e a constituição química da água infiltrada, controlando a quantidade e a qualidade da solução que sai nos drenos (GUITJENS et al., 1997).

O manejo dos fertilizantes nitrogenados sozinho não é suficiente para reduzir a concentração de N-NO_3^- na drenagem subterrânea abaixo do nível máximo de contaminação permitido, e novas alternativas de manejo devem ser criadas. Jaynes et al. (2004) compararam a efetividade do uso de drenos de cerâmica subterrâneos, do sistema de cultivo e de fontes alternativas de carbono em busca de novas soluções para a redução da concentração de nitrato na água de drenagem na cultura de rotação de milho e soja. Avaliaram cinco tratamentos: (1) tratamento controle - constituído de escoamento livre de drenos instalados a 1,2 m de profundidade; (2) profundidade do dreno – drenos instalados a 1,8 m de profundidade, isto é, 0,6 m mais fundo que a profundidade do dreno controle, mas com a saída livre de 1,2 m mantida; (3) paredes de desnitrificação – trechos escavados paralelos ao dreno de cerâmica e enchidos com lascas e restos de madeira, funcionando como uma fonte adicional de carbono para aumentar desnitrificação; (4) phyto-remediação – plantio de grama oriental (*Tripsacum dactyloides* L.) que possui um sistema de raízes bastante desenvolvido, podendo chegar abaixo do LF e servir como uma fonte renovadora de carbono, contribuindo para aumentar desnitrificação; e (5) cultura de cobertura no inverno - plantio de centeio (*Secale cereale* L) após colheita de soja (*Glycine max*

(L.) Merr.) ou milho (*Zea mays* L.) e quimicamente destruído antes do plantio subsequente. No ano de 2001 e 2003, o tratamento 3 apresentou uma média anual de concentração de N-NO_3^- significativamente menor que o controle. A construção de parede de desnitrificação composta de lasca de madeira foi efetiva em reduzir a concentração N-NO_3^- no escoamento para os drenos (68% em 2001, 65% em 2002 e 61% em 2003 em relação ao tratamento controle). O tratamento 5 também reduziu em média 64%. A rotação soja e milho seguida de centeio foi também eficiente em reduzir a concentração de N-NO_3^- nos tubos de dreno, mas não foi tão consistente quanto a parede de desnitrificação. Entretanto, o crescimento lento da grama perene e o tempo requerido para o seu completo crescimento para estabelecer o sistema radicular abaixo da profundidade do dreno pode, possivelmente, controlar eficazmente as perdas de NO_3^- no futuro.

Jaynes et al. (2004) verificaram também uma concentração de nitrato na descarga do tratamento três de 1 a 35 mg L^{-1} durante os três anos de estudo, com uma média anual inferior a 10 mg L^{-1} de NO_3^- , o qual foi o tratamento mais consistente encontrado para redução de níveis de nitrato. O tratamento cinco reduziu significativamente a concentração de N-NO_3^- e, em 2002 e 2003, apresentou uma média de 13 mg L^{-1} .

2.1.3 Solos de várzeas e as perdas de N por desnitrificação

Solos de várzea ou solos hidromórficos, encontrados nas planícies de rios e de lagoas, são solos que, caracterizam-se por apresentarem grandes variações espaciais (morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas e conseqüentemente, na aptidão de uso) e possuem drenagem natural deficiente. O seu relevo varia, geralmente, de plano a suavemente ondulado. Esses solos desenvolveram-se a partir de sedimento fluviolacustre, lagunares e marinho e de sedimentos aluvionares oriundos de rochas sedimentares e basálticas (PINTO et al., 1999). As áreas de várzeas no Brasil abrangem um total de trinta milhões de hectares, aproximadamente (LAMSTER, 1980).

O manejo dos solos de várzeas (conjunto de operações de cultivo, práticas culturais, fertilização, correção, etc, que visam a produção de plantas) por causa das suas características peculiares que apresentam, principalmente aquelas relacionadas à degradação do seu estado físico e à presença de argilas expansivas com altos índices de plasticidade e pegajosidade, é de extrema complexidade (PAULETTO et al., 1999).

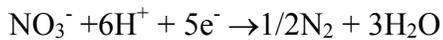
A difusão do oxigênio em água é cerca de 10 mil vezes mais lenta do que no ar, ficando aquém da demanda microbiológica. Os microrganismos anaeróbios, representados predominantemente por bactérias, proliferam em função da energia fornecida pela MO, utilizando compostos oxidados do solo e produtos da dissimilação da MO, como receptores finais de elétrons. No solo bem drenado, os produtos da decomposição aeróbia são dióxido de carbono, nitrato, sulfato e húmus; em solos alagados, são dióxido de carbono, hidrogênio molecular, metano, amônia, aminas, gás sulfídrico e resíduos parcialmente humificados. A fonte natural de N para o solo (NH_4^+ e NO_3^-) é a MO, após a mineralização, na qual o elemento faz parte de diversos compostos orgânicos. A velocidade da desnitrificação em solos alagados depende principalmente da presença de MO de fácil decomposição, do tipo de microrganismos envolvidos, do pH do solo, umidade e da temperatura (VAHL, 1999).

O N orgânico para ser absorvido pelas plantas, precisa ser mineralizado, até formar amônio (NH_4^+). Este por sua vez, pelo processo de nitrificação, em solos oxidados é rapidamente transformado em nitrato (NO_3^-), de tal modo que poderá haver no solo muito mais nitrato do que a capacidade de absorção pelas plantas. O nitrato é fracamente adsorvido no solo, lixiviando com mais facilidade no perfil, tornando-se um grande problema nas áreas em que predominam solos arenosos. As fontes contaminantes de nitrato são os fertilizantes inorgânicos e os esterco de origem animal, no estado sólido ou líquido, e outros resíduos orgânicos com altos teores de nitrogênio na sua composição (COSTA et al., 2004).

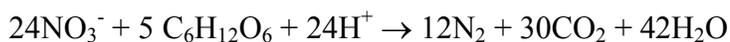
Esses solos, em regiões de clima úmido, geralmente apresentam problemas relacionados com a elevação do lençol freático na estação chuvosa, aumento do teor de água no solo na zona radicular, o que em excesso pode contribuir para a deficiência de oxigênio para as plantas, comprometendo absorção e o transporte de nutrientes, promovendo lixiviação de nutrientes, desnitrificação e redução de produtividade das culturas. Os projetos de drenagem agrícola que vêm sendo executados nas últimas décadas na região Sudeste brasileira geralmente objetivam incorporar várzeas úmidas de pequena extensão ao processo produtivo, a partir da retificação ou limpeza dos cursos d'água adjacentes, sistematização do solo e implantação de drenos abertos. O principal benefício da drenagem agrícola consiste em permitir o aumento da produtividade ou a incorporação de áreas anteriormente alagadas ou salinizadas ao processo produtivo (DUARTE, 1997).

O nitrato é a forma mais oxidada do nitrogênio em solos sob condições de oxigenação. Em solos alagados ou de várzea, aqueles que estão sujeitos a saturação por água ou alagamento periódicos, ocorre um acúmulo de amônio (NH_4^+), pois a ausência de oxigênio interrompe o processo de nitrificação do N amoniacal. O nitrato é o principal composto oxidado do solo a ser utilizado pelos microrganismos anaeróbios, após o desaparecimento do oxigênio, e estabiliza o potencial redox entre valores de 200 e 400 mV. No entanto, o nitrato é rapidamente reduzido a N_2O e N_2 voláteis, desaparecendo do solo em poucos dias de alagamento, razão pela qual não se deve utilizar adubos na forma nítrica (NO_3^-) nesses solos (SOUSA; LOBATO, 2004).

A semi-reação simplificada de redução do nitrato é:



O N pode ser perdido do solo por diferentes formas: volatilização de amônia, lixiviação e escoamento superficial. Todavia a principal causa de perdas de N no solo alagado é a desnitrificação. As perdas iniciais ocorrem logo após o alagamento, quando o nitrato que tinha sido mineralizado durante o período aeróbio (NO_3^-), é desnitrificado a N_2O e N_2 gasosos. O NH_4^+ que é formado pela mineralização da matéria orgânica, ou mesmo aplicado na forma de fertilizante amoniacal é estável na zona reduzida do solo. Porém, o NH_4^+ pode se difundir para as zonas oxidadas do solo e ser nitrificado pelos microrganismos aeróbios; o NO_3^- formado no processo de nitrificação pode, também, difundir-se para as zonas reduzidas e ser desnitrificado pelos microorganismo anaeróbios a N_2O e N_2 (SOUSA; LOBATO, 2004).



As perdas por desnitrificação podem ocorrer tanto a partir do N-orgânico, que é mineralizado durante o alagamento, como também pelo amônio aplicado ao solo através de adubos amoniacais, comumente utilizados em lavoura de arroz (SOUSA; LOBATO, 2004).

2.1.4 Adubação nitrogenada na cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.), em função de seu uso na alimentação humana, animal, biocombustível e um elevado potencial produtivo, associado à sua composição química e valor nutritivo, constitui-se num dos cereais mais importantes cultivados e comercializados no mundo. O consumo mundial de milho é estimado em cerca de 583 milhões de Mg, dos quais 183 milhões

são consumidas nos Estados Unidos, que também são os maiores produtores e exportadores desse cereal (COUTO et al., 2003). Os maiores produtores mundiais, no ano agrícola 2004/05, foram os Estados Unidos (41,88%), China (18,10%) e Brasil (6,49%). A produção nacional de grãos de milho, neste mesmo ano agrícola, foi de 40.587.200 Mg, sendo que as regiões Sul, Sudeste e Centro Oeste contribuíram com 43,77%, 26,37% e 20,19%, respectivamente, respondendo por 90,33% da produção nacional. As federações brasileiras que mais se destacaram na sua produção foram os estados do Paraná, Minas Gerais e São Paulo (FNP COMERCIAL E CONSULTORIA, 2005).

Os ganhos de produtividade de milho nos EUA nos últimos 30 anos, segundo Cardewel (1982), citado por Cantarella e Duarte (2004), foram proporcionais ao aumento do uso de fertilizantes minerais nitrogenados, associados com a alta densidade de semeadura e ao melhoramento genético. O uso de fertilizantes no Brasil nas lavouras de milho ainda é baixo, cerca de 217 kg ha⁻¹, contra 294 kg ha⁻¹ aplicado na soja (COUTO; RESENDE; ALBUQUERQUE, 2003).

A produtividade média do milho nos últimos cinco anos na região Centro Oeste brasileira foi de 2,77 Mg ha⁻¹. Dentro da região, a maior média foi a do Distrito Federal com 4,88 Mg ha⁻¹ seguido de perto pelo estado de Goiás. Bons produtores tem colhido 11 Mg ha⁻¹ e a pesquisa, 17 Mg ha⁻¹ (LOBATO; SOUSA, 2004). O N está incluído entre os nutrientes que mais limitam a agricultura no Cerrado brasileiro por causa das suas condições climáticas, principalmente de temperatura e de umidade que contribuem para acelerar os processos de decomposição da matéria orgânica e de perdas de N, resultando em solo com teores baixos desse nutriente (VARGAS, et al., 2004).

O reservatório natural do N é a atmosfera com uma concentração de 78%, aproximadamente (BAIRD, 2002). O seu uso como fertilizantes nitrogenados só foi possível após a descoberta da reação química que transforma o N atmosférico em amônia (processo de Haber-Bosch) que exige temperatura e pressão elevada de modo a possibilitar o rompimento da ligação tripla covalente entre os dois átomos de N (NEVES; RUMJANECK, 1992).

Segundo Victória; Piccolo e Vargas (1992), as principais fontes de N para o solo são: fertilizantes industriais, material vegetal e animal, sais de amônio e nitratos trazidos pela precipitação pluvial, e a fixação biológica de N. Dentre estas se destacam os fertilizantes (fixação industrial) e a fixação biológica.

O N é quantitativamente o elemento mais importante exigido pelas plantas e pelos microorganismos para os respectivos crescimento e desenvolvimento, na água e no solo (BAIRD, 2002). Segundo Malavolta; Vitti e Oliveira (1997), o N tem participação na fotossíntese das plantas e suas principais funções estruturais são: constituintes de aminoácidos e proteínas, bases nitrogenadas e ácidos nucleicos, enzimas e coenzimas, vitaminas, glico e lipoproteínas, pigmentos e produtos secundários. Na planta, quase todo o N se encontra em formas orgânicas representadas em maior proporção por aminoácidos e proteínas.

Grande parte do N existente nos organismos vivos não é obtida diretamente da atmosfera; são frutos da decomposição orgânica (mineralização), fixação por alguns microorganismos, descargas elétricas e adubos nitrogenados. Na ciclagem do N ocorrem quatro importantes processos no ciclo do N: (1) fixação do N atmosférico; (2) amonificação; (3) nitrificação; e (4) desnitrificação (BAIRD, 2002).

O N, além de ser o nutriente exigido em maior quantidade, é o que tem o manejo e a recomendação de adubação mais complexa. O aumento do uso e do custo dos adubos nitrogenados é uma preocupação cada vez maior no exterior e no Brasil por causa dos possíveis efeitos negativos do excesso de nitrogênio nos mananciais, os quais são fatores que devem ser levados em consideração na adubação nitrogenada (CANTARELLA; DUARTE, 2004).

Fenômenos de adsorção de nitratos em solos tropicais

O cátion NH_4^+ e o anion NO_3^- das partículas minerais e orgânicas do solo formam complexos de esfera-externa, comumente denominados de íons trocáveis pela sua capacidade de ser deslocados de sítios de adsorção presente na solução do solo (MEURER; RHENHEIMER; BISSANI, 2004).

O N encontra-se na maioria dos solos, principalmente nos cultiváveis, onde geralmente se encontra mais de 95% do N, permanece na forma orgânica e somente uma pequena parcela fica na forma inorgânica. As formas minerais do nitrogênio, ou seja, o nitrato (NO_3^-), o nitrito (NO_2^-) e o amônio (NH_4^+), embora sendo as formas mais prontamente assimiláveis pelas plantas, representam uma pequena parte do N total do solo. O amônio, por ser um cátion, encontra-se na forma trocável nas micelas das argilas do solo, enquanto que o nitrato (ânion) é repelido pela superfície das partículas do solo, permanecendo em solução, estando mais susceptível às perdas

por lixiviação. Geralmente, nos esgotos frescos, o N está presente na forma de proteína e uréia (VANLOON; DUFFY, 2000; BAIRD, 2002).

Os íons nitrato são fortemente repelidos pelas cargas negativas dos colóides do solo. Esses íons por não serem retidos na fase sólida do solo, geralmente ficam na solução do solo e podem ser lixiviados em maior ou menor grau em função da percolação da água ao longo do perfil do solo, reduzindo a sua disponibilidade para as plantas, com riscos de contaminação das águas de superfície e subsuperfície. Nos solos que predominam argilas de carga permanente, a capacidade de retenção de nitrato é quase nula. Por outro lado, solos nos quais predominam minerais de carga variável (como é o caso dos latossolos) podem apresentar considerável capacidade de retenção de nitrato. Dynia e Camargo (1999) avaliaram o efeito da aplicação de fósforo e de calcário sobre a capacidade de retenção de nitrato de um solo de carga variável. Os tratamentos constaram da aplicação continuada de adubo fosfatado e de adubo fosfatado mais calagem a um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso de cerrado, típico de solo de carga variável. O histórico da área contava de cultivos com milho, trigo, arroz e feijão por 2, 3 e 5 vezes, respectivamente, entre 1982 e 1989. Nesse período recebeu $1,53 \text{ Mg ha}^{-1}$ de P_2O_5 e $5,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de calcário dolomítico. Após um período de pousio de cerca de dois anos, determinou-se a capacidade de retenção de nitrato do solo. Constataram que a adubação fosfatada e, especialmente, a calagem, exerceram considerável efeito residual sobre a capacidade de retenção de nitrato.

A magnitude do processo de lixiviação de nitrato depende do tipo de solo. A textura, o teor de matéria orgânica também pode interferir na lixiviação de nitrato em função da decomposição da matéria orgânica, principalmente quando a área agrícola não está sendo cultivada. Sangoi et al. (2003) avaliaram o efeito do método de aplicação da uréia e do manejo de resíduos culturais de aveia preta sobre as perdas de N por lixiviação, em solos com diferentes conteúdos de argila e matéria orgânica, em laboratório. Usaram dois solos: um Nitossolo Vermelho (NV) com 48 g dm^{-3} de matéria orgânica e 520 g dm^{-3} de argila e um Neossolo Quartzarênico (NQ) com 8 g dm^{-3} de matéria orgânica e 50 g dm^{-3} de argila. Os tratamentos consistiram da combinação de três sistemas de manejo de resíduos de cobertura (sem palha, palha aplicada na superfície e palha incorporada ao solo) com três sistemas de manejo do adubo nitrogenado (sem N, N na superfície e N incorporado ao solo). As doses de N utilizadas foram de 129 e 90 mg kg^{-1} de solo para o NV e NQ, respectivamente. A fonte de N aplicada foi à uréia. No solo de textura arenosa a lixiviação aumentou com a aplicação da adubação nitrogenada e foi

mais intensa quando a uréia foi incorporada do que quando aplicada sobre a superfície do solo. A lixiviação foi menor com a incorporação do resíduo do que com sua ausência ou a manutenção na superfície. Isso ocorreu provavelmente porque a incorporação da palha favorece o crescimento da população microbiana no solo, contribuindo para um aumento da imobilização temporária de parte do N aplicado via fertilizante. Constataram que a incorporação de palha de aveia preta diminuiu a lixiviação de N no Nitossolo vermelho, independentemente da forma de aplicação da uréia.

A carga elétrica líquida relativa de um solo pode ser estimada pela diferença ΔpH entre o pH em KCl 1N e pH em H_2O . O ΔpH indica se o pH do solo está abaixo ou acima do ponto de carga zero (PCZ). Portanto, se o ΔpH for positivo, o pH do solo está abaixo do PCZ e os colóides apresentam carga líquida positiva. Os Latossolos da região dos Cerrados apresentam fenômenos de inversão de carga, ou seja, o ΔpH torna-se maior que zero em subsuperfície, o que indica o predomínio de carga elétrica líquida positiva. Em solos que apresentam inversão de carga em subsuperfície, a retenção de nitrato deve ser maior do que naquelas em que a carga elétrica líquida é negativa em todo o perfil. Oliveira; Vilela e Ayarza (2000) avaliaram a adsorção de nitrato e identificaram as propriedades do solo que mais influenciam neste fenômeno. A adsorção de nitrato aumentou em profundidade e foi maior nos solos sob vegetação nativa (cerrado típico e cerradão) do que nos cultivados. A baixa adsorção de nitrato nas camadas superficiais se deve, provavelmente, a maior quantidade de cargas negativas e à competição com outros ânions. Neste estudo, os autores verificaram que as propriedades do solo que mais explicavam o aumento da adsorção de nitrato foram a superfície específica, a matéria orgânica e o pH em água. A maior capacidade de adsorção de nitrato na subsuperfície desses solos estudados, independentemente de apresentarem inversão de carga ou não, pode contribuir para diminuir as perdas deste íon por lixiviação, o que poderá aumentar a eficiência das adubações nitrogenadas e reduzir o potencial de contaminação dos lençóis freáticos. Constataram que a adsorção de nitrato é maior na subsuperfície, independentemente do fenômeno de inversão de cargas elétricas do solo; o ΔpH não é um bom índice para prever a adsorção em solos com mineralogia distinta e a maior adsorção de nitrato na superfície dos dois Latossolos está associada com os menores teores de matéria orgânica em profundidade.

Eficiência dos adubos nitrogenados na cultura do milho

A produtividade da planta é regulada por fatores genéticos e ambientais. Dentre os fatores ambientais, a nutrição adequada, garantida por um programa balanceado de adubação e de calagem, é responsável por um incremento de cerca de 20% a 25% no rendimento. A adubação de plantio deve ser baseada na análise de fertilidade do solo, histórico de uso da área e na produtividade esperada. O milho necessita de 18 a 20 kg de N para a produção de uma tonelada de grãos. A aplicação de N no solo deve ser feita ao lado da planta, distante cerca de 0,15 m, quando as plantas tiverem seis a oito folhas completamente desenvolvidas, especialmente para solos argilosos, pois é nesse período que as plantas de milho começam a fase linear de acúmulo de massa seca, demandando grandes quantidades de N disponível no solo (RESENDE, 2003).

As principais fontes de N para o solo são: matéria orgânica, fertilizantes industriais, sais de amônio e nitratos trazidos pela precipitação pluvial, e a fixação biológica de nitrogênio. Dentre estas se destacam os fertilizantes (fixação industrial) e a fixação biológica. As perdas de N se devem principalmente à remoção pelas culturas, à erosão, à volatilização na forma de amônia e à desnitrificação, na forma de óxidos de N e N₂ (VICTÓRIA; PICCOLO; VARGAS, 1992).

A fertilidade, geralmente, é avaliada na camada arável 0 a 0,2 m, utilizando análise de fertilidade do solo, inferida, principalmente, da soma de base ($S = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+$), da saturação por bases ($V\% = 100S/T$), da capacidade total de troca de cátions ($T = S + H^+ + Al^{3+}$), saturação por alumínio ($m\% = 100Al^{3+}/(Al^{3+} + S)$) e de acidez (pH) (CORREIA; REATTO; SPERA, 2004). Esses autores chamam atenção para a necessidade de analisar mais parâmetros ao longo do perfil do solo para auxiliar na tomada de decisão na definição das recomendações de fertilidade do solo, visando obter um melhor aproveitamento dos adubos e aumento da produtividade das culturas.

A uréia CO(NH₂)₂ é um fertilizante nitrogenado que possui a forma amídica contendo normalmente 44 a 46% de N. Ao ser colocada no solo, em poucas semanas, passa para a forma nítrica (NO₃⁻). Estimativa de caminhamento de nitrato no solo indicam valores de 0,5 mm mm⁻¹ de chuva para solos argilosos a mais de 3 mm mm⁻¹ de chuva para solos arenosos (van RAIJ et al., 1997).

A uréia, porém, quando aplicada na superfície está sujeita a perdas de amônia (volatilização). As perdas são maiores quando a uréia for aplicada em solo úmido, seguido de

vários dias de sol ou for colocada sobre resíduos de plantas, tais como a palhada formada em plantio direto. Quando a uréia é aplicada sobre solo seco não há hidrólise, portanto, não se perde amônia. Precipitações pluviais ou irrigação de 10 a 20 mm, geralmente, são suficientes para levar a uréia para o interior do solo e prevenir as perdas. Quando a uréia é colocada em sulcos de cinco centímetros de profundidade e em seguida cobertos, essa operação é o suficiente para controlar as perdas por volatilização. A adubação, em culturas anuais, deve ser aplicada cinco centímetros ao lado e abaixo das sementes (van RAIJ et al., 1997).

A adição de uréia a um solo deve causar um aumento inicial do pH, que decresce para valores abaixo do original após completa nitrificação do amônio. Os principais fatores que afetam a nitrificação são: aeração, temperatura, umidade, calagem, fertilizante e relação C/N. O nitrato é o íon nitrogenado absorvido preferencialmente pela maioria das plantas cultivadas. Em condições de baixa concentração de oxigênio, poderá ser perdido por desnitrificação (VICTÓRIA; PICCOLO; VARGAS, 1992).

A biomassa microbiana pode atuar como agente de decomposição da matéria orgânica, imobilizando nutrientes temporariamente, especialmente o N. Por outro lado, pode liberar rapidamente os nutrientes às plantas no processo de mineralização dos resíduos e morte dos organismos, correspondendo de 2 a 5%, aproximadamente da matéria orgânica do solo (SILVA; CAMARGO; CARETTA, 2004).

A época de aplicação tem grande importância no manejo de fertilizantes nitrogenados, pois, ao contrário de muitos outros nutrientes, o N residual, disponível para as plantas, não acumula no solo por muito tempo. Portanto, o N deve ser aplicado no início dos estádios de acúmulo de massa seca pelas plantas, de preferência para uma única cultura e não para uma rotação ou seqüência de culturas. A eficiência do N, normalmente, é cerca de 50 a 60% já que uma quantidade apreciável do N aplicado no solo se perde por volatilização, lixiviação e imobilização, durante o ciclo da cultura. As perdas de N por lixiviação estão relacionadas com aplicação de lâminas de água superiores às que o solo tem capacidade de armazenar na profundidade efetiva do sistema radicular (FRANÇA; RESENDE, 2003).

A maximização da eficiência dos adubos é obtida utilizando o solo conforme sua aptidão agrícola e uso de manejo adequado da fertilidade, estabelecendo as doses ótimas, as fontes, as épocas e as formas de aplicação de adubos na forma de cultivo da propriedade. As doses de adubos devem ser estimadas em função da análise de solo, as quais foram estabelecidas por

curvas de resposta das culturas e nas relações econométricas entre preços de produtos e custo dos insumos, visando máximo retorno por área (ANGHINONI; BAYER, 2004).

A uréia aplicada ao solo é transformada pela uréase (enzima presente no solo) em carbonato de amônio, que provoca a elevação do pH ao redor do grânulo. Quando este adubo nitrogenado é aplicado na superfície do solo pode haver perdas por volatilização. Perdas de até 35,5 kg ha⁻¹ de N foram determinadas num experimento conduzido na Estação Experimental Agrônômica da UFRGS, com a aplicação superficial de 240 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia (CAMARGO; SÁ, 2004).

O aumento da eficiência de uso dos fertilizantes nitrogenados pelas plantas envolve o entendimento da dinâmica do N no solo em diferentes situações de manejo e de plantas. Ernani; Sangoi e Rampazzo (2002) quantificaram a lixiviação e a imobilização de N no solo a partir da combinação de formas de aplicação da uréia e da palha de aveia preta em um Nitossolo Vermelho de textura argilosa, em casa de vegetação. Palhada de aveia seca: 3,14 e 12,56 g de matéria seca (MS) por unidade experimental foram colocadas na superfície ou incorporada. O N foi aplicado na forma de uréia sólida, na dose de 200 kg ha⁻¹, no experimento de lixiviação e 100 kg ha⁻¹ no experimento de imobilização. A lixiviação total de N foi 32%, aproximadamente, menor quando a uréia foi aplicada na superfície do solo do que a incorporada, em pH do solo de 5,5. Quando o pH foi de 7 essa lixiviação do N total aplicado na superfície foi de 25%. Concluiu-se que a lixiviação é maior nos tratamentos com uréia incorporada do que com uréia na superfície do solo. Porém, a uréia em superfície sem a presença de água para a sua incorporação proporciona alto potencial de perda de N por volatilização de amônia (LARA CABEZAS; KORNODÔRF; MOTTA, 1997). A manutenção dos restos culturais de aveia sobre a superfície do solo aumenta a absorção de N e a produção de massa seca de milho, independentemente do manejo da adubação nitrogenada.

Solos que adsorvem nitrato na superfície coloidal contribuem para uma maior eficiência da adubação nitrogenada em função da redução das perdas por lixiviação deste íon. Nas regiões tropicais há adsorção de nitrato em solos ricos em óxidos de ferro e materiais amorfos e a retenção do nitrato está relacionada às propriedades físicas e químicas destes solos, tais como pH, matéria orgânica, superfície de adsorção e concentração eletrolítica segundo Kinjo e Pratt (1977) e Black e Waring (1979) citados por Oliveira; Vilela e Ayarza (2000).

Influência da matéria orgânica no comportamento do N

A matéria orgânica constitui de menos de 5% da fase sólida dos solos, sendo constituída de carbono (52-58%), oxigênio (34-39%), hidrogênio (3,3-4,8%) e nitrogênio (3,7-4,15%) e possui uma alta capacidade de interagir com outros componentes, alterando as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. A matéria orgânica é a principal fonte de N no solo e o seu teor é utilizado como um dos critérios de recomendação de adubação nitrogenada para as culturas nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul (SILVA; CAMARGO; CARETTA, 2004), São Paulo (van RAIJ et al., 1997) e região de Cerrado (SOUSA; LOBATO, 2004).

A matéria orgânica é a principal fonte de N do solo para as plantas não leguminosas, sendo este disponibilizado pela mineralização dos compostos orgânicos. A adubação nitrogenada das culturas depende, portanto, do teor de matéria orgânica do solo. O N é o elemento que apresenta maiores dificuldades de manejo na produção agrícola, mesmo em propriedades tecnicamente orientadas. As formas preferenciais de absorção de N pelas plantas são o amônio (NH_4^+) e o nitrato (NO_3^-). Em condições de boa drenagem predomina a forma de NO_3^- , formado pela nitrificação do amônio. Nos solos alagados predomina o NH_4^+ , não ocorrendo a nitrificação. A maior parte do N do solo encontra-se em compostos orgânicos de grande peso molecular, não sendo disponível para as plantas. O N inorgânico presente no solo depende, portanto, dos teores relativos de C e de N, da composição dos materiais carbonatados presentes na matéria orgânica e da atividade microbiana (CAMARGO; SÁ, 2004).

Nos cultivos agrícolas, parte apreciável dos nutrientes é retirada do solo pelas culturas. Para ser absorvido pelas plantas, o N orgânico presente na matéria orgânica do solo deve ser antes transformado para a forma mineral, isto é, para NH_4^+ (feito por microrganismos quimiorganotróficos), pelo processo da mineralização, o qual é função da temperatura (maiores taxas ocorrem entre 25 e 30°C), aeração, umidade e pH do solo. A contribuição da matéria orgânica no suprimento de N para as culturas é difícil de ser avaliada com exatidão, em função da alta dependência dos fatores climáticos de difícil previsão; estima-se de uma forma expedita que 5% de matéria orgânica é constituída de N e que somente 2% da matéria orgânica é mineralizada anualmente. (CAMARGO; SÁ, 2004).

2.1.5 Recomendações, uso e manejo do nitrogênio na cultura do milho

A folha é o órgão da planta na qual as alterações fisiológicas, em razão de distúrbios nutricionais, tornam-se mais evidentes. A diagnose foliar, via análise química, permite a avaliação do estado nutricional, isto é, permite identificar o nível de comprometimento da produtividade, em função da situação nutricional (van RAIJ et al., 1997).

A análise química da folha serve para aferir a recomendação de adubação para o próximo ciclo (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000). O teor de N na planta inteira e nos grãos de milho são de 28 e 17 g kg⁻¹, respectivamente. A faixa de teor adequado de N em folhas de milho é de 27 a 35 g ha⁻¹ (van RAIJ et al., 1997).

As adubações também podem ser recomendadas em função das concentrações dos nutrientes nas folhas, os quais estão diretamente relacionados com: o estágio de crescimento, a variedade cultivada, o local de coleta na planta e a época de amostragem. A época mais adequada para amostragem de folhas das plantas de milho é no início da floração. No milho a concentração adequada de N na floração para as condições de cerrado é de 28 a 35 g kg⁻¹ (OLIVEIRA, 2004), entretanto, Malavolta; Vitti e Oliveira (1997) citam que o teor total de N adequado para a cultura do milho varia de 27,5 a 32,5 g kg⁻¹.

A deficiência nutricional, geralmente, produz decréscimos no rendimento e na qualidade dos grãos de milho, além das plantas ficarem mais expostas aos problemas de sanidade vegetal, por causa da complexidade dos efeitos antagônicos e/ou sinérgicos existentes entre os macros e micronutrientes. Os principais fatores de produção referentes à cultura do milho são: população de plantas, material genético, clima e adubação nitrogenada (COSTA et al., 2005).

A recomendação de adubação nitrogenada é complexa, por causa da dinâmica das transformações do nitrogênio no solo, da sua mobilidade e dos fatores que influem no seu aproveitamento pelas plantas. Os principais fatores que podem influenciar o potencial de resposta de uma cultura ao nitrogênio são: suprimento de outros minerais, profundidade do perfil do solo com presença efetiva de raízes, tempo de cultivo, sistema de preparo do solo, rotação de culturas, intensidade de chuvas, nível de radiação solar e teor de matéria orgânica no solo (SOUSA; LOBATO, 2004).

Os processos de transpiração e evaporação são os responsáveis pelo movimento de água e nutrientes absorvidos pela cultura do milho. A absorção é função da presença do nutriente e da água que esteja na rizosfera. Todos os nutrientes minerais são absorvidos via solução do solo. Para que haja absorção, o íon se desloca, em solução, de um ponto qualquer no solo para a rizosfera pelos processos combinados de fluxo de massa e difusão. O rendimento da cultura do milho é afetado pela disponibilidade de água e nutriente no solo, os quais estão relacionados com o pH (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

Atualmente há carência de critério confiável de recomendação da adubação nitrogenada com base na análise de solo para o estado de São Paulo. A recomendação de N é realizada com base na classe de resposta a N, definida conforme o manejo e histórico da gleba, no rendimento esperado e nos teores foliares. As classes esperadas são: (1) alta resposta esperada, (2) média resposta esperada e (3) baixa resposta esperada. Esta última considera que os solos encontravam-se em pousio por dois ou mais anos; cultivo após pastagem (exceto solos arenosos); ou solos com cultivo anterior intenso de leguminosas; ou adubação verde com leguminosas ou rotação permanente com leguminosas; ou uso constante de quantidades elevadas de adubos orgânicos (van RAIJ et al., 1997).

Cerca de 95% ou mais do N do solo faz parte da matéria orgânica, que constitui o grande reservatório desse nutriente. No entanto, a capacidade do solo de fornecer N às culturas depende da mineralização do N orgânico, função dos fatores climáticos, de difícil previsão. Assim, a análise de solo tem pouca utilidade, até o momento, para ajudar a definir a adubação nitrogenada (van RAIJ et al., 1997).

O nitrogênio é o nutriente fornecido em maior quantidade nas adubações e o que possui o manejo e recomendação mais complexos. A sua recomendação depende do nível tecnológico de produção das culturas. Culturas com diferentes produtividades extraem e exportam quantidades proporcionais de nutrientes e, portanto, necessitam de doses diferenciadas de adubos. O N é o elemento absorvido em maiores quantidades pelo milho e difícil de se avaliar sua disponibilidade no solo devido às múltiplas reações a que está sujeito, mediadas por microrganismos e afetadas por fatores climáticos de difícil previsão. (CANTARELLA; DUARTE, 2005).

Na última década, as recomendações oficiais de adubação para a cultura do milho evoluíram sensivelmente no Brasil. As principais inovações estão na segmentação de doses de

nutrientes conforme a produtividade esperada, a qual é função das diferenças de solo, manejo, material genético e época de semeadura (CANTARELLA; DUARTE, 2004).

A aplicação de N em milho tem sido, tradicionalmente, feita no Brasil de forma parcelada, geralmente correspondente a 30% ou menos do total na semeadura e o restante em cobertura, com a finalidade de evitar o excesso de sais no sulco de plantio e, principalmente, perdas de N por lixiviação e volatilização. Atualmente doses superiores a 100 kg ha^{-1} de N estão se tornando comuns em cultivos de alto rendimento, e os riscos de lixiviação, principalmente em solos arenosos, não podem ser descartados. Recentemente, no Brasil, houve uma tendência de aumento das doses de N na semeadura do milho, dos 10 a 20 kg ha^{-1} , para cerca de 30 a 40 kg ha^{-1} , em função principalmente do aumento de rendimento esperado, mas refletindo também a maior demanda por N nas áreas em plantio direto e o reconhecimento da importância do fornecimento deste nutriente ao milho nos primeiros estádios de desenvolvimento. A decisão de parcelar a adubação nitrogenada de cobertura, além daquela recomendada para a aplicação no estágio fenológico um e dois, plantas com quatro a oito folhas, depende do tipo de solo, da dose a ser aplicada e do manejo da cultura (CANTARELLA; DUARTE, 2004).

A adubação e nutrição da cultura do milho devem ser função da lucratividade do agronegócio, observando os custos fixos, operacionais e a remuneração do empresário rural. A adubação deve ser função da fertilidade atual, da fertilidade almejada e do histórico da área. A análise química do solo tem por finalidade nortear decisão no sentido de definir o rendimento almejado e a quantidade de fertilizante a ser aplicado (recomendação de adubação). O rendimento máximo econômico é aquele que visa a máxima lucratividade da exploração agrícola (define-se a tecnologia a ser utilizada), e não o máximo rendimento. As aplicações dos adubos devem ser feitas com base na fenologia da planta (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

Na adubação de semeadura da cultura do milho, Fancelli e Dourado Neto (2000) e Fancelli e Dourado Neto (2005) recomendam fazer as seguintes observações: (1) aplicar 25 a 45 kg ha^{-1} de N; (2) aplicar, no máximo 50 kg ha^{-1} de K no sulco de semeadura (posicionando-o com distância mínima de oito centímetros da semente) e o restante aplicar em cobertura ou em pré-semeadura; (3) aplicar 20 a 30 kg ha^{-1} de S para rendimentos almejados superiores a 8 Mg ha^{-1} ; (4) aplicar 3 kg ha^{-1} de Zn quando o teor desse elemento no solo for menor que $0,6 \text{ mg dm}^{-3}$ e (5) aplicar 1 a $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de B quando o seu teor no solo for menor que $0,21 \text{ mg dm}^{-3}$. Quanto à adubação de cobertura, recomendam-se fazer a quantificação da adubação nitrogenada em função

do rendimento almejado, da variedade ou híbrido utilizado, do solo, do clima, da cultura e da adubação anteriormente utilizadas, e da tecnologia. De maneira geral, o parcelamento da adubação nitrogenada será necessário quando a cultura for instalada em solo com teor de argila inferior a 30%, quando a época for favorável a lixiviação (período chuvoso) e quando quantidade nitrogenada a ser utilizada for superior a 100 kg ha^{-1} .

A adubação de N recomendada para uma produtividade esperada de 8 a 10 Mg ha^{-1} , para o estado de São Paulo, é de 30 kg de N na fundação e 120 kg em cobertura. Aplicar o N ao lado das plantas, com a oitava folha totalmente desdobrada (25-30 dias após a germinação) em quantidade de até 80 kg ha^{-1} e o restante cerca de 15 a 20 dias depois (van RAIJ et al., 1997).

Para se produzir 7.500 kg ha^{-1} de grãos, o milho necessita absorver 200 kg de N (135 nos grãos e 65 na parte vegetativa). Se não houver disponibilidade de N, a produção será menor, não importando a fonte ou forma de suprimento (TEDESCO; LEVIEN, 2004).

Para a cultura do milho são necessários em média 20 kg de N para produzir uma tonelada de grãos. Conhecendo-se o teor de matéria orgânica do solo, é possível estimar do potencial de fornecimento de N. Considerando um teor de matéria orgânica de 3%, esse solo tem potencial de N a mineralizar de 90 a 150 kg ha^{-1} e uma produtividade de milho esperada de 4 a 6 Mg ha^{-1} . Com um manejo adequado do solo, pode-se contar com contribuições de N mineralizado e utilizado pelas culturas de até 180 kg ha^{-1} , com os quais é possível a produção de até 9 Mg ha^{-1} de milho (SOUSA; LOBATO, 2004). Entretanto na consideração do teor de MO há certo grau de empirismo (condições climáticas x mineralização).

O N é absorvido e exportado em grande quantidade nas colheitas. O milho é uma das gramíneas mais cultivadas na região do Cerrado, e suas respostas a N chegam a doses de até 200 kg ha^{-1} ou mais. Com doses em torno de 100 kg ha^{-1} de N, é possível produzir cerca de 8 Mg ha^{-1} de grãos de milho em um solo com 3% a 4% de matéria orgânica (SOUSA; LOBATO, 2004).

De uma maneira geral, para o sistema de plantio direto no Estado de São Paulo, recomenda-se aplicar cerca de 30 kg ha^{-1} de N na semeadura mais 90 a 120 kg ha^{-1} de N em cobertura para se obter produtividade entre 4 e 8 Mg ha^{-1} . O N em cobertura deverá ser ajustado de acordo com a textura do solo, histórico da área, cultivar e população de plantas (CANTARELLA; DUARTE, 2005).

No estado de Minas Gerais, para uma produtividade de grãos de milho maior que 8 Mg ha^{-1} , Alves et al. (1999) recomendam uma adubação nitrogenada de semeadura de 10 a 20 kg de

N ha^{-1} e uma adubação em cobertura de $140 \text{ kg de N ha}^{-1}$, no solo, quando as plantas apresentarem de seis a oito folhas bem desenvolvidas. A uréia deve ser incorporada a uma profundidade de cerca de cinco centímetros.

A adubação inorgânica (fertilizantes industrializados) pode manter uma alta produtividade das culturas. A uréia ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) é um dos adubos nitrogenados mineral mais utilizados atualmente no Brasil. Uma característica da uréia é ser altamente solúvel em água, podendo ser lixiviada. O milho pode responder favoravelmente até $150\text{-}200 \text{ kg ha}^{-1}$ de N; as quantidades recomendadas variam conforme o nível de manejo da cultura, em função da cultivar, época de plantio, região climática, cultura anterior e rendimento esperado (CAMARGO; SÁ, 2004).

Bakhsh et al. (2001) avaliaram três tratamentos de adubação nitrogenada (baixa - 67 kg ha^{-1} , média - 135 kg ha^{-1} e alta - 202 kg ha^{-1}) e no ano de 1998 (baixa - 57 kg ha^{-1} , média - 115 kg ha^{-1} e alta - 172 kg ha^{-1}) na produção de milho. No ano 1997 cultivou-se soja sem o uso de adubação nitrogenada. O milho respondeu à adubação nitrogenada apresentando uma produtividade média nos dois anos de cultivo de 6.176 kg ha^{-1} , 8.468 kg ha^{-1} e 8.722 kg ha^{-1} para as doses baixa, média e alta de N aplicado, respectivamente. As perdas de NO_3^- em massa de matéria seca foram de $29,2 \text{ kg ha}^{-1}$, $34,7 \text{ kg ha}^{-1}$ e $48,4 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente, para os tratamentos de baixo, médio e alto nível de fertilizante aplicado.

A disponibilidade do nitrogênio no solo para a cultura de milho possui fundamental relação para o aumento do rendimento de grãos. A aplicação do nutriente pode proporcionar aumentos significativos quando da utilização de genótipos com alto potencial de resposta, associada ou não a fatores (bióticos e abióticos) que favoreçam o bom crescimento e desenvolvimento das plantas. Costa et al. (2005) com o objetivo de caracterizarem o efeito da adubação nitrogenada (0; 60; 120; 180 e 240 kg ha^{-1}) no rendimento de grãos de alguns genótipos (P-30F45; C-333B; P-30K75; CO-9560 e C-909) de milho em diferentes ambientes (foram utilizados duas épocas de semeaduras no mesmo local), sob irrigação por aspersão do tipo pivô central, com adubação nitrogenada, obedeceram a seguinte recomendação: 30% na semeadura e o restante entre os estádios fenológicos 1 e 2 (5 a 6 folhas), utilizando o fertilizante uréia como fonte; concluíram que: (1) – o desempenho do genótipo é dependente da época de semeadura, sendo que a adubação nitrogenada propicia maior aumento no rendimento de grãos quando a condição ambiental não é limitante; (2) para as condições ambientais menos limitantes a adubação nitrogenada propiciou aumento de rendimento médio de 236% (variando de 175 a

356%). Para as estimativas dos efeitos dos genótipos, constata-se que a maioria dos genótipos utilizados possui um bom potencial de resposta à aplicação do fertilizante nitrogenado, acima da dose de 120 kg ha⁻¹.

2.1.6 Soma do excesso de água (SEW₃₀)

O principal objetivo da drenagem consiste em garantir condições de aeração na zona radicular favoráveis ao desenvolvimento das culturas agrícolas. Considerando que esse objetivo está intimamente correlacionado ao controle da profundidade do LF e que esta profundidade pode ser facilmente monitorada nos experimentos, foram desenvolvidos vários índices no intuito de correlacionar a oscilação sazonal do lençol com a produtividade das culturas (SMEDEMA, 1988). Um desses índices é o SEW₃₀, definido como o somatório dos produtos dos dias pelos centímetros de altura do lençol freático acima de um plano localizado a 30 cm de profundidade (FEDDES, 1988). Esse índice permite avaliar a produtividade das culturas sob condições que o lençol freático atinja a zona radicular (MIRANDA, 1997).

A definição de SEW (soma do excesso de água) é representada pela soma do valor excedente de água no solo, constituindo-se em um índice de estresse cuja finalidade é quantificar o efeito, sobre a produtividade, da ocorrência do LF entre a superfície do solo e a profundidade de 0,30m. Esse índice de estresse estabelece como excesso de água, a localização do LF entre a superfície do solo e a profundidade de 0,30 m, sendo considerados aditivos seus efeitos na produtividade das culturas. Costa (1994) encontrou uma dispersão de pontos observados entre a produtividade relativa de milho em função do SEW₂₀, com valores relativamente baixos do coeficiente de determinação (R²), com uma tendência da produtividade do milho aumentar com o acréscimo dos valores de SEW₂₀, indicando que o rendimento da cultura não foi comprometido por excesso de umidade por causa do lençol freático ter sido rebaixado em tempo hábil pelo sistema de drenagem.

Este índice é empregado para quantificar condições de umidade excessiva durante o ciclo da cultura podendo ser expresso por:

$$SEW_{30} = \sum_{i=1}^n (30 - y(i)) \quad (1)$$

em que $y(i)$ é a profundidade do LF abaixo da superfície do solo no dia “i” (cm) e “n” é o número de dias na estação de crescimento. Os termos negativos do somatório são desprezados.

O índice SEW_{30} pode ser considerado um método aproximado para medir a qualidade da drenagem. De um modo geral, considera-se adequada àquela drenagem que proporciona um SEW_{30} menor do que 100 cm dia durante o ciclo da cultura (SKAGGS, 1981).

2.2 Material e métodos

2.2.1 Local e caracterização da área experimental

O experimento foi desenvolvido em uma área de várzea localizada no Campo Experimental de Drenagem pertencente ao Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo, ESALQ/USP, Piracicaba-SP, situado nas coordenadas geográficas de 22°42’30” de latitude sul e 47°36’00” de longitude oeste, a uma altitude média de 546 m.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo CWa, tropical úmido, com três meses mais secos (junho, julho e agosto), ocorrendo chuvas de verão e secas de inverno, apresentando temperatura média do mês mais quente superior a 22 °C e do mês mais frio inferior a 18°C. A precipitação pluvial média anual é de 1250 mm, aproximadamente, com maior concentração nos meses de novembro a fevereiro, principalmente com chuvas de alta intensidade e curta duração (SENTELHAS, 1998).

Trata-se de uma área sistematizada, medindo 8.100 m² (180 m x 45 m), situada entre uma encosta e o rio Piracicaba, em solo classificado como Gleissolo eutrófico, horizonte ‘A’ moderado, textura argilosa com inclusões de solos vérticos, que possui camada impermeável a aproximadamente quatro metros de profundidade, segundo mapeamento de solos da ESALQ/USP. A área foi cercada por tela contendo um fio de arame farpado a 0,15 m de altura do solo, com a finalidade de proteção contra animais, especialmente de capivaras. O sistema de drenagem, já implantado, é constituído por 19 drenos subterrâneos paralelos de PVC corrugado que deságuam em um coletor aberto (o 19º dreno não está funcionando, pois se encontrava colmatado). O espaçamento entre drenos adotados na área experimental em questão foi de 10 m, instalados na profundidade de 1 m e declividade de 3 por mil. O comprimento dos drenos é 45 metros e o diâmetro dos tubos de PVC corrugado de 0,10 m, sendo utilizado como envelope de recobrimento dos drenos, uma manta de poliéster (bidim tipo OP-20 da Rodhia) (Figuras 1 e 2). O canal coletor possui uma profundidade de 1,40 m e declividade de 0,002 m m⁻¹, com um

desnível de aproximadamente 0,4 m de profundidade entre a boca dos drenos tubulares e o fundo do canal coletor, o que permite a introdução de recipientes para coleta de efluentes e determinar o fluxo da água drenada (COSTA, 1994; LAHÓZ, 1994; DUARTE, 1997).

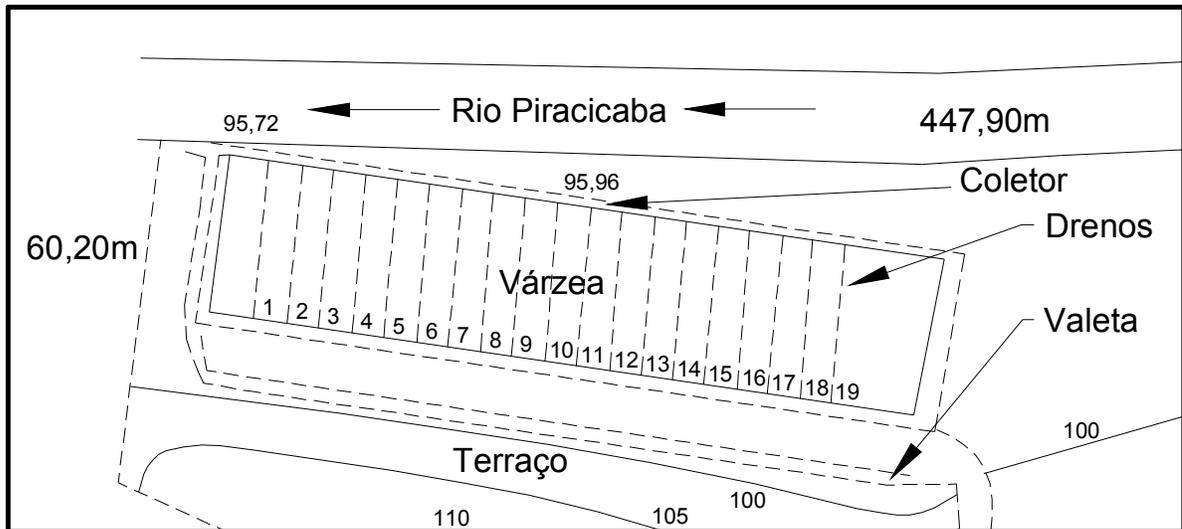


Figura 1 – Levantamento planialtimétrico do campo experimental de drenagem, localizado na ESALQ/USP



Figura 2 – Área experimental antes da instalação do ensaio

No início do período experimental, fez-se uma limpeza do coletor e da área adjacente, fazendo-se uma roçagem e colocando-se os restos vegetais para fora da área experimental. A área experimental encontrava-se em pousio, tendo sido cultivada pela última vez com a cultura do

milho no ano agrícola de 1994/95. Anualmente essa área era roçada mecanicamente de duas a três vezes, havendo predominância do capim-colonião (*Panicum maximum*). Em função do longo período que essa área ficou em pousio, o fundo do dreno coletor aberto estava um pouco assoreado. Fez-se um aprofundamento manual do seu canal, deixando-se no mínimo 0,40 m abaixo da boca de cada dreno, refazendo-se as caixas coletoras retangulares por meio de limpeza das bocas dos drenos, facilitando assim as determinações das vazões na boca dos drenos e as coletas de água. O coletor foi mantido limpo do início ao final do experimento.

A média da condutividade hidráulica saturada (K_o) da área foi de $0,61 \text{ m dia}^{-1}$, determinada segundo Costa (1994), utilizando-se o método do poço ou furo do trado, tradicionalmente o mais usado em pesquisa de drenagem subterrânea, medida na parte central dos drenos laterais um e dois, num total de cinco testes, com três repetições.

Delineamento experimental dos tratamentos

Utilizou-se um delineamento experimental de blocos casualizados, com cinco tratamentos e três repetições. Os tratamentos foram compostos de cinco doses de adubação nitrogenada ($T_1 - 0$; $T_2 - 50 \text{ kg ha}^{-1}$ de N; $T_3 - 100 \text{ kg ha}^{-1}$ de N; $T_4 - 150 \text{ kg ha}^{-1}$ de N e $T_5 - 200 \text{ kg ha}^{-1}$ de N), os quais foram distribuídos aleatoriamente em 15 parcelas medindo cada uma $302,4 \text{ m}^2$ (9 m x 33,6 m). Cultivou-se também duas parcelas nas extremidades, de igual dimensão das parcelas dos tratamentos, sem se fazer adubação química, funcionando como bordadura nas laterais do experimento.

Em cada parcela experimental havia um dreno subterrâneo na sua parte central. Entre as parcelas, ao longo dos drenos, foram construídas valas feitas com um sulcador de cana-de-açúcar e camalhões construídos manualmente na parte superior seguindo a orientação dos drenos subterrâneos (Figura 3), separando as parcelas. As valetas possuíam 0,6 m de largura, aproximadamente, e tiveram como finalidade de diminuir a influência do escoamento superficial entre os tratamentos.

Essas valas foram construídas até chegarem ao dreno coletor e podiam funcionar também como sistema de drenagem superficial. No final de cada vala foi colocado um tubo de PVC de esgoto de 1,5 m de comprimento e 0,1 m de diâmetro, deixando aproximadamente 0,8 m livre, de tal maneira que a água pudesse passar por dentro dele e fosse derivada para próximo do centro do

coletor, com a finalidade de evitar possíveis riscos de erosão. Deixou-se o restante do tubo, 0,7 m, enterrado no final das valas (Figura 4). Entre o telado e o dreno coletor, fez-se uma pequena barragem para controlar o escoamento superficial, de maneira que a água da chuva fosse absorvida pelas plantas, evaporada, retida no solo ou drenasse pelos drenos subterrâneos.



Figura 3 – Construção das valas e camalhões entre as parcelas experimentais



Figura 4 – Tubo de PVC instalado no final da vala da área experimental

2.2.2 Implantação da cultura do milho na área experimental

O preparo do solo foi feito no dia 21 de outubro de 2004 e constou de duas passagens de grade aradora pesada. A primeira gradagem foi iniciada pela lateral esquerda da várzea e a segunda pela parte central da área, com a finalidade de realizar um melhor destorroamento do solo argiloso, sem alterar a sistematização do terreno (Figura 5). No dia 04 de novembro de 2004, um dia antes da semeadura, passou-se uma grade niveladora para controlar algumas ervas daninhas que surgiram nesse intervalo de tempo, destorroar mais e dar um melhor nivelamento ao solo.

Antes da instalação do experimento foi realizada uma amostragem composta do solo, no mês de outubro de 2004, a uma profundidade média de 0-0,20 m, para a sua caracterização física e química (Tabela 1). Essas análises foram realizadas pelo Laboratório de Fertilidade de Solos, pertencente ao Departamento de Solos e Nutrição de plantas da ESALQ/USP.

As análises químicas do solo demonstraram que o mesmo apresentava uma boa fertilidade, tendo em vista valor elevado de CTC, estando também bem provido de P, K, Ca, Mg e pH sem problema de Al.



Figura 5 – Preparo do solo da área experimental

A adubação foi definida em função da análise do solo para uma produtividade de milho esperada de 8 a 10 Mg ha⁻¹, segundo van Raij et al. (1997). A adubação de semeadura foi feita com adubadeira mecânica acoplada a um microtrator pertencente ao Departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP. Na semeadura, todas as parcelas receberam 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 50 kg ha⁻¹ de K₂O e 40 kg ha⁻¹ de S, na forma de superfosfato simples, cloreto de potássio e enxofre, o

qual encontrava-se juntamente com o superfosfato simples, estimado em uma concentração de 12%. Posteriormente, aplicou-se manualmente em sulcos feitos com enxadas com 0,05 a 0,10 m de profundidade 30 kg ha⁻¹ de N, na forma de uréia, exceto para o tratamento testemunha. A uréia foi colocada a uma distância lateral cerca de 0,05 m, aproximadamente, das linhas de plantas de milho e em seguida foi coberta.

Tabela 1 – Resultados das análises químicas e físicas do solo na camada de 0 a 0,20 m de profundidade na área experimental antes da instalação do experimento

Análises químicas	Unidade	Resultados
pH (CaCl ₂)	-	6,4
Matéria orgânica	g dm ⁻³	32
P (resina)	mg dm ⁻³	30
S	mg dm ⁻³	13
K	mmol _c dm ⁻³	1,3
Ca	mmol _c dm ⁻³	240
Mg	mmol _c dm ⁻³	160
Al	mmol _c dm ⁻³	0
H+Al	mmol _c dm ⁻³	25
SB	mmol _c dm ⁻³	401,3
CTC	mmol _c dm ⁻³	426,3
V	%	94
m	%	0
----- Micronutrientes -----		
B	mg dm ⁻³	0,45
Cu	mg dm ⁻³	5,3
Fe	mg dm ⁻³	67
Mn	mg dm ⁻³	24,9
Zn	mg dm ⁻³	2,3
----- Análise granulométrica -----		
Areia	g kg ⁻¹	180
Silte	g kg ⁻¹	280
Argila total	g kg ⁻¹	540
Classe de textura	-	argilosa

Foram semeadas longitudinalmente na área 48 fileiras de milho, espaçadas de 0,7 m, e com 170 m de comprimento, ocupando uma área de 5.712 m² (170 x 33,6 m), área representativa que foi considerada nos cálculos de perdas por lixiviação de nitrato, localizadas na parte central e ortogonal aos drenos laterais por causa da maior facilidade para o trator fazer essa operação nesta direção.

A semeadura do milho foi realizada no dia 05 novembro de 2004, utilizando-se sementes do híbrido simples 30P70, de ciclo precoce da Pioneer, utilizando-se uma semeadora-adubadora pertencente ao Departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP, numa densidade de cinco a seis sementes por metro linear de sulco. Foi considerada uma germinação de 85%, descrita no prospecto do saco de milho, e um índice de mortalidade de 10%. A população de plantas de milho almejada foi de 60 mil por hectare.

A emergência das plantas de milho ocorreu aos 11 dias após a semeadura, no dia 15 de novembro de 2004, recebendo essa data a classificação de 1º dia após a emergência (DAE). Todos os eventos e estádios da cultura foram classificados por DAE.

Após a semeadura, fez-se a aplicação de um herbicida seletivo, indicado para o controle de plantas daninhas, na cultura do milho, (Primextra gold), contendo 370 g L⁻¹ de atrazina mais 290 g L⁻¹ de S-metalacoloro, na dosagem de 4,5 L ha⁻¹ do produto comercial. Utilizou-se um pulverizador acoplado a um trator, aplicando o produto a uma altura média de 0,50 m acima do dossel.

A adubação nitrogenada de cobertura foi realizada com uréia aplicada manualmente na superfície do solo correspondente a complementação de cada tratamento (T₂ - 20 kg ha⁻¹ de N, T₃ - 70 kg ha⁻¹ de N, T₄ - 120 kg ha⁻¹ de N, T₅ - 170 kg ha⁻¹ de N), quando as plantas de milho estavam com seis a sete folhas expandidas, aos 31 dias após a emergência (DAE).

Durante todo o ciclo a cultura foi mantida livre da concorrência de plantas invasoras, exceto da tiririca (*Cyperus rotundus*), a qual foi controlada por meio de duas capinas manuais e uma aplicação de sulfonil uréia (herbicida Sempra), na dose de 150 g ha⁻¹ (112,5 g ha⁻¹ de i.a), mais 0,5% a base de volume de espalhante adesivo, aplicado ao 28 DAE, utilizando um pulverizador costal com capacidade de 20 L. Antes da aplicação fez-se a regulagem do pulverizador e pesou-se o herbicida granulado em uma balança analítica, colocando por intermédio de um papel alumínio o peso correspondente a cada bomba a ser aplicada.

Foram realizadas três pulverizações, aos 11, 17 e 35 DAE, para o controle da lagarta rosca (*Agrotis ipsilon*) e do cartucho (*Spodoptera frugiperda*), aplicando-se, respectivamente deltamethrina (Decis 25), na dosagem de 0,2 L ha⁻¹ de i.a na formulação de concentração emulsionável. Adicionou-se na calda espalhante adesivo na concentração de 100 mL do produto para 100 L de água. Na mesma bomba adicionou-se adubo foliar AF-1 (composição: potássio solúvel em água 10% K₂O, magnésio 3% Mg, Zinco 6% Zn, boro 3% B, molibdênio 0,5% Mo e manganês 0,1% Mn), que possuía natureza física na forma de pó, na concentração de 100 g do produto para 100 L de água.

2.2.3 Análise química do teor de N total no florescimento e após a maturação fisiológica

Foram coletadas por ocasião do florescimento do milho, aos 57 DAE, 15 folhas de plantas de milho localizadas da base da espiga principal (superior), dentro da área útil da parcela, escolhidas aleatoriamente, de cada tratamento, selecionando-se somente o terço central dessas folhas, dividida utilizando uma tesoura, segundo metodologia descrita por van Raij et al. (1997). Após a coleta, o material foi acondicionado em sacos de papel com capacidade de 10 kg e levado para o Laboratório de Física do Solo do Departamento de Engenharia Rural, da ESALQ/USP (DER) onde foram secas a 65°C, em uma estufa com circulação forçada de ar por um período de 72 horas. Após a secagem, o material foi levado para o Laboratório de Fertilidade do Solo do Centro de Energia Nuclear na Agricultura, CENA/USP, onde foram passados em um moinho de aço inoxidável Wiley, em peneira de 20 mesh.

Para a determinação do teor de N total foram pesados 100 mg de matéria seca e moída de cada tratamento, adicionando-se 7 mL de H₂SO₄ e colocando-se um bloco digestor no interior de uma capela ventilada, por 4 horas, com um aumento gradual da temperatura até atingir a 350°C. Após a digestão fez-se a destilação com hidróxido de sódio, recebendo o destilado em ácido bórico. Na seqüência fez-se a titulação com ácido clorídrico, até a mudança de cor, segundo a metodologia proposta por Malavolta; Vitti e Oliveira (1997).

Após a determinação da matéria seca do colmo, bainha, folha, brácteas e pendão das plantas de milho no estágio farináceo, aos 99 DAE, fez-se uma mistura dessas matérias das duas plantas colhidas, fragmentou-se manualmente, em pequenos pedaços, e passou-se em uma máquina trituradora de plantas, retirando-se uma amostra que foi levada logo em seguida para passar em um moinho tipo Wiley, em peneira de 20 mesh.

Após a colheita final do milho, cortou-se rente ao solo 12 plantas de milho, as quais já tinham sido colhidas, pesou-se essas plantas e em seguida passou-se as mesmas em uma forrageira elétrica pertencente ao Departamento de Zootecnia da ESALQ/USP. Fez-se uma homogeneização desse material e retirou-se uma amostra, a qual foi levada para o Laboratório de Física do Solo do DER-ESALQ/USP. Colocou-se esse material em estufa ventilada a 65°C por 72 horas para determinação da matéria seca. Fez-se novamente uma homogeneização dessa matéria seca e retirou-se uma amostra, a qual foi levada para o CENA/USP para passar no moinho tipo Wiley, em peneira de 20 mesh.

Retirou-se também uma amostra de grãos de milho colhido no estágio farináceo e na colheita final. Ambos foram secos previamente em estufa ventilada por 72 h a 65°C. Em seguida foram levados para o CENA/USP para passar no moinho de inox Wiley, em peneira de 20 mesh.

Com todo o material moído, fez-se a determinação de N total, no Laboratório de Fertilidade do solo pertencente ao CENA/USP, segundo metodologia descrita por Malavolta; Vitti e Oliveira (1997).

2.2.4 Avaliações fenológicas no estágio farináceo e após a maturação fisiológica do milho

Índice de colheita e área foliar específica no estágio farináceo

Aos 98 DAE, fez-se uma amostragem de espigas de milho dos diferentes tratamentos para determinar a umidade, utilizando o aparelho Mult-grain, marca Dickey John. Debulhou-se a parte central das espigas, fez-se uma mistura composta e em seguida retirou-se uma sub-amostra para se determinar o teor de água, a qual foi de 46%, ponto esse que foi considerado como estágio farináceo dos grãos, indicando que o material poderia ser cortado para se fazer silagem.

De cada tratamento no campo, aos 99 DAE, foram retiradas, aleatoriamente, duas plantas de milho com raízes e torrões de solo, utilizando-se uma picareta, contendo o maior número possível de raízes. Em seguida, essas plantas foram transportadas cuidadosamente para o posto de lavagem de veículos do Departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP. Com o auxílio de um lava jato, separou-se o solo das raízes, deixando as plantas secarem ao ar livre por 30 minutos, aproximadamente (Figura 6).



Figura 6 – Plantas de milho com raízes no estágio de grãos farináceos

Após a secagem, as plantas foram levadas para o Laboratório de Ecofisiologia de Plantas pertencente ao Departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP, onde cada planta de milho foi dessecada, separadamente, em raiz, colmo, bainha, folha seca, folha verde, brácteas (palha da espiga de milho), sabugo, grãos, cabelos (pistilo mais estigmas) e pendão (inflorescência). Cada parte da planta foi colocada dentro de saco de papel capacidade de 10 kg, devidamente identificado e transportada para o Laboratório de Física do Solo do DER-ESALQ/USP, onde foram secas a 65°C em uma estufa com circulação forçada de ar por um período de 72 horas, exceto para os colmos, os quais foram deixados por mais 48 horas para serem pesados.

Medindo-se as folhas verdes e algumas secas antes de serem acondicionadas em sacos de papel foi determinada a área foliar, utilizando-se um medidor de área foliar digital LI-300 (LI-COR).

Determinou-se dois índices de colheita, dividindo-se a massa de grãos secos pela massa com e sem raiz mais a massa de colmo, bainha, folhas, brácteas, sabugo, cabelos e pendão.

O índice de área foliar foi determinado utilizando-se a equação (2):

$$IAF = \frac{6AF}{10000} \quad (2)$$

em que AF é a área foliar da planta de milho (cm²) e IAF é o índice de área foliar (m² de folha por m² de solo).

Altura de planta e da inserção da espiga de milho

Aos 122 DAE foi realizada uma amostragem aleatória de espigas de milho representativa de cada tratamento, onde se determinou a umidade dos grãos com o aparelho Multi-grain, marca Dickey John, o qual foi de 28%. Nesta data, observou-se também pela primeira vez a presença da camada negra, no ponto de inserção do grão com o sabugo, após um corte transversal feito com o auxílio de um bisturi, indicativo da maturação fisiológica, trabalho esse realizado no Laboratório de Sementes pertencente ao Departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP (Figura 7).



Figura 7 – Vista da área experimental após a maturação fisiológica do milho

A altura de plantas e de inserção de espigas foram determinadas, aos 125 DAE, após a constatação da maturação fisiológica do milho, medindo-se com auxílio de uma mira topográfica a distância entre o colo da planta e a inserção da última folha. Para a espiga, foi medida a distância entre o colo da planta e a inserção da espiga principal (superior), em amostras de 30 plantas escolhidas aleatoriamente dentro da área útil da parcela de milho, em cada tratamento.

2.2.5 Produção de milho e seus componentes

A colheita foi realizada manualmente aos 132 DAE. A área útil constou de 20 amostragens de três metros de comprimento, totalizando uma área de 42 m² (20 amostras x 0,7 espaçamento x 3 m), coletadas aleatoriamente ao longo da área plantada com milho referente a cada parcela. Eliminou-se uma fileira nas extremidades da área e no mínimo duas plantas de milho nas laterais. Na colheita foram coletadas em torno de 252 plantas competitivas por tratamento, as quais formaram a base da determinação dos parâmetros de produção da cultura.

As espigas foram acondicionadas em sacos de fibra de nylon com capacidade de 50 kg, devidamente identificadas e em seguida transportadas para o Laboratório de Física do Solo do DER-ESALQ/USP.

No Laboratório de Física do solo do DER-ESALQ/USP, fez-se a retirada manual das brácteas das espigas de milho e a suas respectivas pesagens (massa úmido). Em seguida, retirou-se amostras de brácteas de cada tratamento que foram colocadas em estufa ventilada a 65°C, por 72 horas, para determinação de matéria seca das brácteas.

As espigas de milho, sem brácteas, passaram um dia completo, fora dos sacos, no secador de café do Departamento de Produção Vegetal. No dia seguinte, no Laboratório de Física do Solo do DER, fez-se as medidas de comprimento de espigas, utilizando um tubo de esgoto de PVC com diâmetro de 0,075 m, de seis metros de comprimento dividido ao meio, com um cap em uma das extremidades, fixado com parafusos em tábuas de madeira (Figura 8). Colocavam-se as espigas em seqüência, uma atrás das outras, e no final das medidas de cada tratamento, caso necessário, quando não completavam os seis metros, media-se com o auxílio de uma trena métrica e em seguida fazia-se a contagem do número de espigas do referido tratamento. Dividiu-se esses dois valores e obteve-se assim o comprimento médio de espigas por tratamento.

O diâmetro das espigas foi determinado utilizando-se um suporte de ferro colocado em cima da bancada do laboratório, para dar maior sustentação no início da colocação das espigas. Em seguida colocavam-se as espigas alternadamente e faziam-se as medidas ortogonalmente com uma trena métrica, obtendo-se o diâmetro total, o qual dividiu-se pelo número de espigas, obtendo-se assim o diâmetro médio.

Fez-se a contagem do número de fileiras de cada espiga, anotando-se em uma planilha de acordo com número de fileira que possuía. No final, fez-se a contagem do número de espigas com os respectivos números de fileira.

As espigas de milho sem brácteas foram debulhadas, utilizando-se uma máquina debulhadeira de milho pertencente ao Departamento de Genética da ESALQ/USP. As espigas foram colocadas uma a uma; os grãos ventilados e limpos saíam por uma extremidade e os sabugos praticamente inteiros saíam por outra.



Figura 8 – Medição do comprimento médio das espigas de milho

Após essa operação, fez-se a pesagem dos sabugos, retirando-se uma amostragem, a qual foi colocada em um saco de papel de 10 kg, posto na estufa ventilada a 65°C, por um período de 72 horas para determinação da matéria seca.

Os grãos de milho foram pesados; logo em seguida misturou-se bem dentro do saco de nylon de capacidade de 50 kg e retirou-se uma amostra de um quilo, de cada tratamento, que foi posta dentro de saco de plástico e mantida fechada, para a determinação do teor de água e massa de 1000 grãos no dia seguinte.

Determinação do teor de água e da massa de 1000 grãos

O teor de água e a massa de 1000 grãos foram determinados no Laboratório de Sementes pertencente ao Departamento de Produção Vegetal da ESALQ/USP.

Os sacos plásticos contendo um quilo de grãos de milho foram abertos no início do teste. Pesaram-se amostras de 20 g de grãos, aproximadamente, que foram colocadas dentro de latas de alumínio, pesadas previamente, de cada tratamento, repetidas três vezes. Em seguida, essas amostras foram colocadas em estufa a 105°C, por um período de 24 horas. Após esse tempo,

fecharam-se as latas de alumínio rapidamente e colocaram-se as mesmas dentro de um dessecador para esfriar por um período de 15 minutos, aproximadamente. Em seguida, fez-se a pesagem dos grãos secos (BRASIL, 1992).

A percentagem do teor de água dos grãos foi calculada na base da massa úmida, utilizando-se a equação (3):

$$U = \frac{(Pu - Ps)}{(Pu - t)} 100 \quad (3)$$

em que U é o teor de água (%); Pu é a massa inicial – massa do recipiente + tampa + massa de grãos úmido (g); Ps é a massa final - massa do recipiente + tampa + massa de grãos seco (g) e t é a tara – massa do recipiente com sua tampa (g).

O teor de água considerada neste trabalho foi obtido pela média das três repetições retiradas da amostra média. A diferença entre os resultados das repetições não foi superior a 5%.

Os valores médios do teor de água dos grãos variaram de 12,5% a 15,0%, por isso as massas de grãos foram corrigidas para o teor de água de 13%, utilizando-se a fórmula (4):

$$Pc = \frac{Po \left(1 - \frac{Uo}{100}\right)}{\left(1 - \frac{Uc}{100}\right)} \quad (4)$$

em que Pc é o massa de grãos de milho corrigido para o teor de água desejada (kg); Po é o massa de grãos observado (kg); Uo é o teor de água dos grãos observado (%) e Uc é o teor de água de correção de grãos (%).

A massa de 1000 grãos foi determinada no Laboratório de Sementes utilizando um aparelho contador de sementes (Seedburo 801, Count-a-park), o qual fez a contagem de 1000 grãos de milho (Figura 9). Em seguida fez-se a pesagem desses grãos, obtendo-se assim a massa de 1000 grãos de milho. Essas pesagens foram corrigidas para o teor de água a 13%.

O número de grãos por espigas foi estimado utilizando-se a massa total de cada parcela e dividindo-se pelo número de espigas, obtendo-se assim a massa de grãos por espiga; em seguida este valor foi transformado no número de grãos por espigas em função da massa de 1000 grãos, corrigidos para 13% de teor de água.



Figura 9 – Máquina contadora de grãos

2.2.6 Instalação de equipamentos e monitoramento de parâmetros hídricos

Os tensiômetros e extratores de solução utilizados foram limpos com sabão em água corrente e em seguida foram colocados por um período de quatro dias saturando dentro de um recipiente com uma lâmina de água correspondente a um terço da altura dos menores tensiômetros ou extratores. Após esse período, retirou-se a água do interior dos tensiômetros e extratores de solução levando-se para um sistema de bomba de vácuo, pertencente ao Laboratório de Física do Solo do DER-ESALQ/USP, onde foram imersos em um recipiente com água com uma pressão de 100 kPa, por um período de dois minutos aproximadamente, para avaliar possíveis rachaduras. Com a finalidade de não se ter interferência de sais constituintes das cápsulas porosas de cerâmica, deixou-se o conjunto saturando por mais uma semana, período após o qual foram instalados no campo.

O teor de água do solo foi monitorado por meio de tensiômetros instalados aos 15 DAE, dentro das fileiras de milho a uma profundidade média de 0,20 e 0,40 m e dois metros de distância do dreno subterrâneo. As tensões foram medidas diariamente, utilizando-se um vacuômetro digital (tensímetro).

As soluções do solo, para a determinação da concentração de nitrato, foram obtidas utilizando-se extratores de solução de cápsulas porosas de cerâmicas em sua extremidade inferior

e borrachas especiais com vedação de silicone na extremidade superior. Foi promovida uma tensão de 70 a 80 kPa por meio de um vacuômetro (bomba de vácuo manual), de dois a quatro dias antes das coletas de solução. As cápsulas dos extratores de solução foram instaladas dentro das fileiras de milho, aos 15 DAE, ao lado dos tensiômetros, à profundidades de 0,20 e 0,40 m da superfície do solo. Como a coleta de solução do solo dava-se em função da umidade do solo e esta dependia dos eventos das precipitações pluviais; fazia-se leituras diárias das tensões dos extratores, e sempre que necessário, fazia-se vácuo, deixando-os sempre com uma tensão entre 70 a 80 kPa.

Antes de se fazer as coletas definitivas das soluções dos extratores, esses foram colocados em operação por três vezes e em seguida foram esvaziados, eliminando-se essa solução.

Foram realizadas sete coletas de solução de solo para análise de nitrato aos 35, 38, 45, 59, 67, 81 e 126 DAE. As soluções foram colocadas em recipiente de plástico, de cor preto, com capacidade de 80 mL, aproximadamente. Em seguida eram colocadas em caixa de isopor e transportadas para o Laboratório de Ecologia Aplicada da ESALQ/USP, onde ficavam guardadas em freezer até a hora de serem analisadas (Figura 10).



Figura 10 – Material utilizado na coleta de água

Monitoramento do lençol freático

As flutuações do lençol freático podem propiciar situações de estresse não só de excesso de água, como também de seca, e alternadamente, durante o ciclo de uma cultura.

A profundidade de instalação dos poços de observação foi a mínima necessária para que fosse atingido o lençol freático, a fim de evitar o efeito do “seepage” vertical sobre a leitura freática, que poderia ocorrer caso os furos fossem profundos.

Os poços de observação foram constituídos de tubos de PVC com diâmetro nominal de 50 mm, PN 80, com 1,5 m de comprimento. Foram feitos furos com uma broca de oito milímetros de diâmetro distanciados de cinco centímetros, aproximadamente, até completar 0,5 m, em uma das extremidades dos tubos. Em seguida furou-se novamente de forma transversal e alternadas em relação aos furos anteriores até a mesma altura (Figura 11).



Figura 11 – Construção e instalação dos poços de observação

Em cada tubo, correspondente a um poço de observação, colocou-se dois círculos feitos de borracha de câmara de ar de carro com 0,2 m de diâmetro, aproximadamente, localizados a 0,6 m e 1,2 m de altura, ficando este último na superfície do solo, com a finalidade de evitar infiltrações preferenciais para o lençol freático.

Os poços de observação foram perfurados com trado tipo holandês, de três polegadas de diâmetro a profundidade de 1,2 m, aproximadamente.

Sete dias após a semeadura do milho, instalaram-se os tubos. A instalação consistiu em colocá-los cuidadosamente dentro dos poços de observação, feitos previamente, para que as borrachas localizadas a 0,6 m, não se deslocassem; em seguida adicionou-se solo até a superfície, local onde foi colocada a segunda borracha, a 1,2 m de altura, deixando-se uma ponta de 0,3 m acima da superfície do solo livre, mas cobertos com uma tampa. Foi colocado um poço por parcela, localizado a 15 m do coletor e a dois metros ao lado do dreno subterrâneo de PVC corrugado, totalizando quinze poços. Estas estruturas foram utilizadas no monitoramento do comportamento do lençol freático, por meio de medidas de profundidade do lençol freático em função do tempo, determinadas diariamente entre 7:00 e 8:30 h, utilizando-se um medidor de nível. Este medidor possuía um sensor que ligava uma lâmpada na parte superior, localizada fora do poço, ao tocar na água do lençol freático, fazendo-se leitura na fita métrica em seguida, registrando a sua profundidade (Figura 12). Nestes poços também foram feitas coletas de água do lençol freático para análise de nitrato.



Figura 12 – Medição da profundidade do lençol freático nos poços de observação

Foram realizadas sete coletas de água para análise da concentração de nitrato aos 35, 38, 45, 59, 67, 81 e 126 DAE.

Os dados de profundidade do lençol freático permitiram quantificar, para cada unidade experimental, o índice de estresse (SEW_{30}), que representa a soma do valor excedente de água no solo, conhecido como a “soma do excesso de água”, para avaliar o efeito, sobre a produtividade, da ocorrência do lençol freático na zona radicular da cultura. Tendo em vista a profundidade do sistema radicular, adotou-se na presente pesquisa, o índice de estresse (SEW_{30}), calculado, utilizando-se a equação 1.

O método estabelece como critério que números negativos dentro da somatória sejam negligenciados, ou seja, só são computados valores de y_i menores que 30.

As produtividades absolutas do milho foram convertidas para produtividade relativas, considerando-se a razão entre a produtividade medida para cada parcela e a produtividade potencial, sendo esta considerada como a produtividade mais alta. Na análise da dinâmica do lençol freático em relação ao rendimento da cultura, foi realizada análise de ajuste de equações relacionando a produtividade relativa com a profundidade média do lençol freático e a produtividade relativa com o índice SEW_{30} .

Monitoramento das descargas dos drenos laterais

As descargas dos drenos laterais foram medidas diariamente entre as 7:00 e 8:00 h, sempre que esses estavam funcionando e não se encontravam afogados. Inicialmente, colocava-se um recipiente de volume conhecido (4 L, 0,8 L ou uma proveta graduada de 0,1 L, dependendo da magnitude da vazão), na boca do dreno subterrâneo para coleta de água e com um cronômetro, media-se o tempo, considerando-se até o milésimo de segundo (Figura 13). Em seguida, determinavam-se as descargas dividindo-se o volume conhecido coletado pelo tempo registrado no cronômetro digital.



Figura 13 – Medição das descargas dos drenos da área experimental

Monitoramento dos eventos de precipitações pluviais

Os dados climáticos relativos à precipitação pluvial foram obtidos da Estação Meteorológica do Departamento de Ciências Exatas da ESALQ/USP, localizada à aproximadamente a 500 metros da área experimental, até o 16° DAE. Nesta data, instalou-se um pluviômetro com diâmetro de boca de 0,21 m, localizado a 1,5 m acima do nível do solo dentro da área experimental, com a finalidade de melhor avaliar esse parâmetro. As leituras foram feitas todos os dias entre 8:00 e 8:30 h. A água era coletada em uma proveta graduada e a lâmina de água era calculada dividindo-se o volume coletado pela área da boca do pluviômetro (Figura 14).



Figura 14 – Pluviômetro instalado ao lado da área experimental

2.2.7 Análise de nitrato nos efluentes

Os efluentes coletados nos drenos, nos poços de observação, nos extratores de solução instalados a 0,20 e 0,40 m de profundidade e nas valas de superfície foram analisados no laboratório de Ecologia Aplicada pertencente ao Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP.

As amostras dos efluentes eram retiradas do freezer e deixadas à temperatura ambiente até entrar em equilíbrio. Utilizou-se o método da brucina que tem como princípio, a reação do nitrato com a brucina, um alcalóide, em um meio ácido, produzindo uma solução com coloração amarela. Essa cor produzida é proporcional à sua concentração na amostra, o que permite a determinação da concentração do nitrato por colorimetria. Esse método é utilizado para soluções contendo até $5,0 \text{ mg L}^{-1}$ de nitrato. Caso a solução tivesse uma concentração de nitrato acima desse valor, fazia-se as devidas diluições necessárias, multiplicando o resultado final pela diluição efetuada. Os principais fatores que podem interferir na análise das amostras são: a coloração da amostra, presença de sedimentos em suspensão e tamanho das amostras. Coletava-se 10 mL da solução da amostra e em seguida adicionava-se 2 mL de NaCl, 10 mL de H_2SO_4 e mais 0,5 mL de brucina. Deixava-se por 20 minutos em banho Maria a 105°C e em seguida faziam-se as leituras no colorímetro (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 1976).

2.2.8 Análise estatística

Os dados de estande final e número de fileiras de sementes de milho por espiga foram submetidos a análise de variância aplicando-se o teste F ($p \leq 0,05$) e comparação de médias pelo teste de Tukey. Nos demais parâmetros, realizou-se análise de regressão e na sua análise de variância utilizou-se o teste F ($p \leq 0,05$ e $p \leq 0,01$) para definir o modelo linear ou quadrático, utilizando-se os coeficientes para ajustamento de polinômios ortogonais; a ortogonalidade entre dois contrastes indica independência entre suas comparações, ou seja, a variação de um contraste é inteiramente independente da variação do outro (GOMES, 2002; GOMES; GARCIA, 2002; BARBIN, 2003).

A análise de variância seguiu o modelo apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Esquema da análise de variância utilizada na definição do modelo de regressão

Fontes de variação	Graus de liberdade
Doses de N	4
Regressão linear	1
Regressão quadrática	1
Desvio	2
Bloco	2
Resíduo	8
Total	14

O valor do F calculado quando maior que o F tabelado indica que é significativo ao nível de 1% ou 5% de probabilidade para os tratamentos avaliados. Nesses casos, rejeitava-se, portanto a hipótese de nulidade, a hipótese de igualdades entre as médias dos tratamentos, e aceitava-se como comprovado que havia diferenças reais, não casuais, entre as médias dos tratamentos. Quando a equação de regressão é significativa significa que aquele modelo explica significativamente a variável dependente ‘y’, ao nível de 1% ou 5% de probabilidade.

O coeficiente de determinação (R^2) foi determinado pela relação entre a soma de quadrados de regressão e a soma de quadrado total. O valor de R^2 mostra a proporção da soma de quadrado total que é explicada pela regressão. Quanto mais próximo de um, melhor. O R^2 indica também a variação da variável ‘y’ que é explicada pelo modelo de regressão.

2.3 Resultados e discussão

2.3.1 Caracterização das precipitações pluviais

As precipitações pluviais constituem-se em um dos principais fatores a serem considerados nas avaliações de lixiviação de nitrato, em função da sua alta solubilidade (SPITZ; MORENO, 1996; WALKER et al., 2000; BAKSH et al., 2001; NANGIA et al., 2005). Os valores das precipitações pluviais que ocorrem no período da emergência das plântulas de milho à colheita encontram-se na Figura 15. Verifica-se que nesse período, houve uma boa distribuição das chuvas, capaz de atender, de um modo geral, à necessidade hídrica da cultura do milho, especialmente no estágio de floração e enchimento dos grãos. Nos meses de novembro, dezembro, janeiro, fevereiro e março ocorreram precipitações pluviais de 117 mm, 103 mm, 275

mm, 70 mm e 114 mm, respectivamente, ocorrendo maior altura de chuva no mês de janeiro, com um total de 562 mm, sendo que 99,3% deste total ocorreu no período da semeadura à colheita do milho. A necessidade hídrica do milho, segundo Doorenbos e Kassam (1994), para se obter produção máxima está entre 500 a 800 mm de água no ciclo, dependendo do clima. Esse dado mostra que a época de semeadura para o milho de sequeiro nos meses de outubro e novembro para a região de Piracicaba, SP, é adequada, segundo recomendações de Pereira Filho e Cruz (2003).

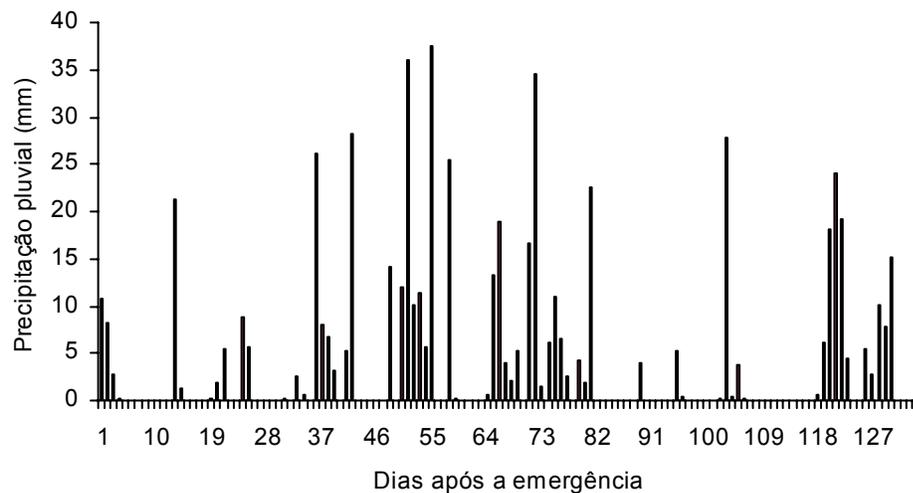


Figura 15 - Valores das precipitações pluviométricas (mm) ocorridas no período da emergência à colheita do milho

Em função da distribuição das precipitações pluviométricas a germinação do milho foi desigual inicialmente, formando um estande um pouco acima do programado. Portanto, não se fez necessário o desbaste de plantas de milho, prevendo perdas de mais plantas em função de ataques de pássaros, capinas, pragas e doenças, etc. Tudo isso ocorreu, provavelmente, por causa das precipitações pluviométricas. No dia 25 de outubro de 2004, aos nove dias antes da semeadura, houve um evento de chuva de 41,5 mm e nos dias 04 e 05 de novembro de 2004, choveu mais 5 mm. Após a semeadura, realizada no dia 05/11/04, choveu novamente no dia 11 de novembro de 2004, 14,8 mm. Observou-se visualmente nesse período que faltava umidade na superfície do solo para permitir uma boa germinação. Nos dias 15 e 16 (data considerada como primeiro dia após a emergência - DAE) de novembro de 2004 choveu 63 mm, havendo água em excesso e sendo necessário se fazer uma drenagem superficial da área, o que foi realizado por meio da abertura das valetas, devido ao fato do sistema de drenagem subterrânea não drenar a água, em

pouco tempo, o que poderia vir a comprometer a cultura do milho. Aos quatro DAE choveu mais 11,4 mm, vindo a chover novamente somente oito dias após, contribuindo para um melhor desenvolvimento e crescimento inicial das plantas, recuperando assim o seu vigor.

No período de 15 a 30 DAE choveu mais 22,2 mm. No 31º DAE, as plantas de milho encontravam-se com seis a sete folhas, nessa data fez-se a adubação de cobertura com N. No 33 e 34 DAE choveu 3,1 mm. No 36 DAE choveu mais 26,1 mm, quantidade de água suficiente para conduzir o adubo nitrogenado para a zona radicular e ficar disponível para as plantas e microrganismos do solo.

As precipitações pluviais favoreceram, provavelmente, a floração e o enchimento dos grãos de milho. Cinco dias antes de observar-se o primeiro pendão de milho, choveu 28,2 mm e no período entre essa data e o dia considerado como floração média do milho, 57 DAE, choveu mais 126,8mm. Essa precipitação, provavelmente, não foi prejudicial ao milho por causa do sistema de drenagem existente na área experimental. No período de 58 a 67 e 68 a 77 DAE houve um total de eventos de chuva de 62,3 mm e 86,3 mm, respectivamente, o que comprova, o efeito benéfico das chuvas antes, durante e após a floração do milho. No período dos 78 DAE à colheita, 132 DAE, choveu mais 184,1 mm. Isto mostra, a importância da quantidade e distribuição das chuvas para o crescimento e desenvolvimento da cultura do milho, contribuindo para uma boa produtividade de grãos. Segundo Fancelli e Dourado Neto (2000) as maiores exigências de água na cultura do milho se encontram na fase de emergência, florescimento e formação dos grãos, com uma exigência mínima de 350 a 500 mm de precipitação pluvial no verão para que se produza a contento. Lawlor et al. (2005) encontraram forte correlação entre doses de N, precipitação pluvial e produtividade de milho.

2.3.2 Tensão da água no solo

Os valores médios das tensões da água no solo (kPa), avaliados nos tensiômetros instalados aos 0,20 e 0,40 m de profundidade, ocorridas no período da emergência à colheita do milho, encontram-se na Figura 18. A análise desses dados mostra que, em geral, os valores das tensões de água no solo, provavelmente, tenham favorecido o crescimento e desenvolvimento da cultura do milho em função da boa distribuição pluvial ocorrida no período da pós-semeadura à colheita e a água deslocada por percolação oriunda da encosta.

Fancelli e Dourado Neto (2000) recomendam a proceder à irrigação toda vez que a tensão verificada for superior ou igual à tensão crítica; no caso de milho, recomendam os valores de 30 a 55 kPa, em função da profundidade de instalação do tensiômetro. Em cultura de sequeiro esses valores provavelmente são maiores em função do maior desenvolvimento do sistema radicular que geralmente é obrigado a se expandir mais em busca de soluto por causa das variações de disponibilidade hídrica para a cultura.

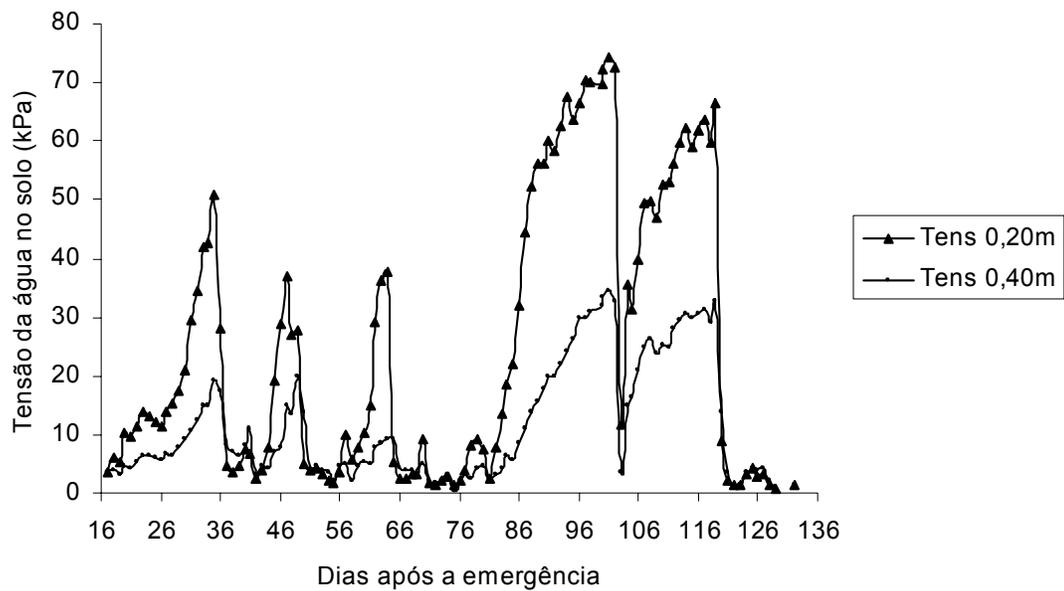


Figura 16 - Valores médios das tensões da água no solo (kPa), avaliadas nos tensiômetros instalados aos 0,20 e 0,40 m de profundidade, ocorridas no período da emergência à colheita do milho

Verifica-se que as tensões determinadas a 0,20 m foram maiores que 70 kPa somente em um curto período de tempo, de 96 a 100 DAE, aproximadamente, enquanto os tensiômetros instalados a 0,40 m de profundidade sempre estiveram abaixo desse valor.

Observa-se que a tensão média da água no solo do tensiômetro instalado a 0,20 m superior a 30 kPa ocorreu nos seguintes períodos: 33 a 51 DAE, 47 DAE, 63 a 64 DAE, 86 a 102 DAE e 104 a 119 DAE. Tensões superiores à 55 kPa foram registradas nos períodos: 89 a 102 e 112 a 119 DAE. Entretanto a tensão média dos tensiômetros instalados a 0,40 m de profundidade apresentaram somente dois períodos com tensões superiores a 30 kPa: dos 98 a 102 DAE e dos 113 a 119 DAE. Não houve tensão média superior à 55 kPa para a tensão média dos tensiômetros instalados nessa profundidade. Isto pode vir a explicar, provavelmente, as boas produtividades de

grãos de milho obtidas nos diferentes tratamentos, que foram favorecidos pela água disponível durante o seu ciclo, exceto para a fase de germinação.

2.3.3 Recargas do lençol freático

Os valores da profundidade média do lençol freático (LF) ocorridos no período da emergência à colheita do milho encontram-se na Figura 17. Observa-se que a profundidade do lençol freático varia inversamente aos valores das precipitações pluviais, ou seja, nos períodos de maior concentração de chuvas, o LF ficava mais próximo da superfície do solo, ocupando uma área porosa do solo maior e reduzindo a aeração do solo. Esse processo foi controlado por causa da existência da drenagem subterrânea e superficial que controlavam a altura do LF, não permitindo a existência de longos períodos de solos inundados e/ou encharcados o que poderia prejudicar a disponibilidade de oxigênio no solo e impedir o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular do milho. Nos períodos de veranicos verifica-se maior profundidade do LF, entretanto sempre houve valores de descargas médias dos drenos subterrâneos.

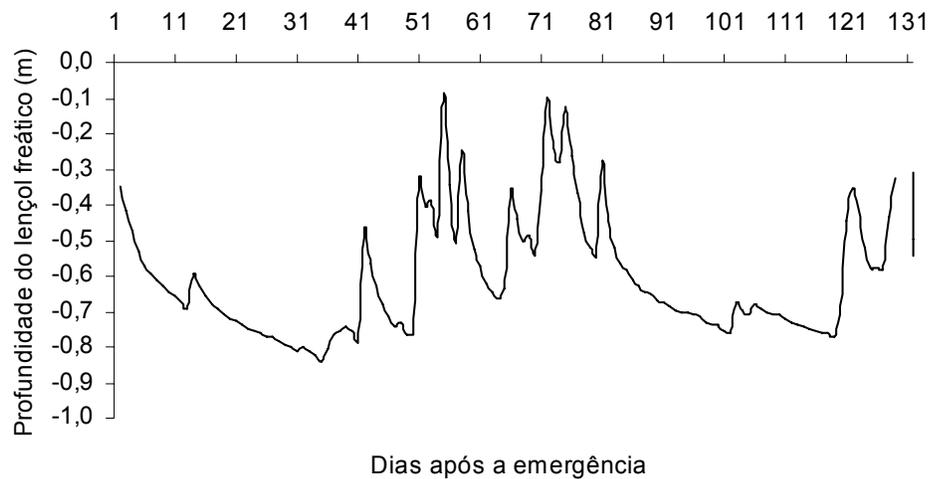


Figura 17 - Valores da profundidade média do lençol freático ocorrido no período da emergência à colheita do milho

No período de 1 a 49 DAE, o LF ficou a altas profundidades, variando de 0,4 m a 0,84 m, sendo que o menor valor ocorreu aos 34 DAE, apresentando um valor médio de 0,69 m. Nesse período, as precipitações pluviais que ocorreram, provavelmente, só dariam para atender a

demanda hídrica da planta no solo, não tendo muita influência na altura do LF, mantendo o mesmo sempre mais profundo.

No período de 48 a 55 DAE houve um total de precipitação pluvial de 126,8 mm, sendo que aos 48 e 50 DAE choveu, respectivamente, 14,2 e 12 mm, quantidade de água suficiente, para reabastecer o solo e os demais eventos de chuva passaram a ter maior influência em aumentar o LF nesse período, variando de 0,32 a 0,47 m, com um valor mínimo de 0,08 m aos 54 DAE e apresentando uma média de 0,34 m.

No período de 56 a 69 DAE houve um rebaixamento do LF, variando de 0,25 a 0,66 m, com um valor médio de 0,51m; entretanto nesse período houve uma precipitação pluvial total de 69,7 mm, sendo que 36,4% ocorreu aos 58 DAE e 45,91% aos 65 e 66 DAE, quantidade de água suficiente para reabastecer a água disponível do solo, a qual foi perdida, provavelmente, em maior quantidade para a atmosfera por meio da evaporação e transpiração das plantas de milho e plantas invasoras.

No período de 70 a 76 DAE o LF voltou a diminuir a profundidade, em função das chuvas que ocorreram no período, totalizando 76,4 mm. O LF variou de 0,09 a 0,36 m, com um valor médio de 0,25 m. No período de 76 a 132 DAE houve um rebaixamento do LF mantendo-se em um valor médio de 0,68 m, sem apresentar grandes variações de profundidade do LF que viesse a comprometer a zona do sistema radicular do milho. Resultados semelhantes foram encontrados por Duarte et al. (2005) utilizando modelo SISDRENA (MIRANDA, 1997) após sua calibração com os dados locais, sendo o de maior relevância a lamina de “seepage” que é um fenômeno que ocorre na área experimental de várzea da ESALQ/USP, em função da encosta adjacente e ausência de drenos de cintura.

2.3.4 Caracterização das descargas dos drenos subterrâneos

Os valores das descargas média dos drenos ocorridas no período da emergência à colheita do milho encontram-se na Figura 18. Verifica-se que houve uma forte relação entre o aumento das lâminas de precipitação pluvial (Figura 15) e a elevação das descargas nos drenos subterrâneos, o que já era esperado; além das precipitações pluviais, provavelmente as águas oriundas da encosta tiveram influência nas descargas dos drenos. Os locais do gráfico descontínuos indicam que não foram realizadas leituras das descargas nesses pequenos períodos por causa dos drenos subterrâneos encontrarem-se afogados em função do aumento da lâmina de

água do rio Piracicaba. Este fato provavelmente teve sua influência no teor de água no solo da área experimental, nesses períodos, fazendo com que o sistema de drenagem subterrânea passasse a funcionar como um sistema de irrigação subsuperficial. No período da emergência das plantas à colheita houve uma descarga média de $53,7 \text{ L h}^{-1}$, variando de $0,5 \text{ L h}^{-1}$ a 651 L h^{-1} , com um desvio padrão de $82,3 \text{ L h}^{-1}$.

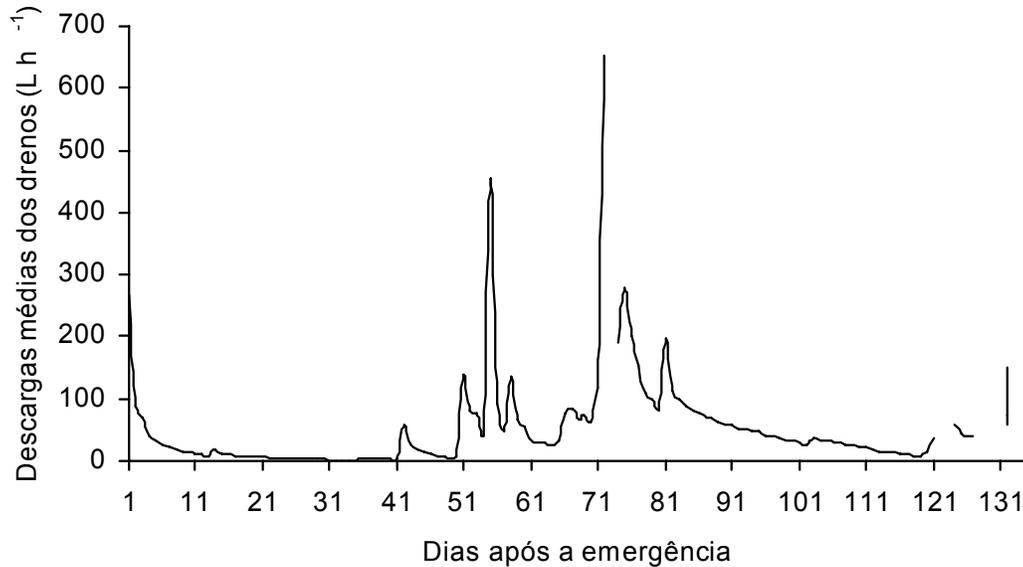


Figura 18 - Valores das descargas média dos drenos ocorridas no período da emergência à colheita do milho

Nos quatro primeiros DAE as descargas dos drenos apresentaram valores médio de 266, 88, 70 e 42 L h^{-1} , em função das precipitações pluviais ocorridas um dia antes da data considerada como emergência das plantas, 52,2 mm, adicionadas mais 22,1 mm ocorridas até o 4 DAE. Nesse período inicial as plântulas não foram prejudicadas em função da existência da drenagem subterrânea e abertura das valas, as quais funcionaram como uma drenagem superficial.

No período de 5 a 30 DAE as descargas dos drenos foram relativamente baixas, variando de $2,1 \text{ L h}^{-1}$ a $31,5 \text{ L h}^{-1}$, apresentando uma média de $9,9 \text{ L h}^{-1}$. Nesse período não houve grandes eventos de precipitação pluvial (44,7mm no período) capazes de influenciar nas descargas dos drenos subterrâneos.

No período de 31 (data da adubação de cobertura com N) a 46 DAE os eventos de precipitações pluviais mais significativos, maiores que 10 mm, ocorreram aos 36 e 42 DAE, com

26,1 e 28,2 mm, respectivamente. As descargas dos drenos subterrâneos, nesse período, foram baixas, apresentando um valor médio, máximo e mínimo de 9,3, 59,3 e 0,5 L h⁻¹, respectivamente. Essas condições foram provavelmente favoráveis para um melhor aproveitamento da adubação nitrogenada pelas plantas e evitar possíveis perdas por lixiviação de nitrato. Portanto, a data de semeadura é um dos fatores de grande importância para que a adubação de cobertura com N seja feita em uma data que não haja grandes precipitações pluviais que venham a ocasionar essas perdas. Isso pode ser evitado analisando-se dentre outros fatores os meses mais chuvosos da região registrada nas séries históricas do município e/ou mais próximo do plantio.

No período de 47 a 67 DAE, as descargas dos drenos subterrâneos foram superiores ao período anterior, em função dos maiores eventos de precipitação ocorridas nesse período que totalizaram 189 mm, sendo que os eventos mais significativos ocorreram aos 48, 50, 51, 52, 53, 55, 58, 65 e 66 DAE com 14,2, 12, 36, 10,1, 11,3, 37,6, 25,4, 13,2 e 18,8 mm, respectivamente. Aos 57 DAE foi considerado como data da floração média do milho. As descargas dos drenos variaram de 5,3 L h⁻¹ (49 DAE) a 454,5 L h⁻¹ (55 DAE), apresentando uma média de 72,6 L h⁻¹.

No período de 68 a 132 DAE, observou-se uma maior intensidade das descargas dos drenos subterrâneos nos primeiros dez dias, com destaque da descarga do dia 72 DAE, a qual foi de 651,6 L h⁻¹, o maior valor registrado ao longo da duração do experimento. As descargas registradas nesse período, cerca da metade do tempo, foram superiores a primeira metade, ou seja houve mais disponibilidade de água da metade para o final do ensaio, provavelmente contribuindo para a elevação da produtividade do milho.

Bakhsh et al. (2002) também encontraram durante seus trabalhos de campo por um período de seis anos uma diferença de vazão dos drenos subterrâneos em função das variações das precipitações pluviais e obtiveram uma alta correlação entre o volume de descarga dos drenos e as perdas por lixiviação de N-NO₃⁻ na água de drenagem, oriundas dos drenos subterrâneos.

2.3.5 Índice de estresse na cultura do milho (SEW₃₀)

Os valores de produtividade relativa (%) para a cultura do milho cultivado em várzea em função dos diferentes índices SEW₃₀ encontram-se na Figura 19. Verifica-se que a produtividade relativa em função do índice de estresse SEW₃₀ apresentou um modelo de regressão linear crescente. Após ter sido submetido ao teste F foi significativo ao nível de 1%, rejeitando-se

assim a hipótese de nulidade e aceitando-se como comprovado que havia diferenças reais, não casuais, entre as médias dos tratamentos; portanto essa equação de regressão explica de forma significativa a variável dependente ‘produtividade relativa’, ao nível de 1% de probabilidade. O coeficiente de determinação (R^2) de 89,9% indica que a variação da ‘produtividade relativa’ é explicada pelo modelo de regressão.

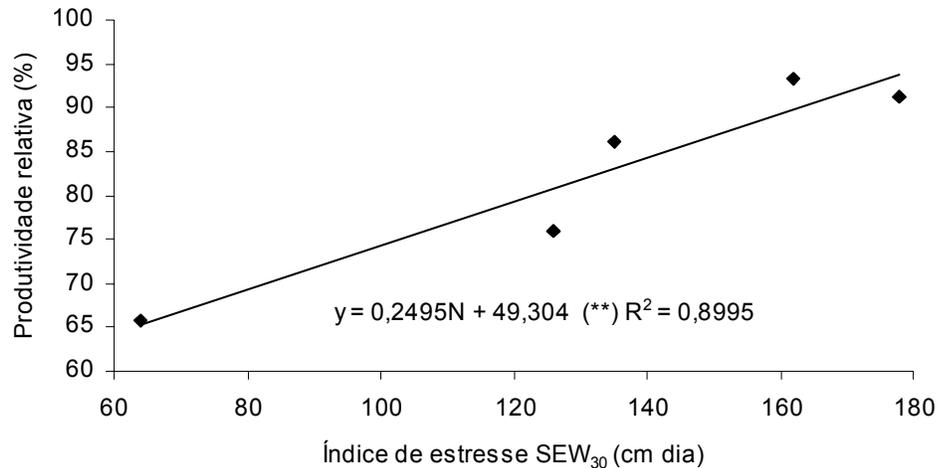


Figura 19 - Produtividade relativa (%) para a cultura do milho cultivado em várzea em função dos diferentes índices SEW₃₀

Pela Figura 19, percebe-se que o rendimento da cultura não foi comprometido pelo excesso do teor de água do solo no período da emergência das plântulas à colheita. Isto ocorreu, provavelmente, em função dos baixos valores do índice de estresse SEW₃₀ que variou de 64 a 178 cm dia, indicando que esse índice favoreceu o aumento da produtividade de grãos de milho. Costa (1994) encontrou resultado semelhante utilizando o cultivar de milho Piranão VD2, de porte baixo. Skaggs (1981) cita que a produtividade relativa começa a cair gradativamente para valores maior que 100 ou 200 cm dia para plantas susceptíveis ou tolerantes respectivamente, à umidade excessiva do solo durante o ciclo da cultura. Observando-se os dois últimos e maiores pontos, do gráfico, percebe-se que o penúltimo ponto foi superior ao último, onde se verifica que há uma tendência de encontrar um ponto de máximo e o início da redução da produtividade do milho, caso o teor de água do solo fosse um pouco superior.

Kanwar; Baker e Jukhtar (1988) avaliaram o excesso de umidade do solo na cultura do milho por três anos, utilizando as relações entre a produtividade relativa e o índice de estresse SEW₃₀ e concluíram que o modelo linear foi o que melhor se ajustou nesse período.

Hardjoamidjojo; Skaggs e Schwab (1982) também encontraram modelo linear como o melhor modelo para o ajuste da produtividade relativa em função do estresse diário.

O resultado da análise de regressão de fato sugere que a produtividade do milho pode aumentar com os valores de SEW_{30} , dentro dos limites estudados.

2.3.6 Concentrações de nitrato nos drenos, poços de observação, extratores de solução e valetas

Os valores das concentrações médias de $N-NO_3^-$ ($mg L^{-1}$) e desvio padrão determinados nos efluentes dos drenos subterrâneos, nos poços de observação, nos extratores (0,20 e 0,40 m) e nas valas, coletadas na várzea cultivada com milho com diferentes doses de nitrogênio encontram-se na Tabela 3. Observa-se que na primeira coleta de efluentes dos drenos realizada aos 35 DAE, quatro dias após a adubação de cobertura com N, somente dois drenos dos 15 avaliados, correspondentes respectivamente aos tratamentos de 100 e 150 $kg ha^{-1}$, estavam funcionando, sendo que esses dois drenos subterrâneos apresentaram uma concentração de nitrato de 0,20 e 0,50 $mg L^{-1}$. Esses valores são considerados baixos, sem riscos para o ambiente. Concentrações máximas na água para consumo humano permitido pelo Brasil e EUA são de 10 $mg L^{-1}$ e no Canadá de 50 $mg L^{-1}$ (TUNDISI, 2003). Isso mostra, que não houve precipitação pluvial entre a adubação de cobertura e a primeira coleta de efluentes, suficientes para lixiviar o $N-NO_3^-$ para os drenos subterrâneos, sendo que nesse período foi registrado somente 3,1 mm de chuva. Além disso, a maior parte do N da uréia que possui forma amídica, provavelmente, ainda não teria se transformado no $N-NO_3^-$, processo esse que é realizado pelas bactérias nitrificantes (quimiautotóxicas), estritamente aeróbicas, nitrossomonas, nitrobacter e nitrossolabres (VICTORIA; PICCOLO; VARGAS, 1992).

A segunda coleta de efluentes dos drenos subterrâneos foi realizada aos 38 DAE, três dias após a primeira, em função das precipitações pluviais que ocorreram nesse período, totalizando, 40,7 mm, onde se verificou que 53,33% dos drenos subterrâneos estavam funcionando. As concentrações de $N-NO_3^-$ continuaram baixas, inferiores à 2 $mg L^{-1}$, sendo que houve um pequeno aumento de 1,4 e 0,85 $mg L^{-1}$ em relação ao tratamento três e quatro. Esses valores demonstram um pequeno aumento da lixiviação de $N-NO_3^-$, provavelmente originado da adubação de cobertura e/ou mineralização da matéria orgânica do solo, a qual tem a mineralização favorecida pela retenção de N inorgânico, em virtude do aumento da atividade dos

microrganismos quimiorganotróficos (SCIVITTARO et al., 2000) da área experimental, podendo-se pressupor que o N oriundo da adubação de cobertura foi deslocado para camadas inferiores do solo e melhor disponibilizado para o sistema radicular do milho e/ou microrganismos do solo, tornando-se parte imobilizado. Isto pode ter viabilizado um maior aproveitamento do N fertilizante pelo milho, que contribuiu para o aumento da produtividade da cultura com doses de até 200 kg ha⁻¹ de N, lixiviando muito pouco N-NO₃⁻, provavelmente, sem trazer prejuízo para o ambiente.

Tabela 3 - Concentrações médias de N-NO₃⁻ (mg L⁻¹) e desvio padrão nos efluentes dos drenos, nos poços de observação, nos extratores de solução (0,20 e 0,40 m) e nas valas

Doses N (kg ha ⁻¹)	Datas das coletas dos efluentes (DAE)						
	35	38	45	59	67	81	126
----- mg L ⁻¹ -----							
Drenos							
0		1,40*	1,15±1,06**	0,73±0,31	0,73±0,67	0,90±0,40	0,73±0,49
50		1,70±1,27**	1,10±0,42**	0,80±0,35	0,96±0,59	1,13±0,64	0,73±0,50
100	0,20*	1,60*	0,40±0,00**	0,40±0,17	0,73±0,42	1,10±0,10	0,93±0,76
150	0,50*	1,35±0,92**	0,80±0,57**	0,43±0,32	0,87±0,60	1,17±0,42	0,53±0,23
200		1,00±0,28**	0,60±0,20	1,63±1,12	0,97±0,55	1,97±0,59	0,70±0,10
Poços de observação							
0	1,33±0,58	0,93±0,40	3,90±5,54	5,10±6,41	1,03±0,75	0,40±0,17	4,73±4,31
50	0,67±0,64	0,43±0,15	3,67±3,93	2,17±2,55	0,70±0,52	0,33±0,12	3,97±4,92
100	0,43±0,32	3,10±3,83	5,80±6,03	6,67±7,77	5,97±8,20	1,97±2,46	2,60±0,72
150	1,90±2,26	0,40±0,28	5,33±2,65	7,07±5,40	6,73±5,99	5,47±8,52	6,93±3,35
200	0,40±0,35	0,70±0,44	3,53±2,71	5,43±7,77	8,67±5,36	1,03±0,31	5,47±4,62
Extratores instalados a 0,2 m de profundidade							
0		4,57±3,41	3,00±2,45	1,90±1,22	2,43±1,60	2,40±1,70	2,07±0,58
50	14,95±13,36**	4,10±2,75	4,63±2,67	1,13±0,31	2,97±1,82	2,40±1,76	1,70±0,56
100	8,35±2,05**	13,17±16,91	5,37±4,31	0,50±0,10	3,60±3,87	4,37±4,73	3,00±1,39
150	32,95±39,67**	4,70±2,25	3,40±2,67	2,20±2,34	2,17±1,46	3,70±2,36	5,40±4,80
200	11,35±12,66**	2,13±1,46	1,00±0,53	0,87±0,31	1,67±2,02	1,57±0,72	2,67±0,61
Extratores instalados a 0,4 m de profundidade							
0	9,90±7,81	2,50±1,75	0,50±0,30	0,57±0,15	0,27±0,12	0,27±0,21	0,53±0,58
50	10,07±9,41	6,37±7,13	1,77±1,55	0,60±0,10	0,37±0,12	0,57±0,21	2,87±3,19
100	2,65±1,20**	2,75±0,21	2,90±3,73	2,03±1,62	1,33±1,70	4,37±6,61	2,80±4,16
150	7,77±6,61**	9,50±12,96	1,00±0,72	1,00±0,96	0,87±0,31	0,93±0,55	2,60±3,03
200	2,23±1,64	1,67±0,95	0,47±0,46	2,40±3,64	1,30±1,73	0,83±1,01	1,80±2,60
Valas							
0					2,53±0,46		
50					2,90±1,92		
100					4,90±4,10**		
150					5,95±3,89		
200					12,53±12,07		

*Valores de uma observação. ** Valores de duas observações

Isto mostra também que a adubação de nitrogênio de cobertura foi feita em uma época adequada (seis a sete folhas) ocasionando pequena perda de N-NO_3^- por lixiviação, revelando que essa prática agrícola deve ser recomendada e sempre que possível, deve-se evitar os meses em que ocorrem maiores concentrações pluviais, tornando-se assim numa importante prática agrícola que contribuirá para o crescimento e desenvolvimento das culturas sem trazer prejuízos para o ambiente, contribuindo de forma sustentável. Na maioria dos trabalhos, especialmente aqueles realizados nos EUA e Canadá, que apresentam resultados mostrando lixiviações nos efluentes, observa-se que houve elevadas taxas de precipitação pluviais e/ou irrigação durante e/ou após a adubação de N (MILBURN; RICHARDS; GARTLEY, 1990; MADRAMOOTOO; WIYO; ENRIGHT, 1992; BASKHSH et al., 2000; BAKHASH et al, 2001; JAYNES et al., 2004; LAWLOR et al., 2005; JAYNES; COLVIN, 2005). Este fato mostra que nessas regiões o fracionamento da adubação de N é de grande importância para a redução das perdas de N, contribuindo para o aumento do aproveitamento do N com menos riscos para o ambiente.

Os dados de coleta dos efluentes da terceira coleta, realizada aos 45 DAE, sete dias após a segunda e com 73,33% dos drenos subterrâneos funcionando, mostram que houve uma pequena redução da concentração de N-NO_3^- quando comparada com a segunda coleta de efluentes, apresentando valores de concentração de nitrato inferior a $1,5 \text{ mg L}^{-1}$, concentrações essas baixas comparadas às concentrações consideradas aceitáveis para água potáveis, 10 mg L^{-1} , recomendadas para o Brasil e EUA (TURDISI, 2003). Entre a segunda e a terceira coleta de efluentes ocorreu um total de precipitação pluvial de 36,6 mm. Isso mostra que as precipitações pluviais foram adequadas para atender a demanda hídrica da cultura e sem contribuir para o excesso de lixiviação de N-NO_3^- , durante esse período.

Os dados dos efluentes dos drenos subterrâneos da quarta, quinta, sexta e sétima coleta, realizadas em intervalos de 8, 14 e 45 DAE, mostram que as concentrações de N-NO_3^- continuaram menores que 2 mg L^{-1} , valores baixos, mostrando que a lixiviação do N oriundos do N fertilizante, N mineral do solo e N mineralizado da matéria orgânica não estavam trazendo danos ao ambiente. Esses dados concordam com os de Zhu e Fox (2003) que utilizaram 150 e 200 kg ha^{-1} de N e encontraram perdas por lixiviação de nitrato insignificantes, com um aumento na produtividade de milho.

As concentrações de nitrato foram menores que 10 mg L^{-1} , para todos os tratamentos, nas descargas dos drenos. Fazendo-se uma avaliação desse fenômeno, considerando as precipitações

pluviais de 558 mm e 499 mm que ocorreram nos períodos da semeadura à colheita do milho, no período da adubação de cobertura de N e a maturidade fisiológica, respectivamente, e considerando o caminhamento dos íons nitrato no solo o valor médio de 1 mm mm⁻¹ de chuva (0,5 mm mm⁻¹ de chuva para solos argilosos e mais de 3 mm mm⁻¹ de chuva para solos arenosos, segundo van Raij et al., 1997), a lixiviação dos íons nitrato teria alcançado às profundidades, aproximadamente, de 0,56 m e 0,50 m, respectivamente, não chegando à profundidade dos drenos subterrâneos, os quais foram instalados a um metro de profundidade. Nessa análise não se considerou o teor de MO do solo, concentração de microrganismos existente no solo, o fenômeno da capilaridade e a absorção desses íons pela cultura do milho.

Fernandes (2006) estudou a dinâmica do N no sistema solo-planta da cultura do milho, pela técnica do ¹⁵N, avaliando a lixiviação de nitrato à profundidade de 0,80 m, utilizando tensiômetros e extratores de solução, realizando a semeadura do milho em 11/12/2003. No período, entre 30 a 60 DAE, o tratamento que recebeu 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura e 90 kg ha⁻¹ de N em cobertura apresentou maior lixiviação de nitrato (33,14 kg ha⁻¹), sendo que somente 1,79 kg ha⁻¹ foi proveniente do fertilizante. Isto ocorreu em função, provavelmente, das altas precipitações pluviais (150,2 mm) que foram registradas no período subsequente (37 a 42 DAE), e a textura arenosa do solo, o que proporcionou maior drenagem de água.

Na região Oeste do Canadá tem sido encontrado com frequência concentração alta de N-NO₃⁻, em torno de 40 mg L⁻¹, na água de drenagem subterrânea (MILBURN; RICHARDS; GARTLEY, 1990; MADRAMOOTOO; WIYO; ENRIGHT, 1992). Esse fenômeno ocorre com alta frequência nessa região, provavelmente, em função das condições climáticas, principalmente elevadas precipitações pluviais, que geralmente excedem a 2000 mm anuais e as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos.

Bakhsh et al. (2000) também verificaram perdas de N-NO₃⁻ de até 19 mg L⁻¹ no mês de junho, o mais chuvoso da região, nas descargas dos drenos subterrâneos.

A água de drenos subterrâneos no meio oeste do cinturão do milho nos EUA, geralmente, excede à 10 mg L⁻¹ de N-NO₃⁻; esses efluentes são freqüentemente despejados no rio Mississipi e ao chegarem no México contribuem para o agravamento dos problemas de hipoxia do Golfo do México, que pode ter efeito adverso na saúde do homem e de animais (RANDALL, 1998; DAVIS et al., 2000; JAYNES et al., 2004).

Lowlor et al. (2005) testaram as doses de 168 e 252 kg ha⁻¹ de N (2000 a 2004) e encontraram 15,5 e 23,4 mg L⁻¹ de N-NO₃⁻, respectivamente, nas descargas dos drenos, com uma produtividade média de 8.657 e 9.313 kg ha⁻¹ de grãos na cultura do milho.

Em Illinois, EUA, o monitoramento por seis anos de N-NO₃⁻ nas descargas dos drenos subterrâneos em uma área da bacia hidrográfica de agricultura intensiva e com uso de sistema de drenagem, verificaram uma variação de 0 a 39 mg L⁻¹ nas descargas dos drenos e de 10 a 15 mg L⁻¹ medidas no rio. Em um sistema de aplicação de uma dose de 107 kg ha⁻¹ de N, em pré-semeadura proporcionou uma concentração média de 16,8 mg L⁻¹ de nitrato na vazão dos drenos subterrâneos.

Jaynes e Colvin (2005) em Iowa, EUA, no ano de 2002, onde houve uma precipitação anual de 2240 mm, utilizando doses de até 138 kg ha⁻¹ de N, obteve uma variação de 3 a 28,3 mg L⁻¹ de N-NO₃⁻ nas descargas dos drenos subterrâneos, dependendo do parcelamento da adubação nitrogenada.

Bakhsh et al. (2001) no estado de Iowa, EUA utilizaram as doses de 67, 135 e 202 kg ha⁻¹ de N na cultura do milho e constataram uma concentração de 11,1; 14,1 e 18,9 mg L⁻¹ de N-NO₃⁻, respectivamente, nas descargas dos drenos subterrâneos.

A média da concentração de N-NO₃⁻ em água de drenagem oriundas de drenos subterrâneos nos EUA é de 8 a 20 mg L⁻¹ (GILLIAM; BAKER; REDDY, 1999).

Na água dos poços de observação detectou-se uma concentração de N-NO₃⁻ geralmente superior à obtida nas descargas dos drenos, apresentando entretanto um valor médio inferior a 8,5 mg L⁻¹, abaixo dos valores médios recomendados para água potável que é de 10 mg L⁻¹ no Brasil e EUA (TUNDISE, 2003). Essas maiores concentrações ocorreram provavelmente em função da área plantada e adubada com N que foi de 33,6 m ao longo dos drenos de 45 m de comprimento, além das perdas por desnitrificação que talvez tenham ocorrido durante o tempo que a água se movimentava do lençol freático para a boca dos drenos subterrâneos. Na primeira coleta de efluentes nos poços de observação observou-se uma variação na concentração de N-NO₃⁻ entre os tratamentos, sendo que o tratamento que não recebeu adubação nitrogenada foi superior aos demais tratamentos, exceto para o tratamento 4 (150 kg ha⁻¹ de N). Este fato mostra provavelmente que o N-NO₃⁻ tinha outras fontes, por exemplo, como do N-mineral do solo e a mineralização da matéria orgânica existente no solo de várzea, onde geralmente há grande heterogeneidade espacial nas suas características físicas, químicas e biológicas. Essa

disponibilidade do N do tratamento um foi aumentando gradativamente até à quinta coleta. Este resultado mostra que houve provavelmente, uma mineralização da matéria orgânica favorecida pelo aumento de microrganismo do solo e em seguida diminuiu progressivamente até a sexta coleta de efluentes e voltou a crescer na última coleta de efluentes corrida aos 45 dias após, mostrando provavelmente as grandes transformações do N no sistema solo, água, planta e atmosfera.

De um modo geral, os valores de concentração de N-NO_3^- do tratamento dois teve maior concentração de nitrato no efluente ($3,67 \text{ mg L}^{-1}$) da terceira coleta, diminuindo em seguida para as duas coletas feitas posteriormente e voltou a subir novamente na última coleta, provavelmente em função da mineração da matéria orgânica do solo. Os tratamentos três e quatro apresentaram um aumento gradativo do N-NO_3^- até à quarta coleta, apresentando uma tendência para diminuir a partir dessa data até a coleta final. Entretanto, o tratamento cinco apresentou um aumento até a quinta coleta apresentando uma tendência de declínio em seguida. Essas concentrações determinadas nos poços de observação não são suficientes para a causar a contaminação do lençol freático ou dos corpos d'água superficiais, mostrando também que os níveis de N não aumentaram os riscos de contaminação do ambiente.

Os valores da concentração de N-NO_3^- dos extratores de solução instalados a 0,2 m de profundidade referente à primeira coleta de efluentes, de um modo geral, foram superiores às concentrações dos drenos, dos poços de observação e dos extratores de solução instalados a 0,4 m de profundidade. Isto mostra a maior disponibilidade deste nutriente para o sistema radicular efetivo das plantas de milho. A maior concentração ocorreu no tratamento quatro com $32,95 \text{ mg L}^{-1}$, com um desvio padrão de $39,67$, seguida pelos tratamentos dois e cinco, com $14,95$ e $11,35 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente de N-NO_3^- . Isto mostra que as disponibilidades de N-NO_3^- , provavelmente, tiveram outras fontes (matéria orgânica e mineral) que contribuíram para essa disponibilidade com uma grande variabilidade espacial desse nutriente, em função da própria formação dos solos de várzeas que tem como uma das suas características apresentarem uma elevada variação espacial dos elementos físicos, químicos e biológicos (PINTO et al., 1999; SOUSA; LOBATO, 2004). Na segunda coleta de solução, a maior concentração de N-NO_3^- foi para o tratamento três, com $13,17 \text{ mg L}^{-1}$. A partir dessa coleta, os demais valores apresentaram uma tendência de redução, com valores de concentração de N-NO_3^- inferiores a 6 mg L^{-1} .

Os valores de concentrações de N-NO_3^- encontradas nas soluções dos extratores de solução instalados a 0,4 m de profundidade mostram-se superiores, geralmente, aos valores encontrados na primeira de segunda coleta dos efluentes realizadas aos 35 e 38 DAE nas bocas dos drenos subterrâneos e poços de observação. Entre a terceira e a última coleta de soluções realizadas aos 45 e 126 DAE, respectivamente, as concentrações de N-NO_3^- foram inferiores a $4,5 \text{ mg L}^{-1}$.

Os valores de concentração de N-NO_3^- das amostras coletadas nas valas, aos 67 DAE, mostram que houve uma variação crescente entre o primeiro e quinto tratamento, variando de $2,53$ a $12,53 \text{ mg L}^{-1}$. Essa coleta foi feita em função dos eventos de precipitação pluvial que contribuíram somente uma vez após a realização da adubação de cobertura nitrogenada. Isto mostra provavelmente que na superfície do solo encontra-se ainda N-NO_3^- disponível oriundos da mineralização (adubo) e da matéria orgânica até a forma de NH_4^+ e este por sua vez, pelo processo de nitrificação, em solos oxidados é transformado em NO_3^- no solo, mediado por microrganismos do solo, respondendo de forma coerente entre as doses de N aplicados na superfície do solo de 0 a 200 kg ha^{-1} .

O monitoramento do teor dos íons de nitrato na solução do solo, o qual apresenta um processo dinâmico, possui uma grande variação no tempo e espaço, podendo ser feito a partir da extração dessa solução com o uso de cápsula porosa de cerâmica; entretanto a predição de fósforo por esta metodologia não é aceitável (ARENAS; MEJIAS; TORRES, 1996; SILVA, 2002).

2.3.7 Teor de N total nas plantas de milho

2.3.7.1 Teor de N total nas folhas de milho

O teor médio de N total (g kg^{-1}) nas folhas de milho coletadas no estágio fenológico de florescimento, coletadas aos 57 DAE encontra-se na Figura 20. Verificou-se que a concentração de N total nas folhas de milho aumentou com a elevação das doses de N no intervalo de 0 a 200 kg no período de floração do milho, respondendo de forma diferenciada às doses de N oriundas da adubação com uréia. A análise de regressão revelou um modelo linear e que houve um efeito significativo ($P < 0,01$). O coeficiente de determinação (R^2) mostrou que 88,15% da variação de concentração de N na folha, variável y, é explicada pelo modelo de regressão linear.

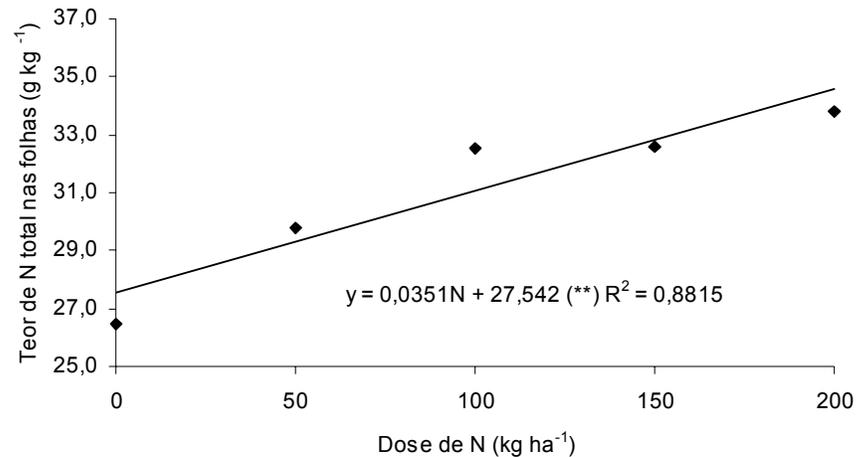


Figura 20 - Teor médio de nitrogênio total (g kg^{-1}) nas folhas de milho coletadas no estágio fenológico de florescimento, aos 57 DAE

As concentrações de N nas folhas de milho, determinadas em laboratório, variaram de 26,5 a 33,8 g kg^{-1} de N na matéria seca. Os teores adequados de N nas folhas segundo Malavolta; Vitti e Oliveira (1997) variam de 27,5 a 32,5 g kg^{-1} de N e de 27 a 35 g kg de N segundo van Raij et al. (1997). Observou-se que o teor de N do tratamento um (sem N) foi inferior (26,5 g kg de N) e o tratamento cinco (200 kg ha^{-1} de N) foi superior (33,8 g kg^{-1} de N) às recomendações de Malavolta; Vitti e Oliveira (1997) e adequadas segundo as de van Raij et al. (1997) a esse intervalo, ficando os tratamentos dois, três e quatro como adequados. Muzilli (1983), avaliando o efeito do preparo do solo e rotação de cultura em sistema de plantio direto, obteve resultados inferiores, atribuindo tal fato às perdas de N por lixiviação. Silva (2005) também encontrou teores de N inferiores, atribuindo as baixas concentrações, provavelmente relacionadas ao híbrido utilizado (Pioneer 30F80), justificando que mesmo em doses mais elevadas de N (180 kg ha^{-1} de N) não se obteve valores adequados. Quando aplicou uma dosagem de 120 kg ha^{-1} de N aos 35 DAE o teor de N total na folha foi de 24,8 g kg^{-1} .

Fernandes (2006) observou que o teor de N na folha do milho, no florescimento, variou de 16,21 g kg^{-1} de MS de folha (testemunha) a 24,94 g kg^{-1} de MS de folha, (aplicação de 60 kg ha^{-1} de N na semeadura mais 120 kg ha^{-1} de N em cobertura), diferindo estatisticamente ($P < 0,05$). As doses de N (0, 30, 60 e 120 kg ha^{-1} de N) ajustaram-se a uma função linear. Ibrikci et al. (1998)

observaram também respostas lineares do teor de nitrogênio nas folhas do milho híbrido ‘LG-55’ às doses de N que variaram de 200 a 350 kg ha⁻¹ com incrementos de 50 kg ha⁻¹ de N.

Jakelaitis; Silva e Ferreira (2005) também avaliaram doses crescentes de N (0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹) e constataram que o teor de N foliar no estágio de florescimento apresentou um modelo de regressão de forma linear, variando de 21,0 g kg⁻¹ a 33,5 g kg⁻¹ de N total.

Entretanto, Silva et al. (2005) encontraram o teor de N na folha se comportando de forma quadrática com o incremento das doses crescente de N aplicadas (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N), com o valor máximo de N (145 kg ha⁻¹) obtido com um teor de 26,4 g kg⁻¹ de N total na MS da folha. Mar et al. (2003) também encontraram o modelo de regressão quadrático com um valor máximo de N (145 kg ha⁻¹) foi obtido com um teor de 28 g kg⁻¹ de N total.

Normalmente, as principais causas das variações do teor de N foliar nas plantas de milho ocorre em função dos fatores relacionados a genética do milho, de fertilidade de solo e, principalmente às mudanças nas condições climáticas (JAKELAITIS; SILVA; FERREIRA, 2005).

2.3.7.2 Teor de N total na matéria seca da parte aérea do milho

O teor médio de N total (g kg⁻¹) contido na matéria seca da parte aérea (colmos, bainhas, folhas, brácteas e pendões) das plantas de milho coletadas no estágio de grãos farináceo, em função das diferentes doses de nitrogênio encontra-se na Figura 21. Observa-se que o teor de N total da parte aérea aumentou linearmente com o aumento das doses de N aplicadas, de 0 a 200 kg ha⁻¹, apresentando um modelo de regressão linear e significativo (P<0,01), com um coeficiente de determinação (R²) igual 86,13%, indicando que a variação de concentração de N na palhada, variável ‘y’, é explicada pelo modelo de regressão linear. O teor médio de N total da matéria seca variou de 4,6 g kg⁻¹ a 7,7 g kg⁻¹. Isso mostra que o incremento na dose de N proporcionou um aumento no teor de N total da matéria seca da parte aérea do milho. O maior teor de N total foliar proporcionou maior crescimento e desenvolvimento da planta, provavelmente, contribuindo para uma maior índice de área foliar e acúmulo de carboidratos em função da fotossíntese (Silva, 2005).

O teor de N total na planta no florescimento variou de 17,69 a 23,52 g kg⁻¹. As doses de N (0, 30, 60 e 120 kg ha⁻¹ de N) ajustaram-se a uma função linear (FERNANDES, 2006).

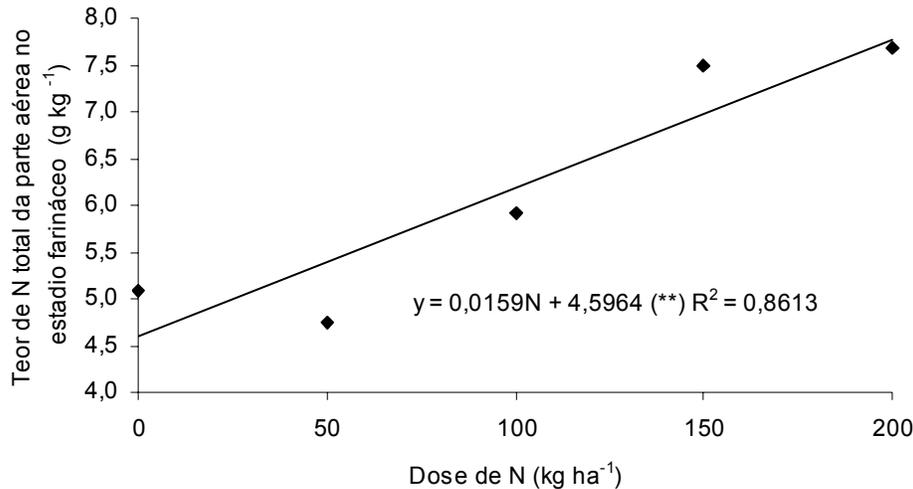


Figura 21 - Teor médio de N total (g kg⁻¹) contido na parte aérea das plantas de milho coletada no estádio farináceo, em função das diferentes doses de N (kg ha⁻¹)

Duete (2000) testou as doses crescentes de N (0, 55, 95, 135 e 175 kg ha⁻¹ de N) e constatou que o teor de N total na palhada não foi significativa ($P > 0,05$) e apresentou um valor médio de 4,59 g kg⁻¹ de N total de MS. Coelho (1987), também estudou doses crescentes de N (0, 30, 60, 120 e 240 kg ha⁻¹ de N), e encontrou na palhada de milho um teor de N variando de 2,67 (tratamento sem N) a 4,48 g kg⁻¹ de N total (dose de 240 kg ha⁻¹ de N). Villas Bôas (1990) aplicou uma dose de 15 kg ha⁻¹ de N na semeadura e 45 kg ha⁻¹ de N aos 40 ou aos 70 dias após a semeadura utilizando como fonte uma mistura de uréia mais sulfato de amônia e encontrou um valor médio do teor de N obtida na parte aérea da planta de milho (8,7 g kg⁻¹), variando de 6,2 (tratamento sem N) a 8,7 kg ha⁻¹ de N total, com de uma dose de 45 kg ha⁻¹ de N. Villas Bôas (1995) aplicou 15 kg ha⁻¹ de N na semeadura, exceto para a testemunha, e 100 kg ha⁻¹ N em cobertura com uma aplicação total ou parcelada em duas vezes e encontraram também um valor médio de concentração de N na parte aérea da planta de milho (9,7 g kg⁻¹ N), variando de 7,2 a 9,7 g kg⁻¹ de N total (testemunha) a 10,6 e 9,7 g kg⁻¹ N total com uma dose de 100 kg ha⁻¹ de N incorporado a 0,4 cm de profundidade.

2.3.7.3 Teor de N total na massa seca dos grãos de milho

O teor médio de N total (g kg^{-1}) contido na massa seca dos grãos de milho coletados no estágio de grãos farináceo em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha^{-1}) encontra-se na Figura 22. Verifica-se que o incremento na dose de N proporcionou um aumento no teor de N na massa seca dos grãos de milho, variando de 13,1 a 16,7 g kg^{-1} , para os tratamentos um (tratamento sem N) e tratamento cinco (200 kg ha^{-1} de N). O modelo de regressão que melhor representou essa relação foi a linear, o qual apresentou efeito significativo ($P < 0,01$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual 92,27%, indicando que a variação de concentração de N na massa seca dos grãos, variável dependente 'y', é explicada por esse modelo de regressão linear. Esses valores médios ficaram um pouco abaixo dos encontrados por Silva (2005) em dois anos de avaliação, em material coletado após a colheita, os quais foram de 13,80, 14,55, 15,54, 16,61 e 17,16 g kg^{-1} total para as doses de 0, 30, 80, 130 e 180 kg ha^{-1} de N, respectivamente. Estes resultados indicaram ser os grãos o principal dreno de N e de compostos nitrogenados da planta, influenciando a quantidade e qualidade da fitomassa produzida, especialmente no teor de proteína dos grãos.

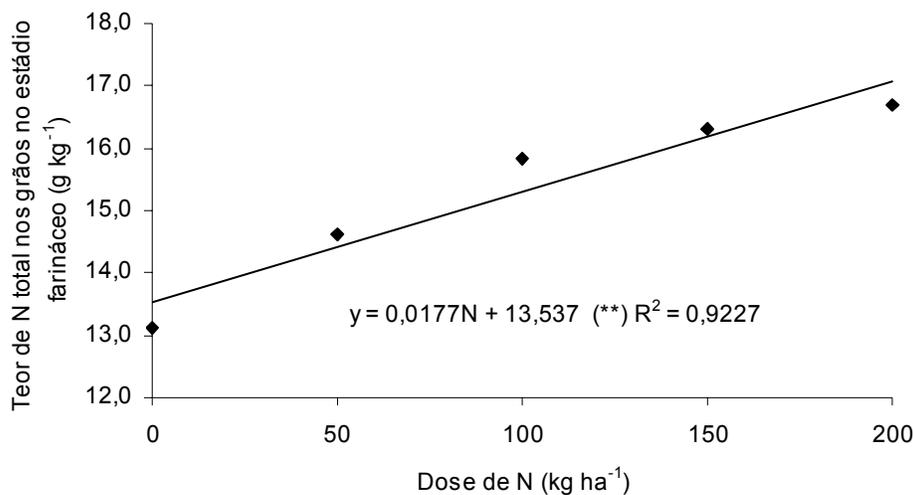


Figura 22 - Teor médio de N total (g kg^{-1}) contidos na massa seca dos grãos de milho coletados no estágio farináceo em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha^{-1})

O teor de N total nos grãos variou linearmente, com as doses crescentes de N de 0, 55, 95, 135 e 175 kg ha^{-1} , variando de 12,03 a 16,39 g kg^{-1} de N total de MS nos grãos (DUETE, 2000). Coelho (1987) também encontrou uma variação de N nos grãos de milho de 12,1 g kg^{-1} de N total

(tratamento sem N) a 17,83 g kg⁻¹ de N total (240 kg ha⁻¹ de N). Dados de Villas Bôas (1995) variaram de 13,1 a 16,9 g kg⁻¹ de N total e resultados de Villas Bôas (1990) variou de 12,7 a 14,4 g kg⁻¹ de N total de MS de grãos.

O teor médio de N total nos grãos de milho de dez genótipos de milho, conduzidos sob sistema plantio direto, conduzidos no estado de São Paulo, nas cidades de Votuporanga (ano agrícola 98/99), Candido Mota (ano agrícola 98/99), Itapeva (ano agrícola 98/99), Votuporanga (ano agrícola 99/00), Palmital (ano agrícola 99/00), Votuporanga (ano agrícola 00/01) e Palmital (ano agrícola 00/01), responderam as doses crescentes de N (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N), na forma de uréia, empregando-se cerca de 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura. O modelo de regressão que melhor se ajustou foi o linear para o local de Votuporanga (98/99), Candido Mota (98/99), Palmital (98/99), Votuporanga (00/01) e Palmital (00/01) com o teor de N total nos grãos variando de 11,55 a 12,99; 13,00 a 14,08; 11,31 a 14,91; 11,88 a 14,58; 13,5 a 14,40 g kg⁻¹ de MS de grãos, respectivamente e modelo quadrático para os locais de Itapeva (98/99) e Votuporanga (99/00) (DUARTE, 2003).

2.3.8 Índice de área foliar

O índice de área foliar (IAF) (m² de folha/m² de solo) determinado no estágio farináceo em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹) encontra-se na Figura 23. Verifica-se que o modelo de regressão que melhor ajustou essa relação foi o linear, o qual apresentou efeito significativo (P<0,01), com um coeficiente de determinação (R²) igual 88,59%, indicando que a variação do IAF, variável dependente 'y', é explicada por esse modelo de regressão linear. Observa-se que o incremento na dose de N proporcionou um aumento no IAF de milho, variando de 2,47 a 3,43 m² de folha/m² de solo; entretanto o tratamento quatro apresentou um valor de IAF de 3,5 m² de folha/m² de solo, o que mostra provavelmente que as doses aplicadas nos tratamentos, especialmente as mais altas já apresentavam uma tendência decrescente, ou seja, talvez se tivesse mais um tratamento com uma dose de 250 kg ha⁻¹ de N ter-se-ia encontrado o ponto de máximo referente ao IAF. Fancelli e Dourado Neto (2000) citam que o rendimento de grãos (e o número de grãos) aumenta, significativamente, com os incrementos do IAF, variando de 3 a 5 m² de folha/m² de solo, segundo resultados obtidos no *Corn Belt* americano. Neste trabalho, somente os valores de IAF 3,20, 3,50 e 3,43 m² de folha/m² de solo relativos aos tratamentos três, quatro e cinco (100, 150 e 200 kg de N ha⁻¹) ficaram dentro dos limites

americanos. Entretanto, a área foliar de uma planta depende do número e do tamanho das folhas e conseqüentemente, do seu estágio de desenvolvimento (GADIOLI, 1999).

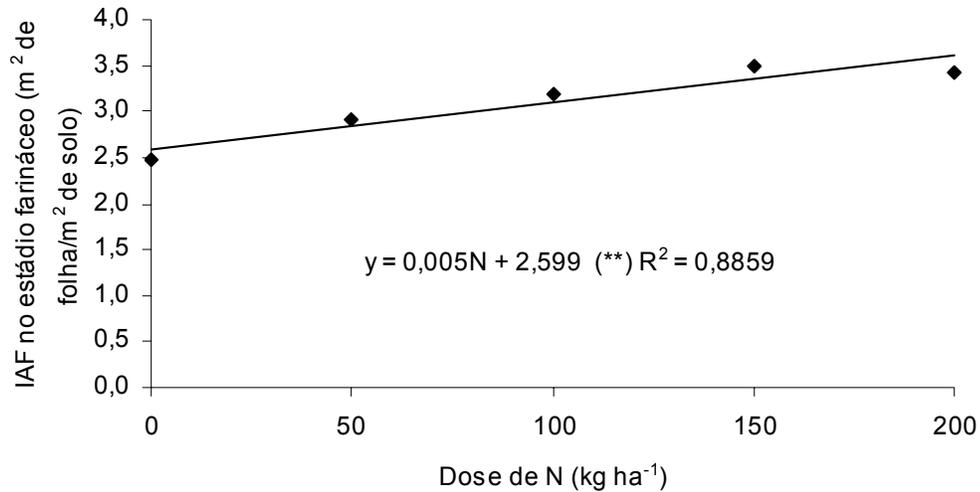


Figura 23 - Índice de área foliar (IAF) (m² de folha/m² de solo) determinado no estágio farináceo em função dos diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

O IAF depende da fertilidade do solo, das condições climáticas, do espaçamento e do material genético utilizado, principalmente; a evapotranspiração também está fortemente correlacionada com o IAF, a exemplo do estágio de florescimento (máximo IAF) que influencia na vazão, e conseqüentemente, na potencia instalada de um sistema de irrigação. Por isso a estimativa do IAF é uma importante ferramenta de planejamento que permite nortear ações de manejo e decisões de investimento no setor agrícola. Em quimigação, o IAF permite estimar o volume de água armazenável na folha de milho. Isso possibilita prever a viabilidade da aplicação de produtos químicos (inseticidas, fungicidas, herbicidas e adubo foliares) quando o alvo é folha (DOURADO NETO, 1999).

A estimativa do IAF pode ser modelada utilizando modelos explanatórios, os quais permitem adequar modelos estatísticos arbitrários que melhor minimizam a soma dos quadrados dos resíduos (quadrado da diferença entre os valores observados e estimados), cujo objetivo principal é a “explicação numérica do fenômeno”. A estimativa do IAF utilizando os modelos extrapoláveis tem por objetivo fazer com que o resultado seja generalizado para outras situações diferentes da condição em que os resultados foram obtidos. A filosofia é estimar a ordem de

grandeza para fins de planejamento, onde são requeridos a formação teórica apurada, experiência e bom senso do usuário da informação (DOURADO NETO, 1999).

Duete (2000) verificou também que a área foliar mostrou resposta linear e significativa aos efeitos das doses crescente de N. Entretanto, Dourado Neto (1999) cita que o índice de área foliar possui um comportamento quadrático em relação ao tempo, devido às diferentes fases de crescimento. Após ser atingido um ponto de máximo, há um decréscimo devido à senescência e queda das folhas mais baixas. A altura de planta já apresenta um comportamento sigmoideal até atingir um valor máximo e permanecer constante. Sendo assim, a relação funcional entre o índice de área foliar e altura de planta apresenta comportamento quadrático.

Soares (2003) determinou o IAF aos 65 DAE (florescimento) em função das doses de N (0, 120 e 240 kg ha⁻¹), os quais foram de 2,44, 3,55 e 4,79 m² de folha/m² de solo, respectivamente, e respondeu de forma quadrática, mostrando que a adição de N em doses crescentes proporcionou aumento do IAF, o que certamente contribuiu para o suprimento de fotoassimilados e, conseqüentemente, para o incremento da produtividade.

O N é um nutriente que atua diretamente no processo de divisão e expansão celular, influenciando no crescimento e desenvolvimento da planta em virtude de ser constituinte da molécula de clorofila. Dessa forma, plantas bem nutridas em N geralmente têm maior área foliar, o que conduz a maior síntese de carboidratos pela fotossíntese, conduzindo a maior produtividade de massa seca.

2.3.9 Índice de colheita

Os valores de índice de colheita (IC), fração de grãos em relação à matéria seca total da planta, determinado com e sem raiz em função das diferentes doses de N (kg ha⁻¹) encontram-se na Figura 24. Verifica-se que não houve diferença significativa ($P > 0,05$) para ambos os índices de colheita, por causa, provavelmente, do baixo número de repetições (três) utilizadas no experimento, tornando-se a análise do modelo de regressão de baixa sensibilidade (BARBIN, 2003). Os índices médios de colheita com raízes foram 0,52, 0,57, 0,58, 0,57, 0,56, e sem raízes foram de 0,56, 0,61, 0,63, 0,62 e 0,62, apresentando um média de 0,56 e 0,62, respectivamente. O IC para o milho geralmente apresenta elevadas interações entre genótipo e ambiente e pode variar de 0,3 a 0,5, sendo o valor de 0,4 considerado satisfatório para obtenção de alta produtividade (DOORENBOS; KASSAM, 1994; LIMA, 1995; GADIOLI, 1999). Segundo Fancelli e Dourado

Neto (2000) o IC apresenta alta correlação com o potencial produtivo do genótipo utilizado, variando de 0,6, para o cultivo do milho em regiões de clima temperado e elevada latitude nos EUA, a 0,27 (Gana) e 0,1 (Quênia) na África.

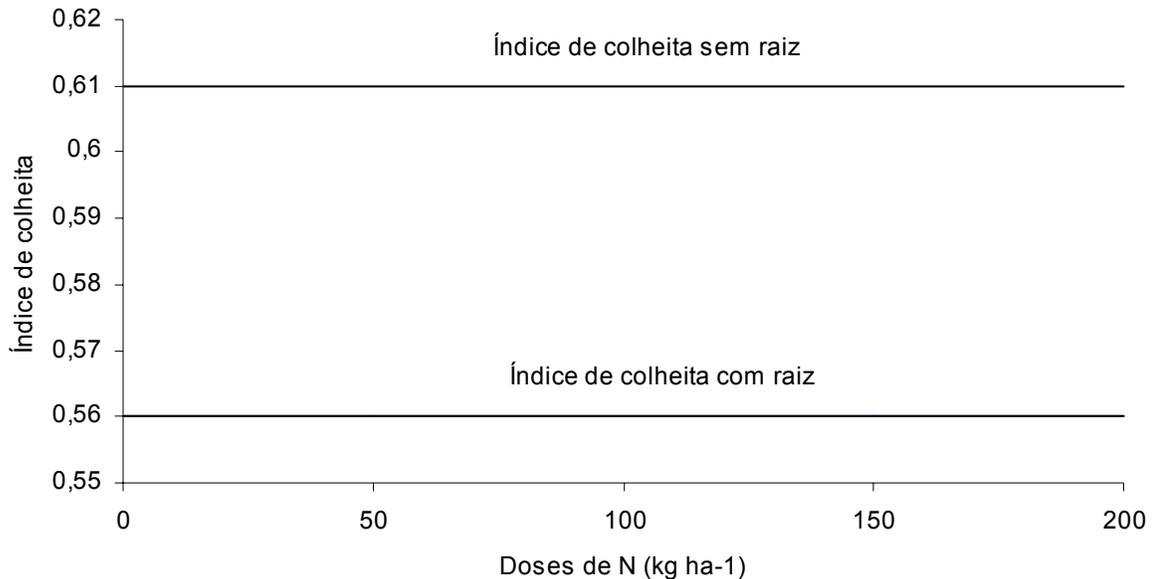


Figura 24 - Índice de colheita determinado com raiz (IC₁) e sem raiz (IC₂), em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

Silva (2005) determinou o IC sem raízes, média de dois anos, do híbrido simples de milho da Pioneer 30F80, encontrou os valores médios de 0,46, 0,47, 0,49, 0,49 e 0,52, para as doses crescente de N de 0, 30, 80, 130, e 180 kg ha⁻¹, respectivamente. Entretanto, Lara Caezas et al. (2000) encontraram o IC de 0,54 aproximadamente; Coelho et al. (1991) de 0,46 e Timmons e Backer (1992) de 0,53.

O IC é um parâmetro importante a ser considerado no melhoramento genético, pois poderá identificar a habilidade de um híbrido combinar produtividade, avaliando a sua capacidade produtiva e de destinar a massa da matéria seca acumulada a componentes de interesses econômicos; também têm alta dependência das condições climáticas vigentes no ano agrícola, principalmente a quantidade e distribuição das precipitações pluviais no período da semeadura à colheita do milho (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000). O índice de colheita poderá ser empregado também em programas de melhoramento genético e de avaliação de performance de genótipos submetidos a diferentes condições climáticas (DONALD; HAMBLIN, 1976).

O índice de colheita é um parâmetro que está intimamente correlacionado com a interação entre genótipo e o ambiente. Portanto, a rigor, o índice de colheita obtido em um determinado local não pode ser extrapolado para outras regiões (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000). Fernandes (2006) também não encontrou diferenças significativas entre os tratamentos para o IC, apresentando uma média de 0,49.

2.3.10 Componentes da planta e produtividade do milho

2.3.10.1 Estande final do experimento

Os valores médios do estande final das plantas de milho em função das diferentes doses de N encontram-se na Tabela 4. Verifica-se que houve uma população de plantas variando de 60.158 a 60.396, bem próximo a densidade de plantio almejada (60.000 plantas por hectare); entretanto não houve diferença significativa entre os tratamentos ($P > 0,05$), o que mostra que os números de plantas por hectare não foram influenciados pelas doses de N. Isto ocorreu, provavelmente, em função do adequado manejo da cultura durante o seu ciclo, especialmente quanto a adubação de N e o N mineralizado da matéria orgânica que normalmente segue o seu padrão de decomposição sem prejudicar a cultura (AITA et. al., 2001). Entretanto, as doses elevadas de N na semeadura podem contribuir para a elevação da concentração salina do solo e da pressão osmótica, reduzindo a disponibilidade hídrica na região próxima às sementes e/ou plântulas, podendo afetar a sua capacidade de absorção pelas raízes jovens (YAMADA, 1996). No presente estudo, esse fato não ocorreu devido à dose de N aplicada na semeadura de 30 kg ha⁻¹ de N ser adequada as condições de solo-clima-atmosfera.

Tabela 4 - Valores de população de plantas de milho em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

Doses de N (kg ha ⁻¹)	População de plantas por hectare*
0	60.158 A
50	60.238 A
100	60.317 A
150	60.317 A
200	60.396 A
Coefficiente de variação (%)	0,37

* As médias seguidas pela mesma letra, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, ao nível de 5% de probabilidade.

O uso racional do N visa aumentar a eficiência na sua utilização, em função dos custos financeiros, energéticos, e os riscos ambientais envolvidos, minimizando o processo de nitrificação e o manejo de resíduos orgânicos com relação C/N superior a 20, reduzindo o fenômeno da oxidação da matéria orgânica (VITTI et al., 1999).

Após o florescimento das plantas de milho, observou-se que no tratamento que não recebeu N, ou naquelas com doses mais baixas, apresentava as folhas inferiores amareladas, sintoma típico de deficiência de N. Entretanto, nos tratamentos que receberam maiores doses de N, as folhas que estavam mais verdes, fato que certamente prolongou o período de translocação de açúcares e de N para os grãos (FERREIRA et al., 2001; JAKELAITIS; SILVA; FERREIRA, 2005).

2.3.10.2 Nitrogênio total na parte aérea de plantas de milho

O teor médio de N total contido na parte aérea de plantas de milho (g kg^{-1}) coletados na época da colheita em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha^{-1}) encontra-se na Figura 25. Verifica-se que o teor de N total na parte aérea das plantas de milho cresceu com o incremento das doses de N aplicadas, variando de 4,5 a 8,4 g kg^{-1} . O modelo de regressão que melhor se ajustou foi o linear, o qual foi significativo ($P < 0,01$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual 97,10%, indicando que a variação de concentração de N total na parte aérea das plantas de milho, variável dependente 'y', é explicada por esse modelo de regressão linear.

Araújo; Ferreira e Cruz (2004) testaram doses crescentes de N (0, 60, 120, 180 e 200 kg ha^{-1}) e também observaram que o teor de N total na matéria seca da parte aérea apresentou um modelo de regressão linear variando de 8,08 g kg^{-1} a 10,98 g kg^{-1} de N total, com valores um pouco acima das encontradas neste trabalho. Entretanto, Fernandes et al. (1998) encontram resposta quadrática, com um teor máximo de 5,1 g kg^{-1} de N total, no sistema de preparo de solo com arado de disco, correspondendo a uma dose máxima de 240 kg ha^{-1} de N. Já segundo Fernandes (2006), o teor de N total na planta no final do ciclo da cultura variou de 8,03 a 14,22 g kg^{-1} de MS. As doses de N (0, 30, 60 e 120 kg ha^{-1} de N) ajustaram-se a uma função linear.

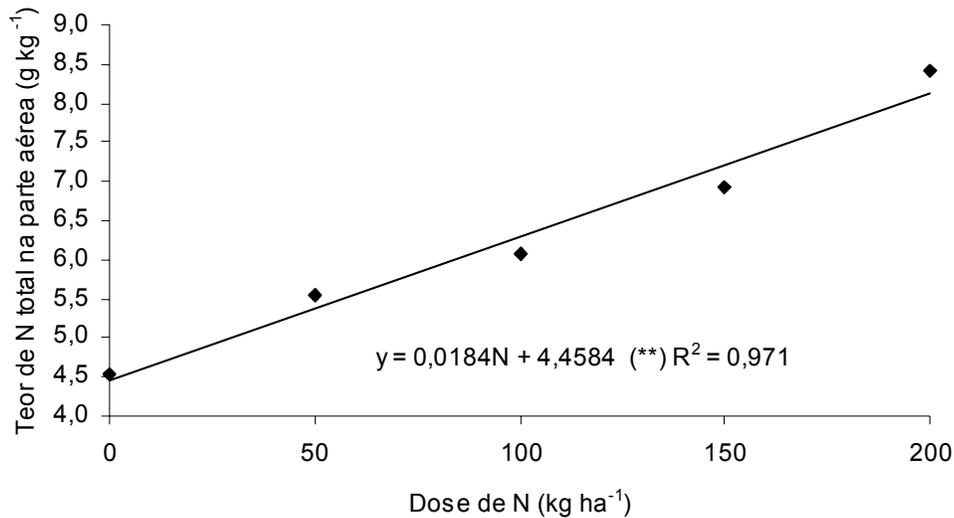


Figura 25 - Teor médio de N total contido na parte aérea de plantas de milho (g kg^{-1}) coletado na época da a colheita em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha^{-1})

2.3.10.3 Teor de nitrogênio total nos grãos de milho

O teor de N total contido nos grãos de milho (g kg^{-1}) coletados após a colheita em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha^{-1}) encontra-se na Figura 26. Verifica-se que o teor de N total contido nos grãos de milho após a colheita cresceu com o incremento das doses de N aplicadas via solo, variando de 13,6 a 16,0 g kg^{-1} de N total. O modelo de regressão que melhor se ajustou foi o linear, o qual foi significativo ($P < 0,01$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual 94,76%, indicando que a variação de concentração de N total na parte aérea das plantas de milho, variável dependente 'y', é explicada por esse modelo de regressão linear.

Fernandes (2006) avaliaram doses crescentes de N (0, 30, 60 e 120 kg ha^{-1} de N) e também observaram resposta linear, sendo que o teor de N total nos grãos após a colheita variou de 12,89 a 18,62 g kg^{-1} de MS de grãos.

O teor de N total variou de forma linear ao incremento de N (0, 60, 120 e 180 kg ha^{-1} de N), variando de 12,3 a 14,2 g kg^{-1} de massa seca dos grãos (SILVA et al., 2005).

Houve aumento também de forma linear com o aumento das doses crescente de N (0, 60, 120 e 240 kg ha^{-1}) aplicadas em área sob irrigação, para os sistemas de preparo do solo com disco e aiveca. Para o plantio direto não houve resposta significativa (FERNANDES et al., 1999).

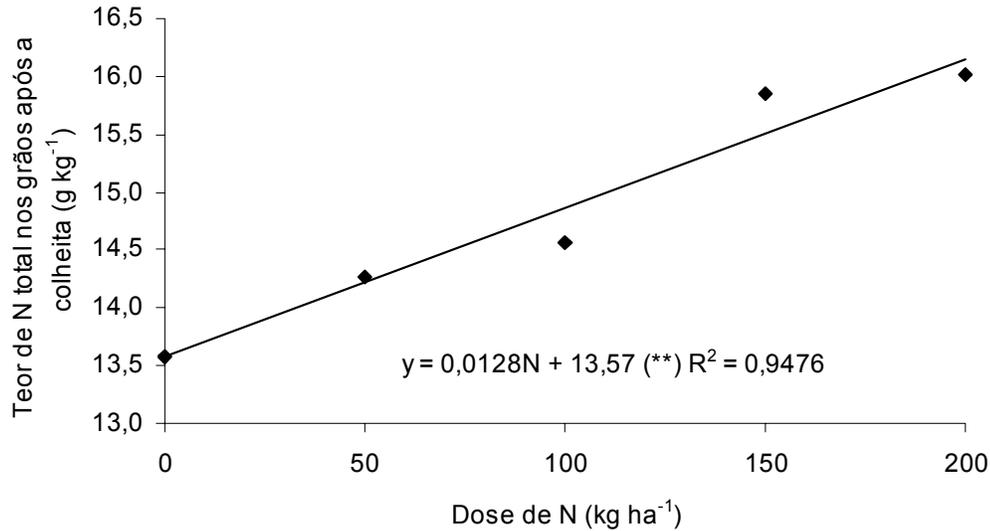


Figura 26 - Teor de nitrogênio total contido nos grãos de milho (g kg⁻¹) coletados após a colheita em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

Entretanto, Fernandes et al. (1998) encontraram resposta de forma quadrática, com um teor máximo de 11,99 g kg de N total, correspondendo a uma dose máxima de 196 kg ha⁻¹ de N. Araújo; Ferreira e Cruz (2004) não encontraram valores significativos para o teor de N total nos grãos, apresentando uma média de 15,24 g kg⁻¹.

2.3.10.4 Altura de plantas e de inserção de espigas de milho

A altura de plantas e de inserção de espigas de milho determinadas antes da colheita em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹) encontram-se na Figura 27. Verifica-se que, para ambos os parâmetros, os dados ajustaram-se a um modelo quadrático, o qual foi estatisticamente significativo ($P < 0,05$) para altura de plantas e ($P < 0,01$) para altura de inserção de espigas de milho. A altura máxima de plantas de milho foi de 2,43 m para a aplicação de 190 kg ha⁻¹ de N. A altura máxima de inserção de espiga de milho foi de 1,31 m, correspondendo a uma dose de 175 kg ha⁻¹ de N. Silva et al. (2005), avaliando os tratamentos com doses crescentes de N (0, 30, 80, 130 e 180 kg ha⁻¹), aplicando 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura e mais 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de N em cobertura, também obtiveram efeito quadrático no modelo de regressão na avaliação de altura de plantas e de inserção de espigas de milho, obtendo-se os pontos de máximo, com as doses de 171 e 158 kg ha⁻¹ de N, respectivamente.

Sá (1996), avaliando a combinação das doses de 0, 30 e 60 kg ha⁻¹ de N na semeadura e 0, 60 e 120 kg ha⁻¹ em cobertura aos 35 e 55 dias após a semeadura, verificou uma redução da altura de plantas e amarelecimento das folhas no tratamento em que não foi aplicado N; entretanto, observou que a dose de 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura contribuiu para um melhor arranque das plantas de milho, provavelmente em função da imobilização causada pela decomposição da matéria orgânica, composta principalmente de aveia preta.

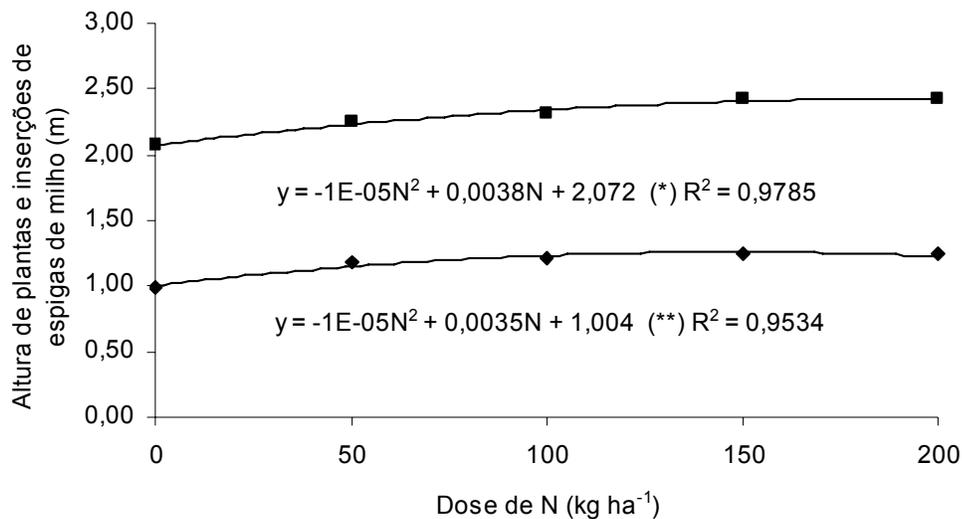


Figura 27 - Altura de plantas (m) e de inserção de espigas de milho (m) determinadas antes da colheita em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

Mar et al. (2003) verificaram também que a altura de plantas de milho respondeu de forma quadrática às doses crescentes de N (30, 60, 90, 120 e 150 kg ha⁻¹). A máxima altura de plantas e de inserção de espiga foi de 2,1 m e 0,99 m em função das doses de 121,5 kg ha⁻¹ e 116,1 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Sangoi e Almeida (1994), Oliveira (1998) e Silva et al. (2000) também encontraram ajustamento de modelo de regressão quadrática em função de doses crescentes de nitrogênio. Entretanto, Duete (2000) encontrou modelo da análise de regressão linear.

2.3.10.5 Produtividade de grãos de milho (13% de teor de água)

A produtividade média de grãos de milho corrigidos para 13% de teor de água (kg ha⁻¹) determinada em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹) encontra-se na Figura 28. Observa-se que os dados de produtividade de grãos ajustaram-se a um modelo quadrático em

função das doses de N aplicadas e a análise de regressão revelou efeito significativo ($P < 0,01$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual 98,95%, indicando que a variação da produtividade média de grãos de milho corrigidos para 13% de teor de água, variável dependente 'y', é explicada por esse modelo de regressão quadrática. A máxima produtividade técnica de grãos a 13% de teor de água ($10.446 \text{ kg ha}^{-1}$) foi obtida com a aplicação de 180 kg ha^{-1} de N, aproximadamente. A produção de grãos para a dose máxima de N apresentou um incremento médio de 31,5%. Esse incremento demonstra que apesar do solo possuir boa fertilidade e matéria orgânica, o que o classifica como de baixa resposta à adubação nitrogenada (van RAIJ et al., 1997), assim mesmo respondeu à adubação de N. A menor produtividade correspondeu ao tratamento que não recebeu N a qual foi de 7.155 kg ha^{-1} ; entretanto, essa produtividade encontra-se bem acima da produtividade média nacional dos últimos cinco anos (safra 2000/01 a 2004/05) que foi de $3.255,75 \text{ kg ha}^{-1}$ (FNP COMERCIAL E CONSULTORIA, 2005).

O milho, por ser uma planta de origem tropical, exige, durante o seu ciclo vegetativo, calor e água para se desenvolver e produzir satisfatoriamente, proporcionando rendimentos compensadores. A produtividade de grãos da cultura de milho é diretamente dependente da atividade fotossintética da planta, sendo que a fotossíntese, por sua vez, depende da expansão da área foliar e do tempo permanência das folhas em plena atividade na planta (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

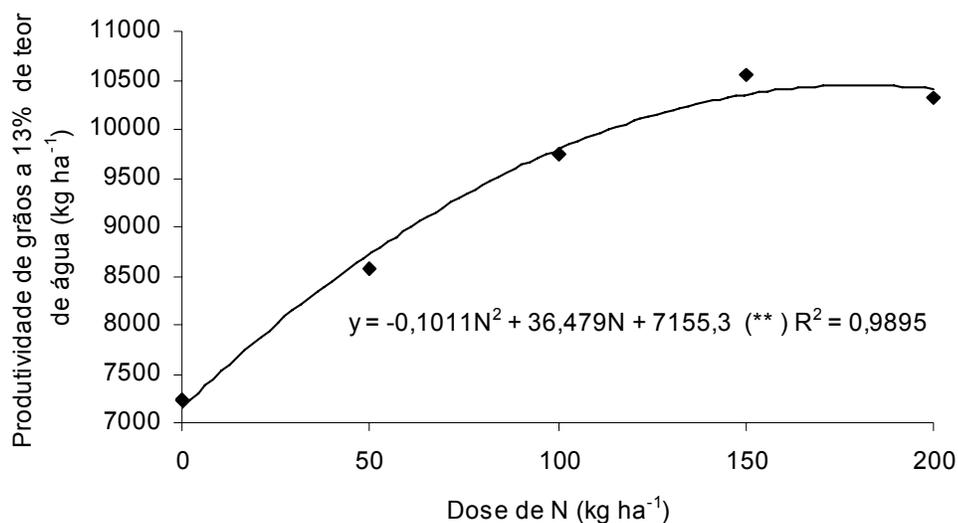


Figura 28 - Produtividade média de grãos de milho corrigidos para 13% de teor de água (kg ha^{-1}) determinada em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha^{-1})

Nas adubações nitrogenadas é importante que a quantidade de N a ser aplicado na cultura do milho, seja a mais exata possível, minimizando tanto os excessos, que prejudicam a qualidade ambiental e oneram o produtor, quanto os déficits, que comprometem o rendimento projetado (AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002). De acordo com Büll (1993), a maioria dos estudos realizados mostra que os melhores resultados são obtidos com a aplicação de 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura e de 90 a 120 kg ha⁻¹ entre 30 e 45 dias após a germinação, totalizando entre 120 e 150 kg ha⁻¹ de N, normalmente não sendo economicamente viável o uso de doses de N muito acima desses valores. Entretanto, para a adubação nitrogenada em cobertura em cultivo de sequeiro para altas produtividades de grãos de milho varia de 50 a 90 kg ha⁻¹ de N e, para cultivo irrigado, de 120 a 150 kg ha⁻¹ de N (SOUZA et al., 2003). Para uma expectativa de produtividade de grãos de milho superior a 9 Mg ha⁻¹ em um solo com o teor de matéria orgânica entre 2,5 e 5,0%, com cultura de cobertura antecedente de gramínea com alta produção, recomenda-se uma dose de 180 kg ha⁻¹ de N. Em anos nos quais as condições climáticas são favoráveis à cultura do milho, a quantidade de N requerido para otimizar a produtividade de grãos pode alcançar valores superiores a 150 kg ha⁻¹ (AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002).

Soares (2003) mostra claramente a importância do N para o aumento da produtividade da cultura de milho, uma vez que o referido elemento teve influência significativa ($P < 0,01$) na resposta da adubação nitrogenada na cultura do milho.

Gava (2003) avaliou o comportamento do milho Ag-5011 (Agrocerec – Monsanto) utilizando os tratamentos de 0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹ de N, sendo que na adubação de cobertura foi aplicado 25 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia, colocadas entre os estádios fisiológicos de 6 a 8 folhas, durante dois anos. A produtividade de grãos de milho se ajustou a um modelo quadrático com uma produtividade máxima alcançada com a dose de 256 kg ha⁻¹ de N, correspondendo a um rendimento médio de 9.703 kg ha⁻¹.

Em Quebec – Canadá, Liang e Mackenzie (1994) encontraram também uma resposta quadrática do rendimento de grãos de milho às doses de N; para atingir a produção máxima de grãos de milho necessitaram aplicar de 300 e 350 kg ha⁻¹ de N; a produção de grãos ótima e econômica para uma relação de preços (N:grãos) de 10:1 foi obtida com 273 kg ha⁻¹ de N sobre o solo “Humic Gleysol” em 1990 e 286 e 179 kg ha⁻¹ de N em 1989 e 1990, respectivamente, sobre o solo “Grew Brown Luvisol”. O efeito quadrático das doses de N sobre o rendimento de grãos

também foi encontrado por Coelho et al. (1992), Fernandes et al. (1998) e Andrade Jr. (2000) utilizando milho precoce em solos com média fertilidade.

Houve resposta da cultura de milho às doses crescentes de nitrogênio (0, 70, 140 e 210 kg ha⁻¹) aplicadas, sendo que a melhor representação foi alcançada pelas curvas de resposta de efeito quadrático, obtendo-se a máxima produtividade de grãos da cultura de milho (8,58 Mg ha⁻¹) mediante a aplicação da dose de 201,2 kg ha⁻¹ de N, o que mostra que esse solo possui capacidade relativamente satisfatória de suprimento de N (FERREIRA, 1997; FERREIRA et al., 2001).

Doses crescentes de N-uréia (0, 60, 120 e 240 kg ha⁻¹ de N), com o preparo do solo com arado de disco, apresentou também resposta quadrática para a produção de grãos ($y = 3357,71 + 21,6074N - 0,0691N^2$ $R^2=0,99$), com a máxima produção técnica de grãos de 5.045 kg ha⁻¹ em função da dose de 156 kg ha⁻¹ de N (FERNANDES, 1998). O rendimento de grãos de milho a 13% de teor de água no ano 1992, responderam as doses crescentes de N (0, 50, 100 e 200 kg ha⁻¹ de N) e houve resposta quadrática variando de 8280 a 11176 kg ha⁻¹, com produtividade máxima técnica de 11.350 kg ha⁻¹ para uma dose de 161,8 kg ha⁻¹ de N (POTTKER; ROMAN, 1994).

A produção de grãos aumentou de forma quadrática com o incremento das doses de N (0, 60, 120 e 240 kg ha⁻¹), em três sistemas de preparo do solo: plantio direto, arado de disco e arado de aiveca, com a dose máxima técnica de N de 146,6 (6.176,9 kg ha⁻¹ de grãos), 156,3 (5.045,7 kg ha⁻¹ de grãos) e 167,4 kg ha⁻¹ (4.635,54 kg ha⁻¹ de grãos), respectivamente (FERNANDES et al., 1999).

A produtividade de grãos de milho respondeu às doses crescentes de N (0, 30, 90 e 180 kg ha⁻¹) e os dados se ajustaram a uma função quadrática, sendo que a máxima produtividade foi alcançada com a dose estimada em 110 kg ha⁻¹ (6000 kg ha⁻¹ de grãos de milho) ($y=-0,0791N^2 + 17,493N + 5029,8$) (FERNANDES; BUZETTI; ANDRADE, 2005).

A produtividade de milho aumentou de forma quadrática em função do aumento das doses de N (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N), sendo que a máxima eficiência técnica para a produtividade de milho foi alcançada com a dose de 166 kg ha⁻¹ de N (SILVA et al., 2005).

A produtividade de grãos respondeu de forma quadrática às doses crescentes de N (30, 60, 90, 120 e 150 kg ha⁻¹). A maior produtividade técnica (6.549 kg ha⁻¹) foi obtida pela aplicação de 131 kg ha⁻¹ de N, com a adubação nitrogenada em cobertura; a mesma foi realizada quando as plantas apresentavam com oito folhas completamente expandidas (MAR et al., 2003).

Cardoso e Melo (1998), avaliando cinco doses crescentes de N (0, 80, 120, 160 e 200 kg ha⁻¹), sendo 1/3 na sementeira e o restante por volta dos 40 dias após a emergência das plantas, verificaram, por meio do ajuste, que a produção máxima obtida (5713 kg ha⁻¹) correspondeu à dose de 107 kg ha⁻¹. O acréscimo em relação à testemunha foi de 57%, indicando que o N foi um fator limitante. O número de grãos por espiga e a massa de grãos foram os componentes de produção que mais contribuíram para a produção de grãos.

A produtividade média de grãos de dez genótipos de milho conduzidos sob sistema plantio direto, no estado de São Paulo, nas cidades de Votuporanga (ano agrícola 98/99), Candido Mota (ano agrícola 98/99), Itapeva (ano agrícola 98/99), Votuporanga (ano agrícola 99/00), Palmital (ano agrícola 99/00), Votuporanga (ano agrícola 00/01) e Palmital (ano agrícola 00/01) responderam as doses crescentes de N (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N), na forma de uréia, onde foi aplicado cerca de 30 kg ha⁻¹ de N na sementeira. O modelo de regressão que melhor se ajustou foi o quadrático apresentando uma produtividade máxima técnica de grãos (6.012, 7.690, 7.053, 5.113, 5.891, 6.719 e 7.718 kg ha⁻¹) e doses de N de 140, 135, 136, 180, 169, 168, 172, com um aumento relativo de produtividade (%) de 30, 10, 15, 99, 137, 22 e 23%, para os ensaios conduzidos nas respectivas cidades (DUARTE, 2003).

Geralmente os aproveitamentos de N decrescem com o aumento das doses aplicadas, em vista do suprimento de N exceder às necessidades de cultura; tais decréscimos são conseqüências das perdas de amônia que aumentam com a dose de aplicação, e este aumento pode ser linear ou exponencial. O milho respondeu linearmente às doses de N-uréia testadas (0, 55, 95, 135, 175 kg ha⁻¹ de N) para o parâmetro rendimento de grãos (DUETE, 2000).

Já Ibricci et al. (1998) observaram respostas lineares do rendimento de grãos do milho híbrido ‘LG-55’ às doses de N que variaram de 200 a 350 kg ha⁻¹ com incrementos de 50 kg ha⁻¹ de N.

Em Quebec – Canadá, Tran; Giroux e Cescas (1997) encontraram respostas lineares para os rendimentos de grãos, em dois anos de cultivo do milho, com uma aplicação de doses de N que variaram de 0 a 180 kg ha⁻¹, com incremento de 60 kg ha⁻¹, em solos “Gleysol arthique” e “Gleysol humique”.

Houve efeito linear positivo das doses de N sobre o rendimento de grãos, variando de 4303,98 a 6818,65 kg ha⁻¹ ($y=4303,98 + 10,4738N$ $R^2=0,91$) (JAKELAITIS; SILVA; FERREIRA, 2005).

O efeito das doses crescentes de N-uréia (0, 60, 120, 180 e 240 kg ha⁻¹) na produtividade de grãos de milho sob irrigação foi linear, variando de 8.866 a 11.269 kg ha⁻¹ e 9.050 a 11.550 kg ha⁻¹ de grãos, plantio milho em sucessão a milho e soja respectivamente (ARAÚJO; FERREIRA; CRUZ, 2004).

Verificou-se acréscimo linear com a elevação das doses de N (0, 50, 100 e 150 kg kg ha⁻¹) (AMARAL FILHO, 2005).

Soares (2003) verificou que a aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N (8379,9 kg ha⁻¹) proporcionou aumento de 92% na produtividade em relação aos tratamentos onde a aplicação de N não foi efetuada (4354,7 kg ha⁻¹). A produtividade máxima foi obtida com a dose de 202,6 kg ha⁻¹ de N, na qual foram produzidos 9182,2 kg ha⁻¹ de grãos, o que equivale a um aumento de 108% e 9% em relação à produtividade obtida com 0 kg ha⁻¹ e 120 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Dessa maneira, esse resultado demonstra que, para as condições em que o experimento foi conduzido, não seria viável ou uso de doses de N muito superior a 120 kg ha⁻¹, pois o benefício obtido não seria suficiente para suprir o gasto relativo ao aumento da dose de N. Coelho (1987) obteve aumento de 80% na produtividade grãos ao aplicar 120 kg ha⁻¹ de N.

Sangoi e Almeida (1994) obtiveram também aumento de 67% na produtividade ao elevarem a dose de N de 0 kg ha⁻¹ para 100 kg ha⁻¹, sendo que para doses superiores (150 kg ha⁻¹ de N), o incremento foi de apenas 5%, tornando-se inviável economicamente. Já Sousa et al. (2003) não obtiveram resposta na produtividade de grãos de milho com a aplicação de 0 a 120 kg ha⁻¹ de N em cobertura; entretanto observou efeito significativo (P<0,05) na interação espaçamentos x densidades populacionais, com maior produtividade mediante o emprego de 0,60 m de espaçamento entre linhas e densidade populacional de 80 mil planta ha⁻¹.

2.3.10.6 Produtividade de massa seca da palhada de milho

A massa seca da palhada de milho (kg ha⁻¹) determinada em função das diferentes doses de N (kg ha⁻¹) encontra-se na Figura 29. Verifica-se que os dados de produtividade da palhada de milho (colmo, bainha, folha e pendão) ajustaram-se a um modelo quadrático em função das doses de N aplicadas e a análise de regressão revelou efeito significativo (P<0,01), com um coeficiente de determinação (R²) igual 99,38%, indicando que a variação da produtividade média da palhada de milho, variável dependente 'y', é explicada por esse modelo de regressão quadrática. A máxima produtividade técnica de palhada (4110 kg ha⁻¹) foi obtida com uma dose de 179 kg ha⁻¹

de N. A palhada de milho é de grande importância para a recomposição da matéria orgânica do solo e/ou ser utilizada como alimento para animais no sistema de produção lavoura pecuária.

Soares (2003) também aplicou N em doses crescentes (0, 120 e 240 kg ha⁻¹), e verificou influência significativa sobre a massa de MS de colmo e sobre a massa de MS de folha. A produção de palha respondeu de forma quadrática ($y = 3629,05 + 7,5484N - 0,0211N^2$ R²=98%) às doses crescentes de N e apresentou a produtividade máxima técnica (4302 kg ha⁻¹) que foi obtida com a dose de 178,5 kg ha⁻¹ de N (FERNANDES, 1998).

A produção de MS da palhada (folha + palha, colmo + pendão e sabugo) aumentou também de forma quadrática com o aumento das doses de N (0, 60, 120 e 240 kg ha⁻¹), em três sistemas de preparo do solo: plantio direto, arado de disco e arado de aiveca com uma dose máxima de N de 130,7 (5.331,71 kg ha⁻¹ de palhada), 178,9 (4.304,1 kg ha⁻¹ de palhada) e 150,1 kg ha⁻¹ (3.833,3 kg ha⁻¹ de palhada), respectivamente (FERNANDES et al., 1999).

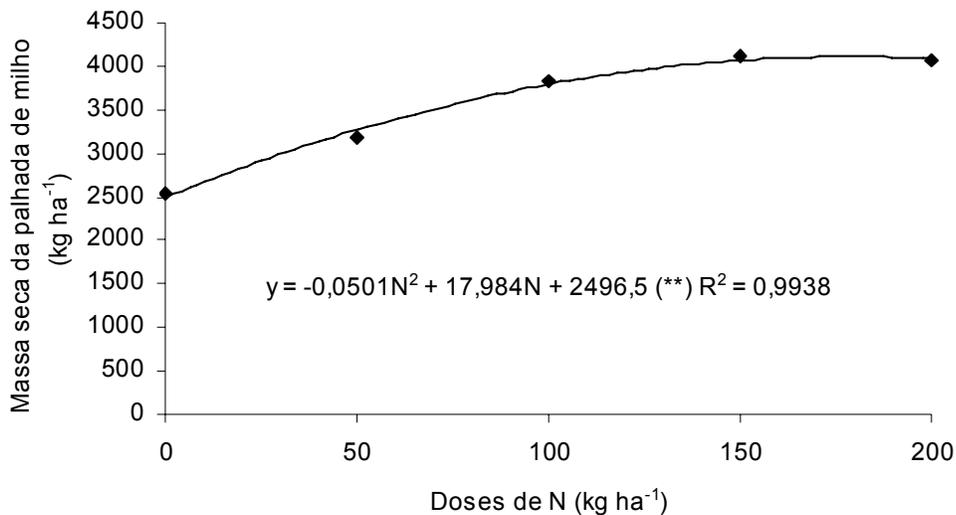


Figura 29 - Massa seca da palhada de milho (kg ha⁻¹) determinada em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

Em Quebec – Canadá, Tran; Giroux e Cescas (1997) encontraram respostas lineares para matéria seca da parte aérea, em dois anos de cultivo do milho, com uma aplicação de doses de N que variaram de 0 a 180 kg ha⁻¹, com incremento de 60 kg ha⁻¹, em solos “Gleysol arthique” e “Gleysol humique”.

Porém a massa seca das plantas de milho na maturação fisiológica, para as doses crescentes de N (0, 30, 90 e 180 kg ha⁻¹), se ajustou a um modelo linear crescente e para a dose

de 180 kg ha⁻¹ de N obteve-se 2852 kg ha⁻¹ de MS de palhada (FERNANDES; BUZETTI; ANDRADE, 2005).

A massa seca da palhada de milho no florescimento apresentou uma variação de 5,11 Mg ha⁻¹ (testemunha) a 8,36 Mg ha⁻¹ (aplicação de 60 kg ha⁻¹ na semeadura mais 120 kg ha⁻¹ de N em cobertura), diferindo estatisticamente ($P < 0,05$). As doses de N (0, 30, 60 e 120 kg ha⁻¹ de N) ajustaram-se a uma função linear. Entretanto a massa seca da planta de milho no final do ciclo da cultura, sofreu uma variação de 6,12 (testemunha) a 22,36 Mg ha⁻¹ (aplicação de 60 + 120 kg ha⁻¹ de N na semeadura e cobertura), diferindo estatisticamente ($P < 0,05$). As doses de N ajustaram-se a uma função linear (FERNANDES, 2006).

2.3.10.7 Produtividade de brácteas secas de milho

A massa média de brácteas secas (kg ha⁻¹) determinadas em função das diferentes doses de N (kg ha⁻¹) encontra-se na Figura 30. Observa-se que os dados de massa seca de brácteas de milho ajustaram-se a um modelo quadrático em função das doses de N aplicadas e a análise de regressão revelou efeito significativo ($P < 0,01$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 97,85%, indicando que a variação da massa seca de brácteas de milho, variável dependente 'y', é explicada por esse modelo de regressão quadrática. A máxima produtividade técnica de palhada (1401 kg ha⁻¹) foi obtida com uma dose de 172 kg ha⁻¹ de N. Quando a colheita do milho é realizada por máquina, geralmente, as brácteas retornam para o solo, passando a fazer parte da matéria orgânica e geralmente na agricultura familiar, principalmente, as espigas são colhidas inteiras e armazenadas em paióis onde são fornecidas aos animais ao longo do ano. A massa seca de brácteas sem aplicação de N foi de 1030 kg ha⁻¹, comparada com a dose de máxima eficiência técnica nota-se que houve um incremento de 26,5%.

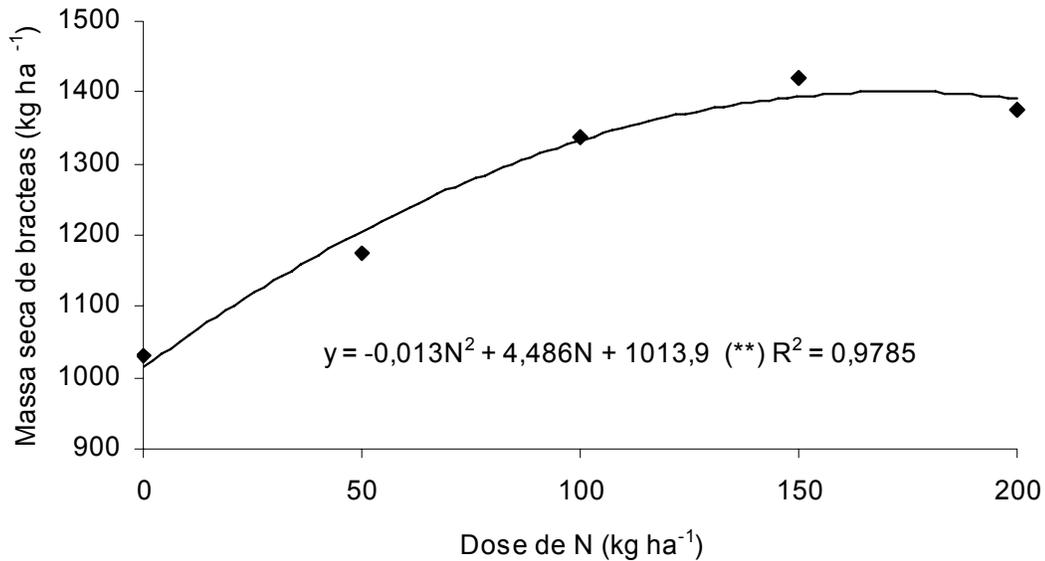


Figura 30 - Massa média de brácteas secas (kg ha⁻¹) determinadas em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

2.3.10.8 Produtividade de massa seca de sabugo de milho

A massa média seca de sabugo (kg ha⁻¹) determinado em função das diferentes doses de N (kg ha⁻¹) encontra-se na Figura 31. Verifica-se que a massa seca de sabugo após a colheita de milho aumentou com o incremento das doses de N, variando de 945 a 1397 kg ha⁻¹. O modelo de regressão que melhor se ajustou foi o linear, o qual foi significativo ($P < 0,01$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual 96,66%, indicando que a variação de massa seca de sabugo das plantas de milho, variável dependente 'y', é explicada por esse modelo de regressão linear. A dose de 200 kg ha⁻¹ de N contribuiu com um incremento de 32%, aproximadamente, mostrando que esse parâmetro respondeu também às adubações nitrogenadas. O sabugo das plantas de milho também pode retornar para a área cultivada quando se faz a colheita mecânica e/ou pode ser armazenado com a espiga inteira, contribuindo como volumoso nas rações de animais.

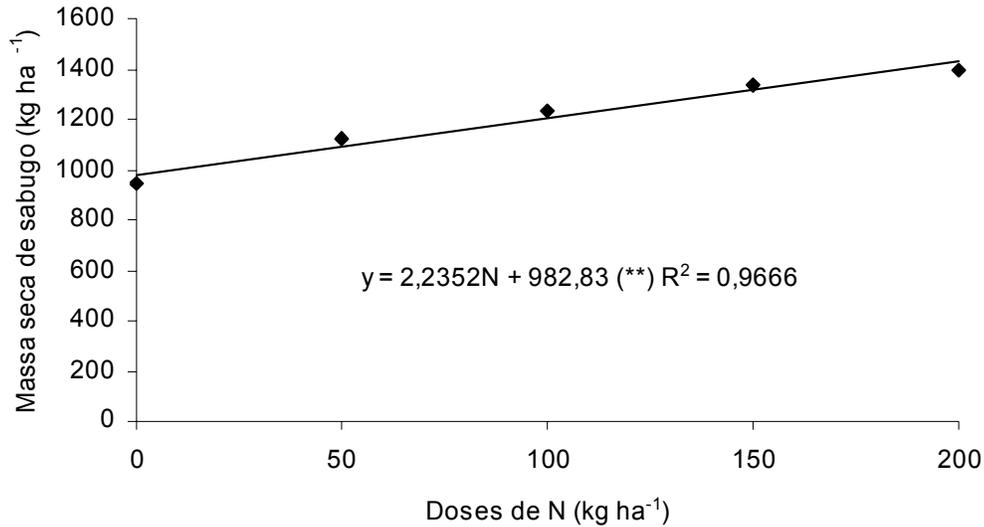


Figura 31 - Massa média seca de sabugo (kg ha⁻¹) determinado em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

2.3.10.9 Número de espigas por hectare

O número médio de espigas por hectare determinadas em função das diferentes doses de N (kg ha⁻¹) encontra-se na Figura 32. Observa-se que o número de espigas por hectare aumentou com o incremento das doses de N, variando de 61.190 a 69.841 espigas, com uma variação de 8.444 espigas. O melhor modelo de regressão que se ajustou foi o linear, o qual foi significativo ($P < 0,01$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual 92,63%, indicando que a variação do número de espigas por hectare das plantas de milho, variável dependente 'y', é explicada por esse modelo de regressão. A dose de 200 kg ha⁻¹ de N contribuiu com um incremento de 12,38%, aproximadamente, mostrando que esse parâmetro respondeu também às adubações nitrogenadas. Duete (2000) também encontrou efeito das doses crescentes de nitrogênio sobre o número de espigas com um modelo de regressão linear e significativo ($P < 0,05$).

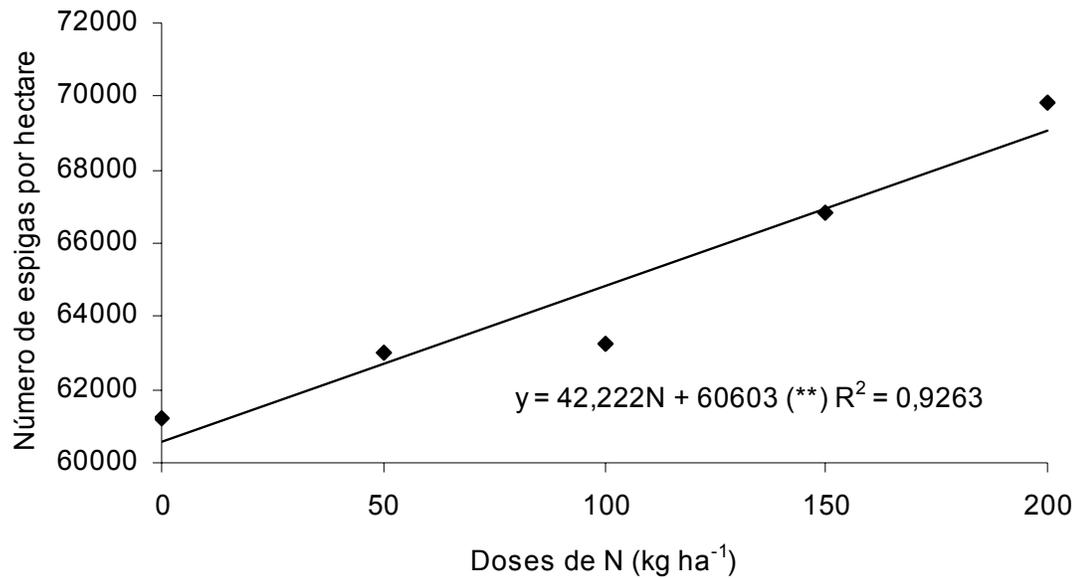


Figura 32 - Número médio de espigas por hectare determinadas em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

2.3.10.10 Número de fileiras de grãos por espiga de milho

O número médio de fileiras de grãos por espiga de milho determinado em função das diferentes doses de N (kg ha⁻¹) encontra-se na Figura 33. Observa-se que todos os tratamentos apresentaram espigas de milho com oito fileiras, sendo que um dos fatores, provavelmente, que contribuíram para essa distribuição foi à existência da segunda espiga, especialmente para os tratamentos de três a cinco, que nem sempre acompanhavam a primeira espiga em tamanho e diâmetro; entretanto, o tratamento um de um modo geral se destacava, observação visual na hora dessa avaliação, mas não houve diferença estatística ($P > 0,05$) pelo teste de Tukey. O tratamento um diferiu estatisticamente ($P < 0,05$) dos demais tratamentos quanto ao número de dez fileiras de sementes de milho por espiga, com 12% aproximadamente e os demais apresentaram uma média de 6,15%, aproximadamente, praticamente a metade do tratamento um, indicando que houve resposta das doses de N. Percebe-se também que 50 a 60% do número de espigas possuíam 12 fileiras de sementes de milho por espiga e não houve diferença estatística ($P > 0,05$) entre os tratamentos pelo teste de Tukey, entretanto o tratamento que não recebeu N apresentou uma tendência de apresentar uma maior concentração do número de fileiras de grãos por espiga por

hectare. Quanto ao número de 14 fileiras de grãos de milho por espiga, nota-se que os tratamentos de dois a cinco apresentaram de 30 a 40%, aproximadamente, e o tratamento um apresentou cerca de 25%, diferindo estatisticamente ($P < 0,05$) pelo teste de Tukey. O número de sementes de milho por espiga com 16 fileiras foi baixo para todos os tratamentos, entretanto o tratamento um foi o que apresentou menor percentual e diferiu estatisticamente ($P < 0,05$) dos demais pelo teste de Tukey, com um percentual de 0,4%. Os demais tratamentos apresentaram um percentual médio 2,9%, aproximadamente.

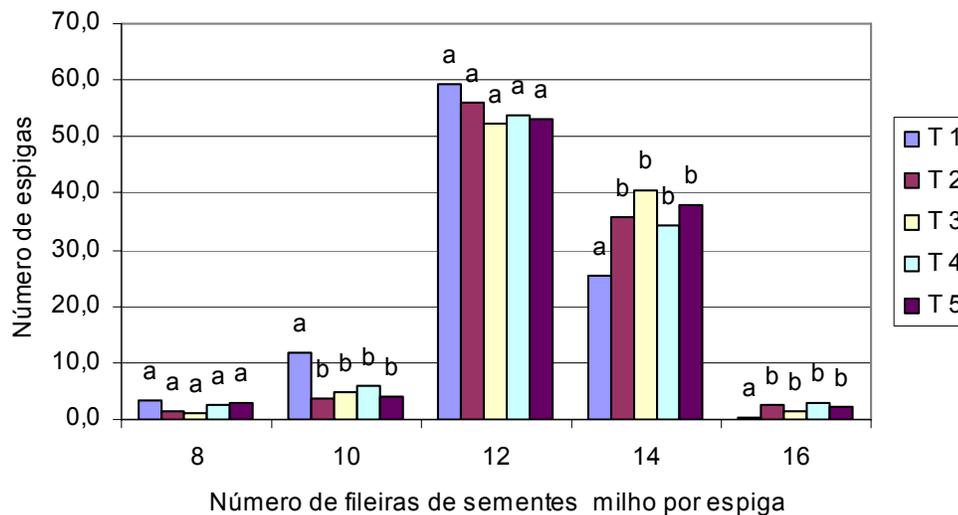


Figura 33 - Número médio de fileiras de sementes por espigas de milho determinadas em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

Os valores médios em percentagem do número de fileiras de grãos por espiga de milho encontram-se na Figura 34. Observa-se que a maior percentagem de fileiras de sementes por espiga de milho foi de 12 e 14 fileiras, correspondendo por 89,7%, seguidas por 10, 8 e 16, com 6,1, 2,3 e 2,0%, respectivamente. De um modo geral, pode-se deduzir que há uma tendência desse híbrido de milho, 30P70 da Pioneer, de apresentar de 12 ou 14 fileiras de sementes de milho por espiga. Esse dado é importante em avaliação expedita de produtividade de grãos e/ou a ser utilizado em modelos que estimam a produtividade do milho.

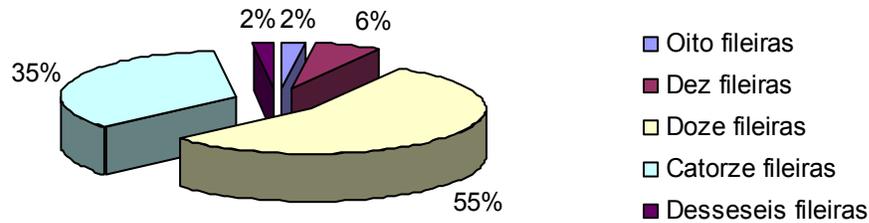


Figura 34 - Valores médios em percentagem do número de fileiras de grãos por espiga de milho.

O número de fileiras de grãos por espiga não apresentaram diferença significativa ($P > 0,05$) nas doses crescente de N (0, 30, 90 e 180 kg ha⁻¹) entre os cultivares: AG 9010, CO 32, XB 8010, DKB 333B e BR 106, com uma média de 13,88, 14,17, 13,71, 13,92 e 13,46 fileiras de grãos por espiga respectivamente (FERNANDES; BUZETTI; ANDRADE, 2005). Entretanto, já para Silva et al. (2005) o número de fileiras de grãos por espiga se comportou de forma quadrática em função do aumento das doses de N (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹), com uma máxima eficiência técnica de 162 kg ha⁻¹ de N.

O N tem alta influência no número de fileira de grãos por espiga, o qual é definido no estágio de quatro a seis folhas, quando também é definido a produção potencial da cultura do milho (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

2.3.10.11 Massa de mil grãos de milho

A massa média de mil grãos de milho a 13% de teor de água (g) determinada em função das diferentes doses de N (kg ha⁻¹) encontra-se na Figura 35. Observa-se que a massa de mil grãos de milho aumentou com o incremento das doses de N, variando de 277 a 324 g, com uma variação de 47 g. O melhor modelo de regressão que se ajustou foi o linear, o qual foi significativo ($P < 0,01$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual 93,06%, indicando que a variação da massa média de mil grãos de milho a 13% de teor de água, variável dependente 'y', é explicada por esse modelo de regressão. A dose de 200 kg ha⁻¹ de N contribuiu com um

incremento de 14,5%, aproximadamente, mostrando que esse parâmetro respondeu também às adubações nitrogenadas.

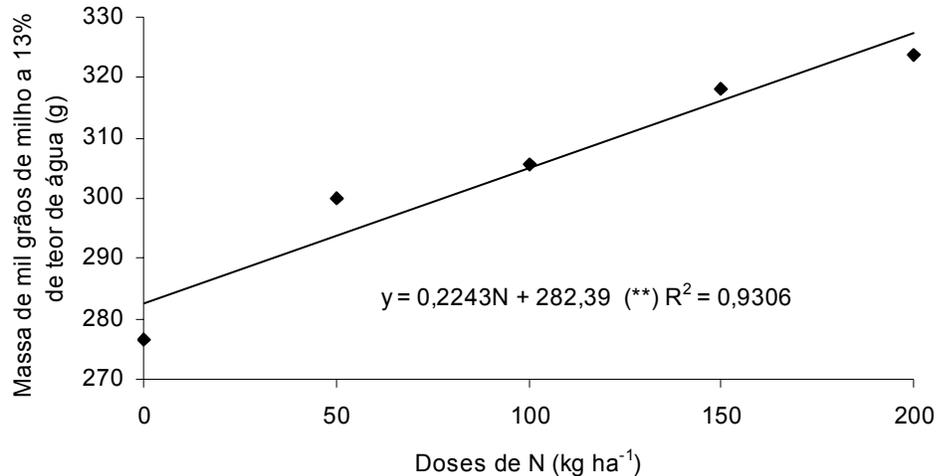


Figura 35 - Massa média de mil grãos de milho a 13% de teor de água (g) determinada em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

A massa de mil grãos é considerada um importante componente para avaliar a produtividade de grãos de milho, uma vez que, após o florescimento, qualquer tipo de estresse a que a planta seja submetida, de natureza biótica ou abiótica, poderá afetá-lo significativamente (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000). Assim, a deficiência ou a fitotoxicidade provocada pelo N poderá reduzir a massa de grãos das plantas de milho (SOARES, 2003).

Ferreira (1997) observou aumento de 24,5% na massa de mil grãos de milho ao aplicar dose de 210 kg ha⁻¹ de N. Também Sangoi e Almeida (1994) encontraram efeito significativo ao avaliarem doses crescentes de N, verificando efeito linear da adubação N sobre a massa de mil grãos de milho, sendo que a aplicação de 150 kg ha⁻¹ de N proporcionou aumento de 7% em relação à testemunha (sem N). Os referidos autores destacaram que o aumento na massa de mil grãos pode ter sido conseguido devido ao fato de que as maiores doses de N mantiveram a atividade fotossintética por um período mais prolongado, o que resultou no maior acúmulo de carboidratos nos grãos. Já Soares (2003) verificou-se que não houve influência significativa da fonte de variação das doses de N na massa média de mil grãos.

Também a massa de 1000 grãos aumentou linearmente com as doses crescentes de N, (JAKELAITIS; SILVA; FERREIRA, 2005).

A massa de 1000 grãos aumentou de forma linear com a adubação nitrogenada (0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de N), havendo interação para espaçamento x densidade populacional (AMARAL FILHO, 2005).

A massa de 1000 grãos aumentou de forma linear em função do aumento das doses de N, variando de 286,36 g a 316,96 g com as dose 0 e 180 kg ha⁻¹ de N (SILVA et al., 2005).

A massa seca de 1000 grãos de milho apresentou uma variação de 240 g (testemunha) a 302 g (aplicação de 60 kg ha⁻¹ na semeadura mais 120 kg ha⁻¹ de N em cobertura), diferindo estatisticamente (P<0,05) (FERNANDES, 2006).

O aumento da massa de mil grãos, em função do incremento nas doses de N, pode ter sido determinado principalmente pelas diferenças no período efetivo de enchimento dos grãos, respondendo de forma quadrática, com massa máxima de mil grãos de 352,4 g para a dose de 207,1 kg ha⁻¹ de N (FERREIRA et al., 2001).

A massa de 100 grãos do híbrido de milho XK 8010, não diferiu significativamente (P>0,05) do híbrido KDB 333B (FERNANDES; BUZETTI; ANDRADE, 2005).

Houve resposta da cultura de milho na massa de 1000 grãos às doses crescentes de nitrogênio aplicadas, sendo que a melhor representação foi alcançada pelas curvas de resposta de efeito quadrático (FERREIRA, (1997).

A massa média seca de 1000 grãos de milho (g) determinados em função das diferentes doses de N (kg ha⁻¹) encontra-se na Figura 36. Observa-se que a massa seca de mil grãos de milho aumentou com o incremento das doses de N. O melhor modelo de determinação que se ajustou foi o linear, o qual foi altamente significativo (P<0,01), com um coeficiente de determinação (R²) igual 93,06%, indicando que a variação da massa seca média de mil grãos de milho, variável dependente 'y', é explicada por esse modelo de regressão.

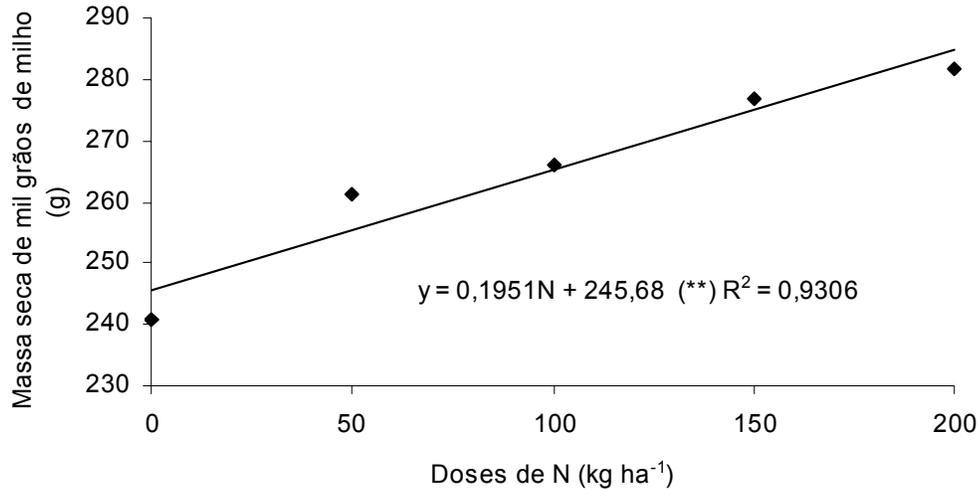


Figura 36 - Massa média seca de mil grãos de milho (g) determinados em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

2.3.10.12 Comprimento médio das espigas de milho

O comprimento médio de espiga (cm) determinado em função das diferentes doses de N (kg ha⁻¹) encontra-se na Figura 37. Verifica-se que o comprimento médio de espiga de milho aumentou com o incremento das doses de N, variando de 14,87 a 16,89 cm de comprimento de espigas, com uma variação de 2,02 cm aproximadamente. O melhor modelo de regressão que se ajustou foi o linear, o qual foi significativo ($P < 0,01$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual 92,53%, indicando que a variação do comprimento médio de espiga de milho, variável dependente 'y', é explicada por esse modelo de regressão. A dose de 200 kg ha⁻¹ de N contribuiu com um incremento de 11,96%, aproximadamente, mostrando que esse parâmetro respondeu também às adubações nitrogenadas.

A deficiência de N na cultura do milho reduz o tamanho da espiga de milho, com grãos mal formados e redução no teor de amido e proteínas (FERREIRA, 1977). Não houve efeito significativo ($P > 0,05$) das doses crescentes de N (0, 30, 90 e 180 kg ha⁻¹) em relação ao comprimento médio de espiga. A ausência de resposta do comprimento de espigas às doses de N era esperada, pois essas características são de alta herdabilidade e menos dependentes do ambiente (FERNANDES; BUZETTI; ANDRADE, 2005).

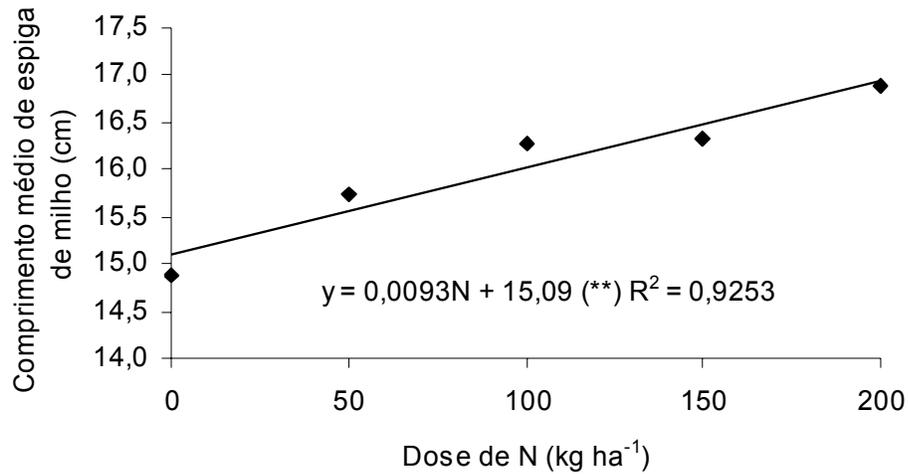


Figura 37 - Comprimento médio de espiga (cm) determinado em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

Soares (2003) também encontrou um aumento significativo no comprimento médio das espigas de milho em função da aplicação de N em doses crescentes. Cabe destacar que os resultados obtidos estão de acordo com o relatado por Büll (1993) que coloca que a aplicação de N proporcionou elevação de produtividade na cultura de milho, a qual pode ser atribuída, dentre outros fatores, aos efeitos positivos do referido elemento sobre o aumento do comprimento da espiga.

O comprimento médio de espiga não apresentou diferença significativa ($P > 0,05$) entre os híbridos AG 9010 (16,72 cm), CO 32 (17,32 cm), XB 8010 (17,70 cm) e DKB 333B (16,88 cm) com a aplicação de doses crescente de N (0, 30, 90 e 180 kg ha⁻¹) (FERNANDES; BUZETTI; ANDRADE, 2005).

2.3.10.13 Diâmetro das espigas de milho

O diâmetro médio de espiga (cm) determinado em função das diferentes doses de N (kg ha⁻¹) encontra-se na Figura 38. Verifica-se que o diâmetro médio de espiga de milho aumentou com o incremento das doses de N, variando de 4,18 a 4,57 cm de diâmetro, com uma variação de 0,39 cm, aproximadamente. O melhor modelo de regressão que se ajustou foi o linear, o qual foi significativo ($P < 0,01$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual 91,9%, indicando que a variação do comprimento médio de espiga de milho, variável dependente 'y', é explicada por

esse modelo de regressão. A dose de 200 kg ha⁻¹ de N contribuiu com um incremento de 8,53%, aproximadamente, mostrando que esse parâmetro respondeu também às adubações nitrogenadas.

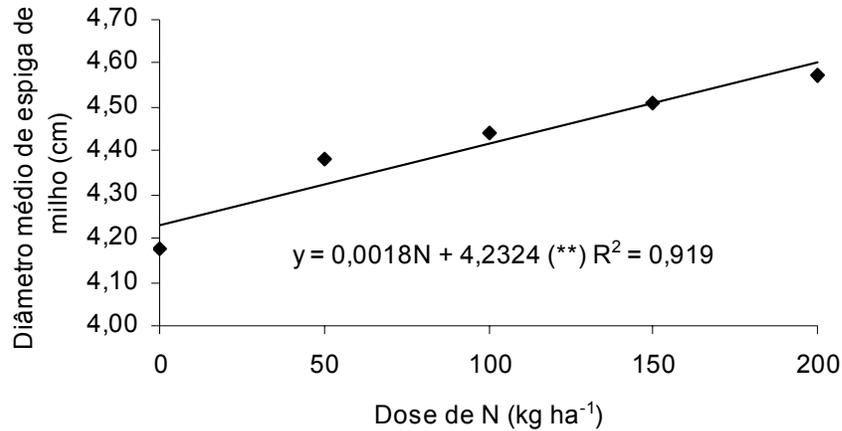


Figura 38 - Diâmetro médio de espiga (cm) determinado em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

2.3.10.14 Número de grãos por espiga de milho

O número de grãos por espiga de milho determinado em função das diferentes doses de N (kg ha⁻¹) encontra-se na Figura 39. Verifica-se que o número de grãos por espiga de milho ajustou-se a um modelo quadrático em função das doses de N aplicadas e a análise de regressão revelou efeito significativo ($P < 0,05$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual 85,81%, indicando que a variação do número de grãos por espiga de milho, variável dependente 'y', é explicada por esse modelo de regressão quadrática. O número máximo de grãos por espiga de milho em função das doses de N foi obtida com a aplicação de 119 kg ha⁻¹ de N correspondendo a 502 grãos por espiga de milho, aproximadamente.

O rendimento de grãos do milho está diretamente associado às variações no número de grãos por espiga, o qual dependerá das taxas de crescimento externadas pela cultura durante o florescimento (OTEGUI et al, 1995; CANTARERO et al, 1999). O N também influencia no número de óvulos nos primórdios da espiga (SILVA, 2005).

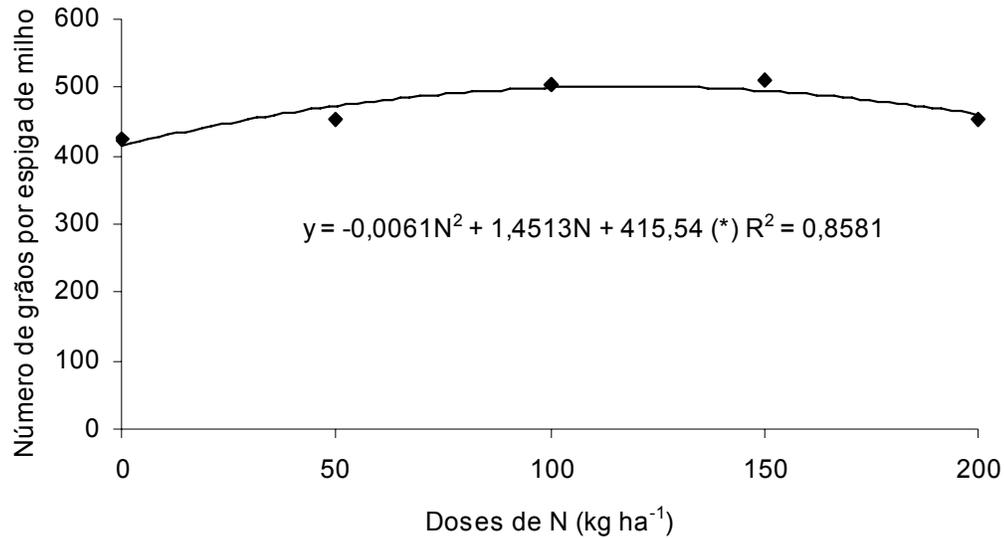


Figura 39 - Número de grãos por espiga de milho determinado em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

A aplicação de N em doses crescentes exerceu grande influência no número de grãos de milho por espiga (SOARES, 2003). O número de grãos por planta e por unidade de área constitui-se num dos mais importantes componentes determinantes do rendimento da cultura, o qual é influenciado por eventos ocorridos entre a emissão da quarta e décima folha, além daqueles evidenciados no florescimento (fecundação). Em área tropical este é o parâmetro que, normalmente, concorre para as maiores oscilações de rendimento da cultura. A obtenção do maior número de grãos possível é função da população e do número de espigas encontradas por planta (prolificidade) e por área. Erroneamente, valoriza-se, em demasia, o tamanho da espiga, conferindo a este componente acentuada massa na definição do potencial produtivo. Todavia, reconhece-se que na planta de milho, por não possuir capacidade compensatória efetiva, o tamanho da espiga muito pouco contribuirá para a definição da produção quando o número de espigas presentes na área for pequeno. Conclui-se, portanto que em primeira instância, o número de espigas é mais importante do que o tamanho das mesmas (FANCELLI; DOURADO NETO, 2000).

O incremento nas doses de N (0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de N) promoveu aumento linear no número de grãos por espiga (AMARAL FILHO, 2005).

2.3.10.15 Número de grãos por fileira de espiga de milho

O número de grãos por fileira de espiga de milho determinado em função das diferentes doses de N (kg ha^{-1}) encontra-se na Figura 40. Verifica-se que o número de grãos por fileira de espiga de milho ajustou-se a um modelo quadrático em função das doses de N aplicadas e a análise de regressão revelou efeito significativo ($P < 0,05$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual 69,95%, indicando que a variação do número de grãos por fileira de espiga de milho, variável dependente 'y', é explicada por esse modelo de regressão quadrática. O número máximo de grãos por fileira de espiga de milho em função das doses de N foi obtida com a aplicação de 116 kg ha^{-1} de N correspondendo a 39 grãos por fileira aproximadamente.

Silva et al. (2005) também constataram que o número de grãos por fileira aumentou de forma quadrática em função do aumento das doses crescentes de N (0, 60, 120 e 180 kg há^{-1} de N), com a máxima eficiência técnica de 154 kg de N . Já Fernandes; Buzetti e Andrade (2005) não encontraram efeito significativo ($P > 0,05$) das doses de N (0, 30, 90 e 180 kg ha^{-1}) em relação número de grãos por fileira por espiga.

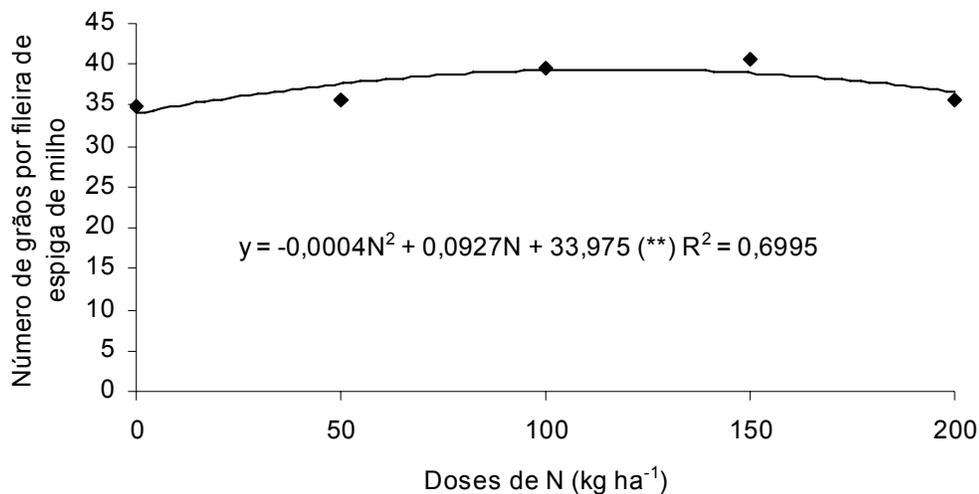


Figura 40 - Número de grãos por fileira de espiga de milho determinado em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha^{-1})

Não houve efeito significativo ($P > 0,05$) para o número médio de grãos por fileira de grãos por espiga em função das doses crescentes de N. As espigas pertencentes a todos os tratamentos, apresentaram uma média de aproximadamente de 14 fileiras de grãos (SOARES, 2003).

Fernandes; Buzetti e Andrade (2005) também não observaram efeito significativo ($P>0,05$) com a aplicação das doses crescente de N (0, 30, 90 e 180 kg ha⁻¹) em relação número de grãos por fileira.

2.3.10.16 Prolificidade de espiga de milho

A prolificidade (espigas planta⁻¹) determinada em função das diferentes doses de N (kg ha⁻¹) encontra-se na Figura 41. Verifica-se que a prolificidade, número de espigas por planta de milho, ajustou-se a um modelo linear em função das doses de N aplicadas e a análise de regressão revelou efeito significativo ($P<0,01$), com um coeficiente de determinação (R^2) igual 93,78%, indicando que a variação da prolificidade das plantas de milho, variável dependente 'y', é explicada por esse modelo de regressão linear. Houve uma variação da prolificidade de 1,01, tratamento 1, a 1,16 para o tratamento cinco, indicando que esse parâmetro responde a adubação nitrogenada, entretanto a prolificidade cresce, mas, o tamanho, principalmente da segunda espiga, muitas vezes torna-se muito pequeno, deixando a entender que o aumento da prolificidade não significa crescimento de produtividade de grãos de milho, apesar de ter a sua contribuição.

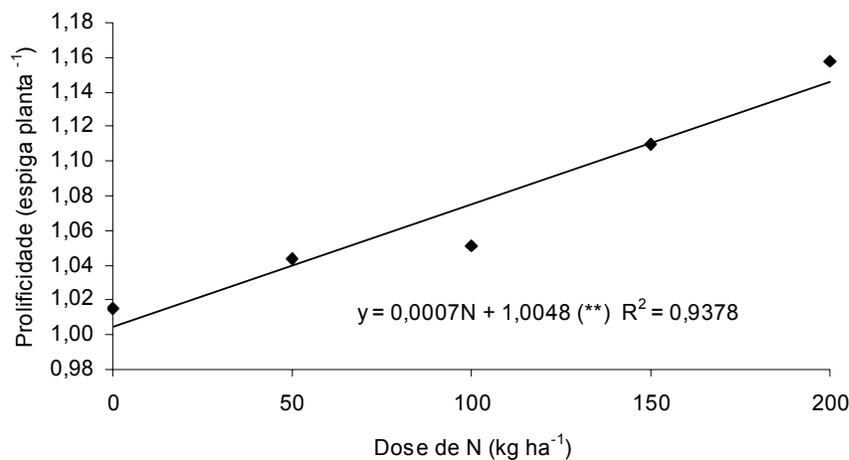


Figura 41 - Prolificidade (espigas por planta⁻¹) determinada em função das diferentes doses de nitrogênio (kg ha⁻¹)

Durieux et al. (1994) verificaram que a formação dessa segunda espiga de milho está relacionada com o aumento das doses de N para genótipos capazes de produzir mais de uma espiga por planta.

Esses resultados estão de acordo com Ferreira (1997), Soares (2003) e Duete (2000) que também observaram um aumento significativo do número de espigas por planta de milho ao efetuar a aplicação de doses crescentes de N.

Ferreira et al. (2001) também encontraram modelo de regressão quadrático com o incremento das doses de N (0, 70, 140 e 210 kg ha⁻¹ de N), obtendo uma dose máxima de N de 166,6 kg ha⁻¹ de N e citam que a formação da segunda espiga, em algumas plantas, contribuiu para o aumento da produtividade.

3 CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, nas condições do experimento, pode-se concluir que:

A) A adubação nitrogenada com até 200 kg ha⁻¹ na cultura do milho (2,5 vezes superior à recomendação para a adubação de N) não afetou a qualidade de água nas descargas dos drenos, diante das condições de coleta dos efluentes, nos poços de observação e nos extratores por nitrato, ficando abaixo das recomendações da legislação brasileira, americana e européia.

B) O índice de estresse ‘soma do excesso de água’ (SEW₃₀) em solos de várzea sob sistema de drenagem subterrânea respondeu de forma linear crescente às produtividades relativas dos grãos de milho (a 13% de teor de água), revelando que as elevações alcançadas pelo lençol freático em função das precipitações pluviais ao longo do ciclo da cultura do milho contribuíram para o aumento da produtividade da cultura.

C) A aplicação de N em doses crescentes proporcionou aumento de forma linear e positiva para os parâmetros referentes de teor de N total: na massa de matéria seca das folhas (no florescimento); na massa de matéria seca da parte aérea do milho (no estágio fenológico farináceo); na massa de matéria seca dos grãos de milho (no estágio fenológico farináceo); na parte aérea das plantas (na época da colheita) e nos grãos (após a colheita).

Houve resposta linear e positiva às doses crescentes de N para os componentes de produtividade de massa de matéria seca de sabugo; número de espigas por hectare; massa de mil grãos (a 13% de teor de água); comprimento médio de espiga de milho; diâmetro médio de espiga e prolificidade.

O índice de área foliar respondeu de forma positiva e linear às doses crescentes de N. O índice de colheita não apresentou diferença estatística entre os tratamentos.

Houve resposta quadrática as doses crescentes de N para altura de plantas e de inserção de espiga de milho; produtividade de grãos (a 13% de teor de água); massa seca da palhada de milho; massa seca de brácteas; número de grãos por espiga de milho e número de grãos por fileira de espiga de milho.

REFERÊNCIAS

- AITA, C.; BASSO, C.J.; CERETA, C.J.; GONÇALVES, C.N.; ROS, C.O. Plantas de cobertura do solo como fonte de nitrogênio ao milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.157-165, 2001.
- ALVES, V.M.C.; VASCONCELLUS, C.A.; FREIRE, F.M.; PITTA, G.V.E.; FRANÇA, G.E.; RODRIGUES FILHO, A.; ARAÚJO, J.M.; VIEIRA, J. R.; LOURENÇO, J.E. Milho. In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V.V.H. (Ed). **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.
- AMADO, T.J.C.; MILNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.26, p.241-248, 2002.
- AMARAL FILHO, J.P.R.; FORNASIERI FILHO, D.; FARINELLI, R.; BARBOSA, J.C. Espaçamento, densidade populacional e adubação nitrogenada na cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas v.29, p.467-473, 2005.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. American Water Works Association and Water Pollution Control Federation. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 14th ed. Washington, 1976. 1193 p.
- ANDRADE Jr. A.S.; CARDOSO, M.J. Otimização da adubação nitrogenada em milho sob irrigação. In: XVIII CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 23., 2000 Uberlândia, **Anais...** Uberlândia: UFU, 2000. 1 CD-ROM.
- ANGHINONI, I.; BAYER, C. Manejo da fertilidade do solo. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; MARINO, J.; CAMARGO, F.A.O. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Gênese, 2004. p.251-263.
- ARAÚJO, L.A.N.; FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. Adubação nitrogenada na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.8, p.771-777, 2004.

ARENAS, M.T.L.; MEJIAS, R.J.; TORRES, F.M. Estimation of the evolution in time of the salts of the soil solution by means of suction cups. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON WATER QUANTITY AND QUALITY ON GREENHOUSE HORTICULTURE, Almeria, 1996. **Proceedings...** Almeria: ICIA, ISHS, SECH, 1996. 1 CD-ROM

BAIRD, C. **Química ambiental**. Trad. RECIO, M. A. L.; CARRERA, M. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002. p. 622.

BAKSH, A.; JAYNES, D.B.; COLVIN, T.S.; KANWAR, R.S. Spatio-temporal analysis of yield variability for a corn-soybean field in Iowa. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 43, n.1, p.31-38, 2000.

BAKSH, A.; KANWAR, R. S.; JAYNES, D.B.; COLVIN, T.S.; AHUJA, L.R. Prediction of $\text{NO}_3\text{-N}$ losses with subsurface drainage water from manured and un-fertilized plots using GLEAMS. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.42, n.1, p.69-77, 2000.

BAKSH, A.; KANWAR, S.R.; JAYNES, B.B.; COLVIN, T.S.; AHUJA, L.R. Simulating effects of variable nitrogen application rates on corn yields and $\text{NO}_3\text{-N}$ losses in subsurface drain water. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph, v.44, n.2, p.269-276, 2001.

BAKSH, A.; KANWAR, R.S.; BAILEY, T.B.; CAMBARDELLA, C.A.; KARLEN, D.L.; COLVIN, T.S. Cropping system effects on $\text{NO}_3\text{-N}$ loss with subsurface drainage water. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.45, n.6, p.1789-1797, 2002.

BARBIN, D. **Planejamento e análise de experimentos agrônomicos**. Arapongas: Midas, 2003. 208 p.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J.G.L.; BARROS, M.T.L.; VERAS JR, M.S.; PORTO, M.F.^a; NUCCI, N.L.R.; JULIANO, N.M.^a; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: Resntice Hall, 2002. p.1-9.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes**. Brasília:SNDA; DNDV; CLAV, 1992. 265 p.

BULL, L.T. Nutrição mineral do milho. In: BULL, L.T.; CANTARELLA, H. **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p.63-145.

CAMARGO, F.A.O.; SÁ, E.L.S. Nitrogênio e adubos nitrogenados. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; MARINO, J.; CAMARGO, F.A.O. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Gênese, 2004. p.93-116.

CANTARELLA, H.; DUARTE, A.P. Manejo da fertilidade do solo para a cultura do milho. In: GALVÃO, J.C.C.; MIRANDA, G.V. **Tecnologias de produção do milho**. Viçosa, UFV. 2004. p.139-182.

CANTARELLA, H.; DUARTE, A.P.; ANDRADE, C.A de. Manejo de nitrogênio e da matéria orgânica em milho no sistema de plantio direto. In: FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Milho: tecnologia & produção**. Piracicaba: ESALQ/USP/LVP, 2005. p.59-82.

CANTARERO, M.G.; CIRILO, A.G.; ANDRADE, F.H. Night temperature at sinking affects kernel set in Maize. **Crop Science**, Madison, v.39, n.3, p.703-710, 1999.

CARDOSO, M.J.; MELO, F.B. Influencia de níveis de nitrogênio na produtividade de grãos de milho. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 23., 1998. Caxambu. **Fertibio 1998: trabalhos...**Lavras: UFLA/SBCS/SBM, 1998. 1 CD-ROM.

CHRISTOFIDIS, D. Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo. **ITEM: irrigação e tecnologia moderna**, Brasília, n.49. 2001. p.8-13.

COELHO, A.M. **Balço de nitrogênio (¹⁵N) na cultura do milho (*Zea mays* L.) em um Latossolo Vermelho-Escuro fase cerrado**. 1987. 142 p. Dissertação (Mestrado em Solo e nutrição de plantas). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.C.; BAHIA, A.F.C.; GUEDES, G.A. Balço de nitrogênio ¹⁵N em Latossolo Vermelho-Escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.95, p.187-193, 1991.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E.; FILHO, A.F.C.B.; GUEDES, G.A.A. Doses e métodos de aplicação de fertilizantes nitrogenados na cultura do milho sob irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p.61-67, 1992.

CORREIA, J.R.; REATTO, A.; SPERA, S.T. Solos e suas relações com o uso e o manejo. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.29-59.

COSTA, C.N.; MEURER, E.J.; BISSANI, C.A.; SELBACH, P. A. Contaminantes e poluentes do solo e do ambiente. In: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 2 ed.. Porto Alegre: Gênese, 2004. p.239-281.

COSTA, F.M.P da.; DOURADO NETO, D.; FANCELLI, A.; BONNECARRERE, R.A.G.; CHRISTOFFOLETI, P.J. Nitrogênio e produtividade de grãos de milho. In: FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Milho: tecnologia & produção**. Piracicaba: ESALQ/USP/LVP, 2005. p.118-128.

COSTA, R.N.T. **Espaçamento econômico de drenos laterais e a dinâmica do lençol freático sobre o rendimento da cultura de milho (*Zea mays*, L.)**. 1994. 88p. Tese (Doutorado. em irrigação e drenagem). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

COUTO, L.; RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P.E.P de. Importância do milho irrigado. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P.E.P.; COUTO, L. **A cultura do milho irrigado**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. 317 p.

DAVIS, D.M.; GOWDA, P.H.; MULLA, D.J.; RANDALL, G.W. Modeling nitrate-nitrogen leaching in response to nitrogen fertilizer rate and tile depth or spacing for southern Minnesota, USA. **Journal Environmental Quality**, Madison, v. 29, n.5, p.1568-1581, 2000.

DICK, W.A.; McCOY, E.L.; EDWARDS, W.M.; LAL, R. Continuous application of no-tillage to Hhio soils. **Agronomy Journal**, Madison, v.83, n.1, p.65-73, 1991.

DONALD, C.M.; HAMBLIN, J. The biological yield and harvest index of cereal as agronomic and plant breeding criterion. **Advances in Agronomy**, Madison, v.28, p.361-405, 1976.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Tradução de GHEYI, H.R.; SOUSA, A.A.; DAMASCENO, F.A.V.; MEDEIROS, J.F. Campina Grande: UFPB, 1994. p.154-159. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

DOURADO NETO, D. **Modelo fitotécnicos referentes à cultura de milho**. Tese (Livre-docência em produção vegetal) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

DUARTE, A.P. **Resposta de cultivares de milho ao nitrogênio no sistema plantio direto e sua influencia na qualidade dos grãos**. 2003. 174 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

DUARTE, S. N. **Modelo para avaliação de desempenho de sistemas de drenagem subterrânea e cálculo de espaçamento de drenos**. Viçosa, MG: UFV, 1997. 143p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1997.

DUARTE, S.N.; VELOSO, M.E.C.; MIRANDA, J.H.; BÉRGAMO, L.R. Calibração e validação de modelo de simulação de desempenho de sistemas de drenagem. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 15, 2005. **Anais...** Teresina: ABID, 2005. 1 CD-ROM.

DUETE, R.R.C. **Estudo de doses, parcelamento e formas de nitrogênio na adubação de milho usando ¹⁵N**. 2000. 152 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

DURIEUX, R.P.; KAMPRATH, E.J.; JACKSON, W.A.; MOLL, R.H. Root distribution for corn: the effect of nitrogen fertilization. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p.958-962. 1994.

DYNIA, J.F.; CAMARGO, O.A. Retenção de nitrato num solo de carga variável, influenciada por adubação fosfatada e calagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.1, p141-144, 1999.

ERNANI, P.R.; SANGOI, S.; RAMPAZZO, C. Lixiviação e imobilização de nitrogênio num nitrossolo com variáveis da forma de aplicação da uréia e da palha de aveia. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Campinas, v.26, p.993-1000, 2002.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360p.

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho em terras baixas**. In: FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. Milho: tecnologia & produção. Piracicaba: ESALQ/USP/LVP, 2005. p.21-33.

FEDDES, R.A. Effects of drainage on crops and farm management. *Agricultural Water Management*, v.14, n.1, p.3-18, 1988.

FERNANDES, F.C.S. **Dinâmica do nitrogênio na cultura do milho (*Zea mays* L.), em cultivo sucessivo com aveia preta (*Avena strigosa*), sob implantação do sistema plantio direto.** 2006. 176 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

FERNANDES, F.C.S.; BUZETTI, S.; ARF, O.; ANDRADE, A.C. Doses, eficiência e uso de nitrogênio por seis cultivares de milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, Sete Lagoas, MG, v.4, n.2, p.195-204, 2005.

FERNANDES, L.A.; FURTINI NETO, A.E.; VASCONCELOS, C.A.; GUEDES, G.A.A. Preparo do solo e adubação nitrogenada na produtividade do milho em Latossolo sob vegetação de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.24, p.247-254, 1998.

FERNANDES, L.A.; VASCONCELOS, C.A.; FURTINI NETO, A.E.; ROSCOE, R.; GUEDES, G.A.A. Preparo do solo e adubação nitrogenada na produção de grãos e matéria seca e acúmulo de nutrientes pelo milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.34, n.9, p.1691-1698, 1999.

FERREIRA, A.C.B. **Efeito da adubação com N, Mo e Zn sobre a produção, qualidade de grãos e concentração de nutrientes no milho.** 1997. 73 p. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.

FERREIRA, A.C.B.; ARAUJO, G.A.A.; PEREIRA, P.R.G.; CARDOSO, A.A. Características agronômicas e nutricionais do milho adubado com nitrogênio, molibdênio e zinco. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v.58, n.1, p.131-138, 2001.

FNP CONSULTORIA & COMÉRCIO. **Agrianual. 2005:** Anuário da agricultura brasileira. São Paulo, 2005. p.412-427.

FRANÇA, G.E.; RESENDE, M. Manejo de corretivos e fertilizantes em agricultura irrigada. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P.E.P.; COUTO, L. **A cultura do milho irrigado.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. p.107-125.

GADIOLI, J.L. **Estimativa de rendimento de grãos e caracterização fitotécnica da cultura de milho (*Zea mays* L.)**. 1999. 86 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba 1999.

GAVA, G.J.C. **Compartimentalização do nitrogênio no sistema solo-planta na implantação da semeadura direta no ciclo da cultura do milho**. 2003. 125 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

GILLIAM, J.W.; BAKER, J.L.; REDDY, K.R. Water quality effects of drainage in humid regions. American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. USA, Madison. In: **Agricultural Drainage**, 1999. (Agronomy monograph n. 38) p. 801-830.

GILLIAM, J.W.; SKAGGS, R.W. Controlled agricultural drainage to maintain water quality. **Journal of the Irrigation and Drainage**, New York , v.112, p.254-263, 1986.

GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. 14 ed. São Paulo, Nobel, 2002. p.477.

GOMES, F.P.; GARCIA, C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplo e orientação para uso de aplicativos**. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309p. (Biblioteca de Ciências Agrárias Luiz de Queiroz; 11).

GUITJENS, J.C.; AYARS, J.E.; GRISMER, M.E.; WILLARDSON, L.S. Drainage design for Water Quality Management: Overview. **Journal of the Irrigation and Drainage**, New York ASCE, v.123, n.3, p.148-153, 1997.

HARDJOAMIDJOJO, S.; SKAGGS, R.W.; SCHWAB, B.O. Corn yield response to excessive soil water conditions. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.25,n.4, p. 922-927, 934, 1982.

IBRIKCI, H.; ULGER, A.C.; CAKIR, B.; BOYUR, G.; GUZEL, N. Modeling approach to nitrogen uptake by field-grown corn. **Journal of Plant Nutrition**, New York,v.21, n.9, p.1943-1954, 1998.

ICID. **Country Profile**: Canadá. 2001. Available at: http://www.icid.org/cp_canada.html#cp.

JAKELAITIS, A.; SILVA, A.A.; FERREIRA, L.R. Efeitos do nitrogênio sobre o milho cultivado em consórcio com *Brachiaria brizantha*. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, PR, v.27, n.1, p.39-46, 2005.

JAYNES, D.B.; COLVIN, T.S. Nitrate losses in tile drainage from mid-season N-fertilizer. In: ANNUAL INTERNATIONAL MEETING 2005. Tampa, FL. **Meeting...** TAMPA: ASAE, 2005. 1 CD-ROM.

JAYNES, D.B.; KASPAR, T.C.; MOORMAN, T.B.; PARKIN, T.B. Potential methods for reducing nitrate losses in artificially drained fields. In: COOKE, R. A. **Drainage VIII**, In: INTERNATIONAL DRAINAGE SYMPOSIUM, 8., 2004. Sacramento. **Proceedings...**, Sacramento: American Society of Agricultural Engineers.

KANWAR, R.S.; BAKER, J.L.; JUKHTAR, S. Excessive soil water effects at various stages of development on the growth and yield of corn. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.31,n,1, p. 133 – 141, 1988.

KANWAR, R.S.; BJORNEBERG, D.; BAKER,D. An automated system for monitoring the quality and quantity of subsurface drain flow. **Journal of agricultural engineering research**, New York, v.73, n.2, p.123-129. 1999.

KANWAR, R.S.; COLVIN, T.S.; KARLEN, D.L. Ridge, moldboard, chisel, and no-till effects on subsurface drainage water quality beneath two cropping system. **Journal of production agriculture**, Madison, v.10, n.2, 1997. p.227-234.

LAHÓZ, F.C.C. **Recomendações para planejamento e implantação de um sistema de drenagem experimental**. 1994. 139p. Tese (Mestrado em Irrigação e drenagem) – Escola de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

LAMSTER, E.C. Programa nacional de aproveitamento racional de várzeas – Provárzeas. **Informe Agropecuária**, Belo Horizonte, v.6, n.65, p.3-8, 1980.

LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNODÔRF, G.H.; MOTTA, S.A. Volatilização de N-NH₃ na cultura do milho: II Avaliação de fontes sólidas e fluidas em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.481-487, 1997.

LAWLOR, P.A.; HELMERS, M.J.; BAKER, J.L.; MELVIN, S.W.; LEMKE, D.W. Nitrogen application rate effects on corn yield and nitrate-nitrogen concentration and loss in subsurface drainage. In: **ASAE Annual International Meeting**, 2005. Florida. 17-20 July 2005. Paper... Florida: ASAE, 2005. 1 CD-ROM.

LIANG, B.C.; MACKENZIE, A.F. Corn yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency as influenced by nitrogen fertilization. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.74, p.235-240, 1994.

LIMA, M.G. Calibração e validação do modelo Ceres-maize em condições tropicais do Brasil. 1995. 119 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

LOBATO, E.; SOUSA, D.M.G. Fertilidade do solo e máxima eficiência produtiva. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.257-282.

MADRAMOOTOO, C.A.; HELWIG, T.G.; DODDS, G.T. Managing water tables to improve drainage water quality in Quebec, Canada. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph, v.44, n.6, 2001. p.1511-1519.

MADRAMOOTOO, C.A.; WIYO, C.A.W.; ENRIGHT, P. Nutrient losses through tile drains from two potato fields. **Applied engineering in agriculture**. St. Joseph, v.8, n.5, p.639-646, 1992.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319.p.

MAR, G.D.; MARCHETTI, M.E.; SOUZA, L.C.F.; GONÇALVES, M.C.; NOVELINO, J.O. Produção do milho safrinha em função de doses e épocas de aplicação de nitrogênio. **Bragantia**, Campina, v.62, n.2, p.267-274, 2003.

MEURER, E. J.; RHENHEIMER, D.; BISSANI, C.A . Fenômenos de sorção em solos. In: MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. 2. ed. Porto Alegre: Gênese, 2004. p.131-179.

MILBURN, P.; RICHARDS, J.E.; GARTLEY, C. Nitrate leaching from systematically tiled potato fields in New Brunswick, Canada. **Journal Environmental Quality**. Madison, v.19, n.3, p.448-454. 1990

MILLER, P.S.; MITCHELL, J.K.; COOKE, R.A.; ENGEL, B.A. A wetland to improve agricultural subsurface drainage water quality. **Transactions of the ASAE**, St Joseph, v.45, n.5, p.1305-1317, 2000.

MIRANDA, J.H. **Modelo para simulação da dinâmica da água em sistemas de drenagem subterrânea e cálculo do espaçamento econômico entre drenos**. 1997, 89 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e drenagem). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1997

MITCHELL, J.K.; McISAAC, G.F.; WALKER, S.E.; HIRSCHI, M.C. Nitrate in river and subsurface drainage flows from an east central Illinois Watershed. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 43, n.2, p.337-342, 2000.

MOHAMED, T.E.; DUDA, A.M. Future perspectives on agriculture drainage. In: **Agricultural Drainage**,. 1999. p.1285-1299. (agronomy monograph,38)

MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.7, p.95-102, 1983.

NANGIA, V.; GOWDA, P.H.; MULLA, D.J.; SANDS, G.R. Modeling nitrate-nitrogen losses in response to tile drain depth and spacing in a cold climate. In: ANNUAL INTERNATIONAL MEETING 2005. Tampa, FL. **meeting...** TAMPA: ASAE, 2005. 1CD ROM.

NEVES, M.C.; RUMJANECK, N.G. Bioquímica e fisiologia da fixação de nitrogênio. In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. **Microbiologia do solo**. Campinas: SBCS, 1992. p.141-155.

OLIVEIRA, J.R.A.; VILELA, L.; AYARZA, M.A. Adsorção de nitrato em solos de cerrado do Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.6, p1199-1205, jun. 2000.

OLIVEIRA, R.H. de. **Produção e teores de nitrogênio no solo e no milho “safrinha” irrigado em resposta a doses de nitrogênio, de composto orgânico e de molibdênio**.1998. 128p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa,1998.

OLIVEIRA, S.A. Análise foliar. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2 ed., Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416 p (245-256).

OTEGUI, M.E.; NICOLINI, M.G.; RUIZ, R.A.; DODDS, P.A. Sowing date effects on grain yield components of different maize genotypes. **Agronomy Journal**, Madison, v.87, n.1, p.29-33, 1995.

PANG, X.; GUPTA, S.C.; MONCRIEF, J.F.; ROSEN, C.J.; CHENG, H. H. Evaluation of nitrate leaching potential in Minnesota glacial outwash soils using the CERES-Mais model. **Journal Environmental Quality**, St Joseph. v.27, n.1, p.75-85, 1998.

PAULETTO, E.A.; GOMES, A. da S.; SOUSA, R.O.; PETRIN, J.A. Manejo de solos de várzeas. In: GOMES, A. da S.; PAULETTO, E.A. (Ed). **Manejo de solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p.61-87.

PEREIRA FILHO, I.A.; CRUZ, J.C. Produção de milho em sistema irrigado. In: RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P.E.P.; COUTO, L. **A cultura do milho irrigado**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. p.205-238.

PINTO, L.F.S.; PAULETTO, E.A.; GOMES, A. da S.; SOUSA, R.O. Caracterização de solos de várzea. In: GOMES, A. da S.; PAULETTO, E.A. (Ed). **Manejo de solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p.11-36.

POOLE, C.A.; SKAGGS, R.W.; CHESCHEIR, G.M.; GILLIAM, J.W.; BURCHELL II, M.R. The effect of shallow subsurface drains on nitrate-N and phosphorus losses from drained agricultural lands. **ASAE Annual International Meeting**. 2005, Florida. **Meeting...** Florida: ASAE, 2005. CD ROM.

POTTKER, D.; ROMAN, E.S. Efeito de resíduos de culturas e do pousio de inverno sobre a resposta do milho a nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.5, p.763-770, 1994.

RANDALL, G.W. Implications of dry and wet cycles on nitrate loss to subsurface tile drainage. In: **DRAINAGE IN THE 21ST CENTURY: food production and environment. ANNUAL DRAINAGE SYMPOSIUM**. Orlando, Fla. 8-19 March. St. Joseph: **ASAE**, 1998. p.53-60.

RESENDE, M; ALBUQUERQUE, P.E.P de; COUTO, L. Manejo de irrigação. In: RESENDE, M; ALBUQUERQUE, P.E.P; COUTO, L., coordenad. **A cultura do milho irrigado**. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2003. 266-301p.

SÁ, J.C.M. **Manejo de nitrogênio na cultura de milho no sistema plantio direto**. Passo Fundo: Aldeia Norte, 1996. 23p.

SANGOI, L.; ALMEIDA, M.L. de. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio para a cultura do milho num solo com alto teor de matéria orgânica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.1, p.13-24, 1994.

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 dois solos com texturas contrastantes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n.1, jan-fev, p.65-70, 2003.

SANTANA, D.P.; COUTO, L.; BRITO, R.A.L. Agricultura irrigada e sustentabilidade agrícola. In: RESENDES, M.; PAULO, E.P.; ALBUQUERQUE, L.C. **A cultura do milho irrigado**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. p.32-41.

SCIVITTARO, W.B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E.; TRIVELIN, P.C.O. Utilização de nitrogênio de adubos verdes e mineral pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.24, p.917-926, 2000.

SENTELHAS, P.C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática**. 1998. 97p. Tese (Doutorado em Irrigação e drenagem)- Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

SILVA, E.C. **Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (¹⁵N) da uréia, do milho e da crotalária pelo milho sob semeadura direta em solo de cerrado**. Piracicaba, 2005. 111p. Tese (Doutorado)- Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 2005.

SILVA, E.C.; BUZETTI, S.; GUIMARÃES, G.L.; LAZARINI, E.; SÁ, M.E. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Campinas, v.29, p.353-362, 2005.

SILVA, E.C.; FERREIRA, S.M.; SILVA, G.P.; ASSIS, R.L.; GUIMARÃES, G.L. Épocas e formas de aplicação de nitrogênio no milho sob plantio direto em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.29, p.725-733, 2005.

SILVA, E.F.F. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade na cultura do pimentão utilizando extratores de solução do solo**. 2002. Tese (Doutorado em Irrigação e drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SILVA, L.S.; CAMARGO, F.A. de O.; CARETTA, C.A. . Composição da fase sólida orgânica do solo. In: MEURER, E.J. **Fundamentos de química do solo**. 2 ed.). Porto Alegre: Gênese, 2004. p.73-99.

SILVA, P.S.L.; FILHO, E.T.D.; GRANJEIRO, L.C.; DUARTE, S.R. Efeito de níveis de nitrogênio e da aplicação de deltametrina sobre os rendimentos de espigas verdes e de grãos de milho. **Revista Ceres**, Ciçosa, v.47, n.269, p.75-87, 2000.

SINGH, P.; KANWAR, R.S. Preferential solute transport through macropores in large in undisturbed soil columns. **Journal Environmental Quality**, St Joseph,v.20, n.1, p.295-300, 1991.

SKAGGS, R.W.; BREVE, M.A.; WILLIAM, J.W. Hydrologic and water quality impacts of agricultural drainage. **Environmental Science & Technology** , Easton v.24, n.1, p.1-34, 1994.

SKAGGS, R.W. DRAINMOD – **Reference report**: methods for design and evaluation of drainage-water management systems for soils with high water tables. Releigh: USDA-SCS, 1981. 329 p.

SMEDEMA, L.K. Water table control indices for drainage of agricultural land in humid climates. **Agricultural Water Management**, Amsterdam,v. 14, n.1, p.69-77, 1988.

SMELTZ, H.L.; EVANS, R.O.; OSMOND, D.L.; JENNINGS, G.D. Nitrate reduction through controlled drainage & nutrient management plans. In: ANNUAL INTERNATIONAL MEETING 2005. Tampa, FL., **meeting TAMPA**: ASAE, 2005. 1CD ROM.

SMITH, S.J.; CASSEL, D.K. Estimate nitrate leaching in soil materials. In: **Managing nitrogen for groundwater quality and farm profitability**. Madison, Wisc.: SSSA, , 1991. p.165-188.

SOARES, M.A. **Influência de nitrogênio, zinco e boro e de suas respectivas interações no desempenho da cultura do milho**. 2003..92 p Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba,2003.

SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. Adubação com nitrogênio. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.129-145.

SOUZA, L.C.F.; GONÇALVES, M.C.; SOBRINHO, T.A.; FEDATTO, E.; ZANON, G.D.; HASEGAWA, E.K.B. Culturas antecessoras e adubação nitrogenada na produtividade de milho em plantio direto irrigado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.2, p.55-62, 2003.

SPITZ, K.; MORENO, J. **A practical guide to groundwater an solute transport modeling**. New York: John Willey & Sons, Inc. 1996. 461 p.

TEDESCO, M.J.; LEVIEN, R. Adubação foliar e hidroponia. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; MARINO, J.; CAMARGO, F.A.O. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre: Gênese, 2004. p.195-206.

TIMMONS, D.R.; BAKER, J.K. Fertilizer management effect on recovery of labeled nitrogen by continuous no-till. **Agronomy Journal**, Madison, v.84, p.490-496, 1992.

TRAN, T.S.; GIROUX, M.; CESCAS, M.P. Utilisation de l'engrais azoté marqué au ¹⁵N par le maïs selon les modes d'application et les doses d'azote. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.77, p.9-19, 1977.

TURNDISI, J.G. **Água no Século XXI: Enfrentando a Escassez**. São Carlos: Rima IIE, 2003. 248 p.

VAHL, L.C. Fertilidade de solos de várzea. In: GOMES, A. da S.; PAULETTO, E.A. (Ed). **Manejo de solo e da água em áreas de várzea**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999. p.119-162.

van RAIJ, B.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2 ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1997. 285 p. (Boletim técnico, 100).

VANLOON, G.W.; DUFFY, S.J. **Environmental chemistry – a global perspective**. New York: Oxford University Press, 2000. p.337-347.

VARGAS, M.A.T.; MENDES, I.C.; CARVALHO, A.M.; LOBO-BURLE, M.; HUNGRIA, M. Inoculação de leguminosas e manejo de adubos verdes. In: SOUSA, D.M.G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p.97-127.

VICTÓRIA, R.L.; PICCOLO, M.C.; VARGAS, A.A.T. O ciclo do nitrogênio. In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. **Microbiologia do solo**. Campinas: SBCS, 1992. p.105-119.

VILAS BÔAS, R.L. **Alternativas para aumento da recuperação do nitrogênio da uréia pelo milho (*Zea mays* L.)**. 1990. 78 p. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura). Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

VILAS BÔAS, R.L. **Recuperação do nitrogênio da uréia pelo milho: efeito da mistura com sulfato de amônio, da dose e do modo de aplicação**, 1995. 128 p. Tese (Doutorado Energia Nuclear na Agricultura). Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

VITTI, G.C.; FAVARIN, J.L.; REZENDE, L.O.; TREVISAN, N. **Manejo de nitrogênio em diversos sistemas de produção**. Piracicaba: SERRANA, 1999. 36p.

WALKER, S.E.; MITCHELL, J.K.; HIRSCHI, M.C.; JOHNSEN, K.E. Sensitivity analysis of the root zone water quality model. **Transactions of the ASAE**. St. Joseph, v.43, n.4, p.841-846, 2000.

YAMADA, T. **Adubação nitrogenada do milho: quando, como e quando aplicar**. Piracicaba: POTAFOS, 1996. 5p. (Informações Agronômicas, 74)

ZHU, Y.; FOX, R.H. Corn-soybean rotation effects on nitrate leaching. **Agron. J.** v.95, p.1028-1033, 2003.