

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA
FILHO” FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E
VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ADUBAÇÃO NITROGENADA EM CULTIVOS SUCESSIVOS
DE MILHO E SOJA, SOB IRRIGAÇÃO.**

**Luiz Alberto Navarro de Araujo
Engenheiro Agrônomo**

**Tese para obtenção do Título de
Doutor em Agronomia**

**JABOTICABAL (SP)
2003**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA
FILHO” FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E
VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ADUBAÇÃO NITROGENADA EM CULTIVOS SUCESSIVOS DE
MILHO E SOJA SOB IRRIGAÇÃO**

LUIZ ALBERTO NAVARRO DE ARAÚJO

Orientador: Prof. Dr. MANOEL EVARISTO FERREIRA

**Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como
parte das exigências para a obtenção do título de
Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).**

**JABOTICABAL – SÃO PAULO - BRASIL
Outubro de 2003**

COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. MANOEL EVARISTO FERREIRA

Dr. BERNARDO VAN RAIJ

Dr. ANTONIO LUIZ FANCELLI

Dr. DILERMANDO PERECIN

Dr. LUIZ CARLOS PAVANI

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Luiz Alberto Navarro de Araujo – nascido aos 27 dias de julho de 1950, em São Paulo, (SP), é Engenheiro Agrônomo formado pela Faculdade de Agronomia e Zootecnia "Manoel Carlos Gonçalves", em Espírito Santo do Pinhal (SP), em 1975. Trabalhou na iniciativa privada de 1976 a 1981. De maio a outubro de 1981 assistiu a cursos de Agribusiness Economics na Southern Illinois University, em Carbondale – Illinois - USA. Trabalhou em assessoria e consultoria agrícola, na Agro Consultec Ltda, no período de 1989 a 1994. Desenvolveu projetos de implantação e comercialização de calcário agrícola para Cimentos Ipanema, em Sorocaba - SP e Cimentos Boyaca S.A., em Bogotá - Colômbia. Obteve o grau de Mestre em Agronomia, na área de Produção Vegetal, pela Universidade Estadual Paulista UNESP - Jaboticabal, em 1997 (Dissertação – Adubação nitrogenada e potássica em cultura de milho para alta produtividade). Obteve o grau de Mestre em Engenharia de Segurança do Trabalho, na área de Acústica Ambiental, pelo Centro Universitário Moura Lacerda – Ribeirão Preto, em 1998 (Monografia – Influência do ruído de máquinas agrícolas em trabalhadores rurais). Obteve o grau de Doutor na área de Produção Vegetal, pela Universidade Estadual Paulista UNESP - Jaboticabal, em 2003 (Tese - Adubação nitrogenada em cultivos sucessivos de milho e soja sob irrigação). É autor e co-autor de diversos artigos científicos.

À minha esposa, amiga e companheira,
Margarida Leite Fabrino

por seu estímulo,
compreensão e,
carinho em todos os momentos.

Dedico e Ofereço

AGRADECIMENTOS

Na impossibilidade de mencionar todos quantos de forma desinteressada me prestaram algum tipo de ajuda, apresento de forma impessoal o meu apreço e devido reconhecimento a todos aqueles que, de uma forma ou de outra, contribuíram com o seu saber, dedicação, informação e trabalho. No entanto, cabe-me destacar, dessa lista, pessoas que foram decisivas nos momentos críticos e me ajudaram a superá-los.

Os meus melhores agradecimentos ao Professor Doutor Manoel Evaristo Ferreira a quem, na qualidade de Orientador e amigo, quero prestar o meu devido reconhecimento e manifestar aqui o meu grande apreço pela sua prestimosa contribuição, pela sua disponibilidade sempre manifestada e pelas linhas de orientação que foram de um grande mestre e me facilitaram na elaboração deste modesto trabalho.

Ao Professor Doutor Luiz Carlos Pavani, pelas infindáveis trocas de opinião, pelo incentivo e apoio dado desde o início para a abordagem do tema aqui tratado, o meu muito obrigado.

Ao Professor Doutor Dilermando Perecin, pela forma sempre pronta de colaboração e pelos conselhos úteis para algumas das reflexões aqui expressa, os meus agradecimentos e sentida amizade.

À Doutora Professora Mara Cristina Pessoa da Cruz, o meu reconhecido agradecimento pelos conselhos oportunos que, em tempo, e de forma positiva, contribuíram para elaborar esta Tese.

A todos os “sócios” da Biblioteca, que muito contribuíram, de forma positiva, para o conteúdo desta investigação, sinceros e reconhecidos agradecimentos.

Somos gratos à FCAV, pela oportunidade de realizar este trabalho, e à FAPESP, pelo suporte financeiro e a Tigre S.A. pelo material fornecido.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	09
SUMMARY	10
I. INTRODUÇÃO	11
II. REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1 Nitrogênio no solo.....	13
2.2 Nitrogênio na planta.....	21
2.3 Adubação nitrogenada.....	29
2.3.1 Efeito da rotação de culturas.....	29
2.3.2 Resposta à adubação.....	31
III. MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1 Local, características e solo da área do experimento.....	36
3.2 Demarcação da área do experimento.....	37
3.3 Implantação do sistema de drenagem na área do experimento..	37
3.4 Caracterização química da área do experimento.....	39
3.5 Cultura para o estabelecimento do sistema de rotação.....	40
3.6 Estabelecimento, condução e colheita do ensaio.....	40
3.6.1 Delineamento experimental.....	40
3.6.2 Amostragem de solo.....	41
3.6.3 Semeadura.....	41
3.6.4 Tratos culturais.....	42
3.6.5 Manejo da água.....	43
3.6.6 Adubação nitrogenada em cobertura.....	44
3.6.7 Amostragens de água, planta e solo.....	45
3.6.7.1 Água.....	45
3.6.7.2 Planta.....	45
3.6.7.3 Solo.....	45
3.6.8 Colheita.....	46
3.7 Avaliações.....	46

3.7.1 Concentração de N na água coletada.....	46
3.7.2 Planta.....	46
3.7.2.1 Clorofila.....	46
3.7.2.2 Área e índice de área foliar.....	47
3.7.2.3 Nitrogênio total.....	47
3.7.3 Recuperação aparente do N aplicado como fertilizante.....	48
3.7.4 Estimativa de perda de nitrato por lixiviação.....	48
3.8 Análise estatística.....	48
IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
4.1 Produção de milho e extração de nitrogênio.....	48
4.2 Indicadores da planta e suas relações com a produção.....	55
4.3 Precipitação, drenagem e lixiviação de nitrato.....	60
V. CONCLUSÕES.....	63
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64

LISTA DE TABELAS E FIGURAS

Tabelas	Página
1. Análise química do solo da área do experimento.....	39
2. Esquema de análise de variância.....	41
3. Parcelamento, épocas e doses das aplicações de nitrogênio.....	44
4. Produção de massa seca da parte aérea e de grãos, extração e concentração de nitrogênio pela cultura.....	50
5. Teores de matéria orgânica, amônio e nitrato no solo na colheita e semeadura do experimento.....	53
6. Dados meteorológicos da região e da área do experimento.....	54
7. Teores de N, concentração relativa de clorofila, índice de área foliar e de suficiência em função da dose e sistema de rotação.....	56
8. Coeficientes de determinação da regressão: Produção em função	59

dos indicadores de planta, valores de F e níveis de significância....	
9. Volumes de chuva, água de irrigação e água drenada, estimativa e concentração de perda de nitrato.....	60

Figuras

1. Produção mundial de milho.....	11
2. Produtividade de grãos de milho	12
3. Representação esquemática do posicionamento das parcelas e subparcelas e do sistema de drenagem, na área do experimento..	37
4. Esquema funcional do tubo-dreno usado para a coleta da água gravitacional do solo.....	38
5. Aumento na produção de grãos e de matéria seca.....	49
6. Produção de grãos de milho em função das doses de N aplicadas	51
7. Teores de matéria orgânica e nitrato na semeadura.....	52
8. Produção de grãos de milho em função dos teores de N e concentração relativa de clorofila na folha 8.....	57
9. Produção de grãos de milho em função dos teores de N e concentração relativa de clorofila na folha 12.....	58
10. Produção de grãos de milho em função do índice de área foliar....	59
11. Variação sazonal do volume drenado e estimativa de perda de N	62

ADUBAÇÃO NITROGENADA EM CULTIVOS SUCESSIVOS DE MILHO E SOJA, SOB IRRIGAÇÃO.

RESUMO - Em geral, fontes naturais de N não são adequadas para as altas produções onde os rendimentos são freqüentemente limitados pelo suprimento de N. O uso eficiente de N na produção de milho (*Zea mays* L.) é importante para aumentar o retorno econômico e minimizar o impacto ambiental na qualidade de água. Os objetivos da pesquisa foram determinar o efeito da adubação nitrogenada; identificar medidas de planta que se correlacionam com o rendimento e, avaliar as variações sazonais da concentração de N-NO₃ no perfil do solo, nas amostras da solução do solo e a lixiviação do nitrato na rotação de cultura sob irrigação. O experimento foi conduzido em Latossolo Vermelho Escuro, em Morro Agudo (SP). O delineamento foi em blocos ao acaso com parcelas subdivididas e quatro repetições. Os tratamentos nas parcelas consistiram de doses de N (0; 60; 120; 180 e 240 kg ha⁻¹) como uréia, aplicadas em cobertura e, nas subparcelas rotações. A concentração de N nas folhas foi monitorada por análise química e a concentração relativa de clorofila, utilizando um clorofilômetro, iniciando no estágio V4. A água drenada e a concentração de NO₃⁻ nela contida foram avaliadas. As doses de N aumentaram a produção, mas a rotação não. O maior rendimento de grãos foi de 11.203 kg ha⁻¹, produzidos com 240 kg ha⁻¹ de N. O índice de área foliar, a concentração de N e a leitura da clorofila, nos estádios VT, V8 e V12 respectivamente foram os melhores indicadores de resposta ao N. A redução nos teores de N-NO₃ no solo, e a estimativa do nitrato lixiviado no período (165 kg ha⁻¹ de N), indicaram o potencial de perda e de contaminação ambiental.

Palavras-chave: fertilizante nitrogenado, nitrato, rotação milho-soja, *Zea mays* nitrato.

NITROGEN FERTILIZATION WITH SUCCESSIVE CORN AND SOYBEAN CULTIVATIONS UNDER IRRIGATION

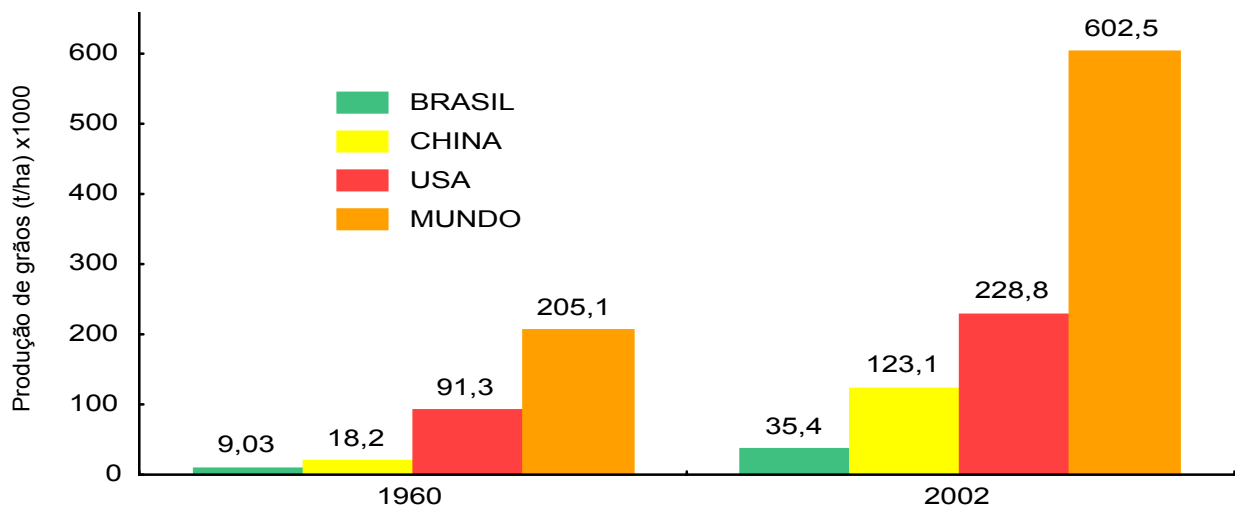
SUMMARY - In general, natural sources of N are not adequate for optimum crop production where yields often are limited by the supply of N. Efficient use of N fertilizer for corn (*Zea mays* L.) production is important to increase economic return and to minimize the impact on water quality. This research was conducted to determine the effect of N fertilization to identify plant measurements that correlated with yield, and to evaluate the seasonal variations in $\text{NO}_3\text{-N}$ concentrations in the soil profile, soil solutions samples and the N leaching of an irrigated corn-soybean rotation. A field experiment was conducted on a dark red latosol in Morro Agudo (SP), using a complete split-plot randomized block design with N rates as the main plots and the rotations cropping systems in split-plots. Fertilizer treatments consisted of a control, and N (60, 120, 180 and 240 kg ha^{-1}) was applied as urea in split applications. During this period N status was monitored using chlorophyll meter and plant analysis, starting at the V4 growth stage. Water flow and NO_3^- concentrations were measure. The N application increased corn yields, but crop rotation did not. The highest corn yield was $11.203 \text{ kg ha}^{-1}$, produced with 240 kg ha^{-1} of N. At the VT, V8 and V12 leaf stage of maize the use of the leaf area indice, N concentration and chlorophyll meter should result in better prediction of whether maize would respond to N fertilizer. The nitrate-N losses to subsurface drainflow (165 kg ha^{-1} of N) and the decrease in residual $\text{NO}_3\text{-N}$ indicated a potential for greater environmental contamination by nitrate.

Keywords: nitrogen-fertilizer, nitrate, corn-soybean rotation, *Zea mays*

I. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta grande potencial de crescimento na produção de milho, pois dispõe de clima favorável, disponibilidade de água para irrigação e grande extensão de áreas agricultáveis. Atualmente, são cultivados com milho 13 milhões de hectares, principalmente em áreas sob vegetação de cerrado, que ocupam cerca de 20% da área agricultável do País. Pelas suas características, o cerrado brasileiro tem apresentado desenvolvimento agrícola acelerado nos últimos anos, elevando significativamente sua participação na produção de alimentos e matérias-primas (KER et al., 1992).

A produção mundial de milho está em torno de 597 milhões de toneladas, sendo que 241 milhões provêm dos Estados Unidos, maior produtor, seguido pela China, com 114 milhões, e pelo Brasil, terceiro maior produtor, com 35 milhões de toneladas (FAS, 2003).



No entanto, a produtividade média de milho no País (2.960 kg ha^{-1}) é inferior a média mundial (4.340 kg ha^{-1}), e baixa quando comparada com a da China (4.700 kg ha^{-1}) e com a dos Estados Unidos (8.670 kg ha^{-1}).

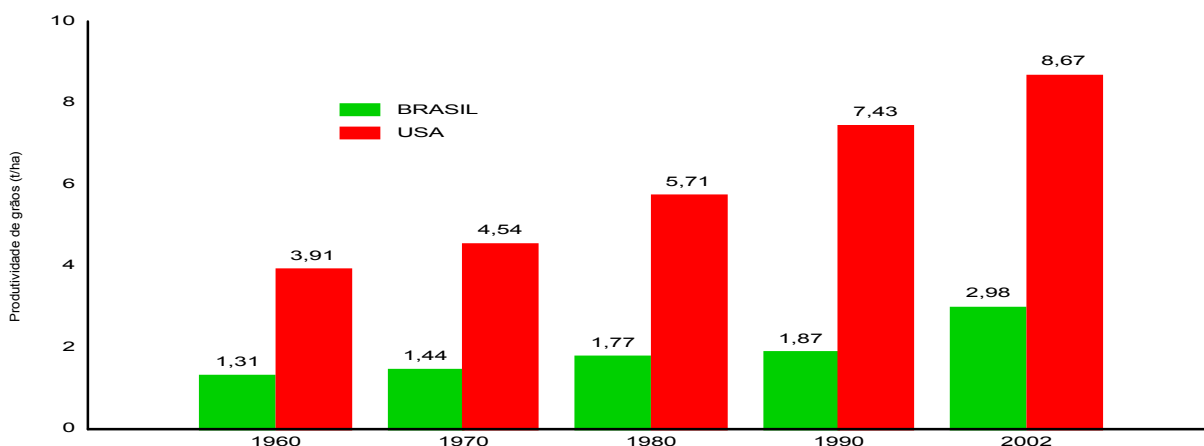


Figura 2. Produtividade de grãos de milho (toneladas por hectare).

Dentre os fatores apontados como causa da baixa produtividade da cultura do milho, tem-se o suprimento do nitrogênio (LEMAIRE & GASTAL, 1997) e o manejo utilizado (TEIXEIRA et al., 1994). Enquanto no Brasil a quantidade utilizada de N é, em média, de 60 kg ha^{-1} , na China, é de 130 kg ha^{-1} e, nos Estados Unidos, de 150 kg ha^{-1} (IFA, 2001).

Os benefícios, na fertilidade do solo, decorrentes do cultivo de uma leguminosa em rotação com um cereal são conhecidos. Atualmente, o sistema mais utilizado nos Estados Unidos, no cinturão do milho, é a rotação com a soja. Estudos mostraram que as exigências em fertilizante nitrogenado, para rendimentos economicamente ótimos, são menores para o milho plantado após uma cultura de soja do que quando plantado após uma cultura de milho (PETERSON & VARVEL, 1989; AITA et al., 1994).

Uma vez que a fertilização nitrogenada é um dos principais fatores para a produção sustentada em solos dos trópicos, as recomendações para o uso eficiente devem incluir doses e práticas de manejo que maximizem a eficiência de uso do adubo nitrogenado e o controle do risco deste nutriente ao meio ambiente, o que requer estudos com vistas ao aprimoramento de técnicas que permitam uma recomendação da adubação nitrogenada mais adequada.

No Brasil, de acordo com os dados da Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (Abimaq), apresentados por ROTA (2001), a área irrigada é

de aproximadamente 3 milhões de hectares. Uma estimativa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1996) revela que o método de irrigação que atende maior área é o de aspersão, com predominância de pivô central. No entanto, são poucos os trabalhos com a cultura de milho que relacionam a adubação nitrogenada e a rotação de culturas na presença da irrigação, principalmente aqueles que associam a concentração de N, sua variabilidade no espaço e estimativas quantitativas de fluxos de nitrato sob condições de campo e quando administradas diretamente pelo agricultor.

O presente trabalho teve como objetivos determinar a curva de resposta da cultura de milho irrigada à adubação nitrogenada; avaliar os efeitos do sistema de rotação de cultura milho-milho-milho e milho-soja-milho na produção de milho; avaliar indicadores da planta como ferramentas auxiliares na decisão quanto ao momento para adubação nitrogenada em cobertura, e avaliar a variabilidade do nitrato em área de agricultura intensiva.

II. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Nitrogênio no solo

O nitrogênio ocorre nos solos principalmente em combinações orgânicas; contudo, são as formas inorgânicas as disponíveis para os vegetais, e elas são representadas pelos íons NH_4^+ (amônio) e NO_3^- (nitrato). Cita RAIJ (1983) que dois processos, denominados de forma genérica de mineralização e imobilização, afetam o nitrogênio disponível do solo. A mineralização consiste na transformação do nitrogênio orgânico em formas minerais, enquanto a imobilização consiste na passagem do nitrogênio mineral para formas orgânicas.

Do ponto de vista da fertilidade do solo, segundo FERREIRA & CRUZ (1997), o primeiro processo é o que mais interessa, pois é o nitrogênio orgânico do solo (contido na matéria orgânica) uma das principais fontes de nitrogênio para as plantas, embora estas só absorvam a forma mineral. Cabe ressaltar que, segundo MAHMOUDJAFARI et al. (1997), a mineralização do nitrogênio é dependente da constante de mineralização,

que, por sua vez, é função da umidade e temperatura, motivo pelo qual, segundo os autores, a mineralização do N pode variar independentemente do conteúdo da matéria orgânica no solo.

Como a produção é função do N disponível para as plantas, e o elemento não se acumula em formas prontamente disponíveis no solo, há necessidade da manutenção de adequados níveis de N na zona radicular das plantas. Entretanto, quando o N no solo aumenta, aumenta também a quantidade de NO_3^- acumulado no perfil do solo e, portanto, a quantidade de N sujeito à lixiviação pela irrigação ou precipitações excessivas (DELGADO et al., 1998). Para Bartholomew (1971), citado por BASSOI & REICHARDT (1995), este tem sido o principal processo de perda do nitrogênio no solo. Para os autores, o fator isolado mais importante na absorção e uso de N pelas plantas em condições de campo parece ser a água do solo, sendo difícil interpretar resultados de pesquisas de utilização desse macronutriente sem que se considere e compreenda a dinâmica da água.

Altas concentrações de nitrato no solo e no lençol freático podem ser encontradas em regiões de intensivo uso do solo. SCHEPERS et al. (1991) em Nebraska, avaliaram a contaminação da água superficial por nitrato, em áreas de produção de milho irrigado, em aproximadamente 3.900 propriedades rurais. Os autores observaram que a contaminação da água superficial estava diretamente ligada à expectativa de produção e à quantidade aplicada de N. A concentração de N-NO_3^- na água percolada foi relacionada ao N residual do solo na camada de 0 a 0,9 m de profundidade, refletindo as práticas de manejo. Os dados mostraram que, quando a expectativa de produção foi de 9% acima da produtividade de grãos de milho média da região ($10.000 \text{ kg ha}^{-1}$), foram utilizados 20 kg ha^{-1} de N a mais do que o recomendado. Quando a expectativa de produção ultrapassou os 42%, foram aplicados 48 kg ha^{-1} de N a mais do que o recomendado. Segundo os autores, em 14% da área pesquisada, eram aplicados 100 kg ha^{-1} de N a mais do que a dose recomendada.

Segundo WENDLAND et al. (1994), nas condições da Alemanha, para assegurar produções máximas, as culturas precisam ser supridas com quantidades suficientes de nitrogênio em todas as fases do ciclo vegetativo. Por questões educacionais e

econômicas, na prática, mais nitrogênio é adicionado do que pode ser removido do solo na colheita. O excesso de nitrogênio não absorvido pelas plantas permanece no solo na forma de nitrato. Desde que o nitrato é um íon solúvel em água e não adsorvido no solo, ele pode ser lixiviado para fora da zona radicular e contribuir para a poluição do lençol freático. SEXTON et al. (1996) observaram que o N-NO_3^- lixiviado aumentava rapidamente quando as doses de N excediam a 100 kg ha^{-1} ano em solos arenosos cultivados com milho, e quando excediam 250 kg ha^{-1} (que correspondiam à máxima produção), o nitrato lixiviado aumentava de forma exponencial. Segundo os autores, com uma redução em 5% na dose de N, para a obtenção da produção máxima, a lixiviação de nitrato era reduzida em até 45%.

Para GIANELLO & BREMNER (1988), a falta de critério na recomendação de adubação nitrogenada e o custo relativamente baixo dos fertilizantes durante os últimos 20 anos têm encorajado a aplicação de mais nitrogênio do que seria necessário para uma boa produção. Estes fatos justificam o aumento da poluição por nitrato do solo e da água causado pela aplicação, em excesso, de fertilizantes nitrogenados. Além do nitrato, outros compostos de nitrogênio, nos seus diferentes estados de oxidação (nitrogênio amoniacal e albuminóide, nitrito), podem constituir risco para a saúde humana (GELBERT et al., 1999). O consumo de nitrato, através das águas de abastecimento, segundo ALABURDA & NISHIHARA (1998), pode determinar dois efeitos adversos à saúde: indução a metemoglobinemia (o óxido nítrico liga-se à hemoglobina no mesmo sítio do oxigênio, com uma afinidade 1.400 vezes maior, interferindo na curva de dissociação resultando em uma redução no transporte de oxigênio) e formação potencial de nitrosaminas e de nitrosamidas carcinogênicas. Para os autores, a indução à metemoglobinemia, especialmente em crianças, está associada a presença de nitrato nas águas potáveis e a conversão bacteriana para nitrito durante a digestão o que pode ocorrer na saliva e no trato gastrointestinal. O nitrito, quando presente na água de consumo humano, tem um efeito mais rápido e pronunciado do que o nitrato. Se o nitrito for ingerido diretamente, pode ocasionar metemoglobinemia, independentemente da faixa etária do consumidor.

Geralmente, a lixiviação do N está associada à deterioração da qualidade da

água potável quando a concentração de N-NO_3^- ultrapassa 10 mg L^{-1} ou 45 mg L^{-1} de NO_3^- (USEPA, 1992). No entanto, o nitrogênio perdido representa aumento no custo do agricultor, pois a perda de N do solo, a médio e longo prazos, sempre é feita às custas do empobrecimento da camada arável, não só do N, mas também do Ca, Mg e K, com reflexo no declínio da fertilidade do solo. Portanto, o monitoramento da lixiviação de nitrato é importante para o julgamento dos efeitos que as práticas agrícolas têm sobre a qualidade da água e do meio ambiente.

Segundo citado em RAIJ (1983), no Brasil, um dos métodos usados para a avaliação do nitrogênio no solo, é o baseado na mineralização média da matéria orgânica, freqüentemente admitida como sendo de 2% ao ano. Assim, determinava-se a matéria orgânica que, para fins práticos, se admitia ter 5% de nitrogênio. Posteriormente, RAIJ et al. (1987) comentariam que esse critério da matéria orgânica para avaliar o nitrogênio fora abandonado. Mais recentemente, os autores citaram que ainda não existia, para o Estado de São Paulo, um critério confiável para a recomendação da adubação nitrogenada com base na análise de solo. Atualmente, está adotando-se, para diversas culturas anuais, um critério de classes de resposta esperada que, associado às recomendações por produtividade esperada, deverá resultar em adubações mais coerentes com as necessidades. De acordo com RAIJ et al. (1996), as classes de resposta esperada são assim conceituadas:

a) Alta resposta esperada: em solos corrigidos, com muitos anos de plantio contínuo de milho ou de outras culturas não leguminosas; primeiros anos de plantio direto; solos arenosos, sujeitos a altas perdas por lixiviação;

b) Média resposta esperada: em solos muito ácidos, que serão corrigidos; ou plantio anterior esporádico de leguminosas; ou solo em pousio por um ano; ou uso de quantidades moderadas de adubos orgânicos;

c) Baixa resposta esperada: em solo em pousio por dois ou mais anos, ou cultivo após pastagem (exceto em solos arenosos); cultivo intenso de leguminosas ou plantio de adubos verdes antes do milho; uso constante de quantidades elevadas de adubos orgânicos.

BUNDY & MALONE (1988), em Wisconsin, estudaram a correlação entre a

produção de grãos de milho, concentração de NO_3^- no solo e doses de N. Utilizaram solos bem drenados, sob condições de clima úmido e em área de plantio contínuo de milho. No primeiro ano do estudo, as parcelas principais receberam 0; 134; 268 e 402 kg ha^{-1} de N antes da semeadura e, no segundo ano, 0; 78; 156 e 234 kg ha^{-1} de N. Os dados de produção mostram que a resposta à adubação nitrogenada é significativamente afetada pela quantidade de N-NO_3^- no solo. BLACKMER et al. (1989), em estudo semelhante, em Iowa, concluíram que solos que apresentavam concentrações em torno de 25 mg kg^{-1} de N-NO_3^- , na profundidade de 0 a 0,3 m, não respondiam à adubação nitrogenada. Posteriormente, resultados apresentados por BINFORD et al. (1992), em 45 localidades em Iowa e, em solos na maioria do subgrupo Typic Hapludoll, revelaram que mais de 60% da variabilidade da produção absoluta de grãos de milho e mais de 75% da variabilidade relativa foram explicadas pela concentração de NO_3^- no solo.

BARRIOS et al. (1998) estudaram indicadores para avaliar o N disponível no solo após o cultivo de diversas leguminosas, associadas à produção de grãos de milho, em região de clima semi-árido e subúmido tropical, em Zâmbia na África a uma altitude de 1030 m com ocorrência de chuvas no período de novembro a abril. Foram coletadas amostras de solo em outubro de 1994 e outubro de 1995, antes do período das chuvas e submetidas a incubação anaeróbica e aeróbica e, posteriormente, quantificada a mineralização do N pela diferença entre $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ e NO_3^- . Com base nos resultados, os autores concluíram que, em solos tropicais, há um acúmulo de NH_4^+ , antes do período das chuvas, e uma rápida conversão de NH_4^+ para NO_3^- ocorre em solos úmidos. Explicaram os autores que, na época da seca, a atividade vegetal é pequena, mas a mineralização não cessa, havendo acúmulo de NH_4^+ no solo que será nitrificado no início do período úmido. Os teores de nitrogênio no solo variaram de 1,1 a 12,3 mg kg^{-1} de solo para NH_4^+ ; de 2,1 a 20,1 mg kg^{-1} de solo para NO_3^- , e de 6,7 a 29,2 mg kg^{-1} de solo para N inorgânico ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$), para o primeiro ano do experimento, e de 4,9 a 25,2 mg kg^{-1} de solo para NH_4^+ ; de 0,7 a 10,2 mg kg^{-1} de solo para NO_3^- , e de 6,5 a 31,4 mg kg^{-1} de solo para N inorgânico ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$), no segundo ano do experimento. Os coeficientes de determinação (R^2) dos dados relativos à concentração do N inorgânico

no solo e produção de grãos para $P < 0,01$ foram 0,72; 0,59 e 0,71 para NH_4^+ ; NO_3^- e $(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)$, respectivamente, no primeiro ano, e 0,74; 0,22 e 0,74 para NH_4^+ , NO_3^- e $(\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-)$, respectivamente, no segundo ano. Com base nos resultados e nos coeficientes de determinação, os autores sugerem a importância do uso do $\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$ no lugar do NO_3^- como parâmetro para avaliar-se o N disponível no solo durante o período seco.

BUNDY et al. (1999) utilizaram análise química do solo para nitrato, antes e após o plantio, em amostras de solos retiradas nas camadas de 0-0,3 e 0,3-0,6 m de profundidade, quando as plantas de milho atingiram 30 cm de altura do solo, conforme proposto por MAGDOFF (1991). Os autores analisaram dados de produção de grãos de milho e de amostras de solos coletadas em 307 localidades da região Central e Noroeste dos USA entre os anos de 1988 e 1992. Os resultados indicaram que a frequência de resposta ao N variou de acordo com a cultura anterior. Nos locais onde o milho havia sido cultivado anteriormente, 59% das amostras apresentaram valores de produção relativa inferiores ou iguais a 90%, enquanto, nos locais previamente cultivados com soja, 67% das amostras foram responsivas a N. Como o cálculo para produção relativa foi feito pela divisão da produção média das parcelas que não receberam N pela produção média das parcelas que receberam adubação nitrogenada máxima, os resultados indicam que, sob monocultura de milho, é maior a resposta ao N. Das amostras de solo após o plantio em que se detectaram deficiência de N nos tratamentos responsivos, o milho tinha sido a cultura anterior em 10 a 17% dos casos. Embora a recomendação de N para a cultura do milho seja menor quando a cultura anterior é a soja, o teste não detectou deficiência de N em nenhum destes tratamentos.

VANOTTI & BUNDY (1994) sugerem que a recomendação da adubação nitrogenada seja feita com base no retorno econômico do N, por ser menos variável do que quando baseado em estimativas de produção. Segundo os autores, com ajustes anuais do N-NO_3^- no solo, pode-se obter uma recomendação de N específica para a região, evitando-se as doses extremas causadas por estimativas equivocadas de produção.

Dentre os métodos apresentados para a orientação na recomendação do

nitrogênio, segundo GEYPENS & VANDENDRISSCHE (1996), os de extração química não conseguem reproduzir a ação dos microorganismos do solo, as incubações biológicas o fazem em laboratórios em condições diferentes das de campo, os métodos de curvas de resposta são caros e requerem uso intensivo de laboratório, e os métodos baseados nos teores de N-NO_3^- são de valor limitado devido à dinâmica do N no solo.

Entre os fatores responsáveis pela variabilidade de nitrato no solo, além da solubilidade em água e da variabilidade natural do solo, está o efeito acumulado da umidade em determinadas áreas, a evapotranspiração resultante de diferentes taxas de crescimento e a condutividade hidráulica resultante das operações de preparo do solo entre as parcelas (GAST et al., 1978; DRURY et al., 1993). Para MEIRVENNE & HOFMAN (1989), a frequência de distribuição do nitrato no solo é incerta e tanto pode ser normal como log-normal, independentemente do tempo, ano ou profundidade. Este fato justifica os coeficientes de variação da concentração de N-NO_3^- serem altos e variáveis. LOCKMAN & STORER (1990) observaram variações entre as quantidades de nitrato no solo entre 10 a 133%, e PETTYGROVE et al. (1990) detectaram diferenças entre 29 e 36% em amostras de solo coletadas imediatamente antes e após uma gradagem.

Para ADDISCOTT (1996), a variabilidade do nitrato está diretamente relacionada à coleta da água que se move para baixo da zona radicular. Segundo o autor, o nitrato lixiviado pode ser medido com mais facilidade em solos arenosos por serem mais homogêneos e permitirem o uso de cápsulas porosas, uma técnica simples e de baixo custo. Com o aumento dos teores de silte e de argila, o solo torna-se mais estruturado e menos homogêneo, dificultando a utilização dessa técnica. Nestes casos, uma técnica utilizada para avaliar a disponibilidade de N para as plantas é o monitoramento da quantidade de nitrato lixiviado por meio da análise da solução do solo captada em drenos de subsuperfície.

Por esta técnica, GAST et al. (1978), em Minnesota, investigaram a lixiviação de N, em solo argiloso (Webster clay), em área de plantio convencional cultivado com milho. Os dados mostram um pequeno aumento na concentração de N-NO_3^- na solução do solo, obtido nas amostras das linhas de drenos das parcelas que receberam entre 20

e 112 kg ha^{-1} de N, aplicados na testemunha e a dose recomendada, respectivamente. As aplicações de 224 e 448 kg ha^{-1} de N resultaram em aumento significativo na concentração de nitrato na água drenada, com perdas de 59 e 120 kg ha^{-1} de N, respectivamente.

KLADIVKO et al. (1991) avaliaram a presença de pesticidas e nutrientes na água drenada do solo, por um período de 3 anos. O solo utilizado (Silt loam), em Indiana, apresentava baixos teores de matéria orgânica 1,3%, silte 22%, areia 66% e argila 12%. Os dados mostram que os drenos retiraram uma quantidade de água que variou de 6 a 27% do total das precipitações ocorridas no período. Embora a área, segundo os autores, fosse relativamente uniforme, foi significativa a diferença entre o volume de água drenada entre as repetições. Segundo os autores, pode ter ocorrido movimento de água, como erosão superficial ou infiltração lateral por impedimento de camadas menos permeáveis. A concentração de nitrato nas amostras variou de 20 a 30 mg L^{-1} . Devido a períodos secos, os drenos estiveram ativos em 3 períodos: início do desenvolvimento da cultura até o verão; no outono, quando voltaram as chuvas até o final do ano, e do final do inverno ao início da primavera. A variação média de nitrato na concentração da água percolada, nestes períodos, foi de $23,7$; $27,3$ e $26,6 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente. Quando considerados todos os períodos do experimento, a perda de N-NH_4^+ e N-NO_3^- foram de $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$ e $41,7 \text{ kg ha}^{-1}$, respectivamente.

A divulgação dos resultados de 11 anos de estudo realizado por RANDALL & IRAGAVARAPU (1995), em Minnesota, indicou que a perda de N-NO_3^- , avaliada na solução do solo coletada em drenos localizados a $1,2 \text{ m}$ de profundidade, é altamente dependente da precipitação. Em anos secos, quando o crescimento das plantas e a absorção de N são limitados, a percolação da água do solo é mínima, mas a mineralização continua a ocorrer, acumulando N mineral no solo, principalmente quando o sistema de preparo de solo utilizado for o convencional. A consequência disso no reinício das precipitações foi que grande parte desse nitrato foi lixiviado rapidamente abaixo da zona radicular. Nos anos secos, as perdas foram inferiores a 3% do N aplicado e, nos chuvosos, variaram de 25 a 70%, com as perdas de nitrato durante o experimento variando de $1,4$ a 139 kg ha^{-1} de N. Resultados semelhantes sobre perdas

de nitrato abaixo da zona radicular, durante e após o cultivo de milho em área irrigada, foram observados na Espanha por MORENO et al. (1997). Segundo esses autores, quando a necessidade de água pelas plantas foi suprida apenas pela irrigação, a drenagem obtida abaixo da zona radicular foi limitada. No entanto, quando, durante o período inicial de crescimento, após irrigação prévia, houve ocorrência de chuvas, a drenagem foi significativa. A lixiviação de nitrato durante o período do experimento foi de 45 e 150 kg ha⁻¹ de N nos tratamentos com 170 e 500 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. A diminuição da dose do fertilizante nitrogenado reduziu acentuadamente a lixiviação de nitrato, sem, contudo, reduzir a produção de grãos significativamente. Resultados semelhantes já haviam sido relatados por LIANG et al. (1991) no Canadá, FISHER et al. (1999) em Ohio e HALVORSON et al. (2001) em Dakota do Norte, em condições semelhantes. Em outros estudos, foi observado que o aumento na concentração de nitrato na água drenada, causado pela aplicação de doses de N, é detectado nos tubos de drenos até três meses após a aplicação (HUBBARD et al., 1984, e RANDALL & IRAGAVARAPU, 1995).

Segundo BIJAY et al. (1995), embora as condições de umidade do solo e as climáticas sejam favoráveis à lixiviação de nitrato nos oxissolos e ultissolos da América Latina, não se deve esperar grande contaminação nas águas superficiais por nitrato, devido às baixas quantidades de N utilizadas nos países em desenvolvimento durante as últimas três ou quatro décadas, e em solos que apresentam teores baixos de N. Entretanto, nessas regiões, o crescimento das áreas irrigadas e o crescente uso de adubos nitrogenados, quando aliados ao alto índice de precipitação, propiciam condições favoráveis para a contaminação das águas superficiais por nitrato.

2.2 Nitrogênio na planta

A necessidade nutricional de qualquer planta é determinada pela quantidade de nutriente que esta extrai durante o seu ciclo. A quantidade total depende do rendimento obtido e da concentração de nutrientes nos grãos e na massa seca. A extração de nitrogênio pela cultura do milho, para produtividade de 9.500 kg ha⁻¹, segundo Arnon

(1975), citado por RESENDE et. al. (1990) é de 187 kg ha^{-1} , em torno de 20 kg ha^{-1} de N para a produção de 1.000 kg ha^{-1} de grãos de milho. Considerando um solo com teor de matéria orgânica de 30 g dm^{-3} , uma mineralização de 2% forneceria 60 kg ha^{-1} por ano de nitrogênio, assim, tanto na produção de grãos como na de silagem, é necessário colocar à disposição da planta a quantidade de nutriente que esta extrai, e deve ser fornecido ao solo através de adubações (BÜLL, 1993).

O milho é uma cultura que remove grandes quantidades de água e de nitrogênio e, usualmente, requer o uso de adubação nitrogenada em cobertura para complementar a quantidade suprida pelo solo, quando se desejam produtividades elevadas. Por esta razão, é reconhecidamente uma cultura que responde à adubação nitrogenada e à irrigação (RECK & OVERMAN, 1996).

Segundo MENGEL & BARBER (1974), até os primeiros 34 dias após a semeadura, mais de 66% do sistema radicular do milho encontra-se na camada de 0 a 0,15 m de profundidade, e, a partir deste período, mais de 80% do sistema radicular é distribuído na camada de 0 a 0,45 m. Resultados semelhantes foram obtidos por BASSOI et al. (1994) que, de acordo com as análises do sistema radicular do milho irrigado em Terra Roxa Latossólica, em Piracicaba, por meio de processamento de imagem, concluíram que 70% das raízes se concentravam na camada de 0 a 0,4 m de profundidade, independentemente do modo de aplicação do nitrogênio (via solo ou fertirrigação).

A produtividade da cultura do milho é função da interação entre fatores fisiológicos e ambientais. Entre esses fatores, estão a área foliar, o índice de área foliar e a radiação absorvida pelo dossel. A incorporação do N pela planta de milho determina melhor desenvolvimento, com aumento significativo na área foliar e na produção de matéria seca, resultando em maior produção de grãos (HUNTER, 1980; UHART & ANDRADE, 1995 e ESCOSTEGUY et al., 1997).

O índice de área foliar (IAF), segundo Watson (1952), citado por FANCELLI & DOURADO NETO (1997), é a relação funcional existente entre a área foliar e a área do terreno ocupada pela cultura. Tal parâmetro permite estimar o grau de desenvolvimento da planta e o potencial de interceptação de energia radiante. Considerando que o

rendimento agrícola é expresso pela quantidade de matéria colhida por unidade de área, é válido expressar a área foliar sobre a mesma base de rendimento. Ainda, o IAF que determina a taxa máxima de crescimento, é conhecido como IAF crítico, o qual varia em função do ambiente a que a planta estiver submetida.

TOLLENAAR & AGUILERA (1992) e BOEDHRAM et al. (2001) atribuíram o melhor desenvolvimento das plantas à arquitetura da folha. Segundo os autores, o ângulo de incidência da folha no colmo propiciou melhor aproveitamento da incidência da luz, o que permitiu melhor adaptabilidade a maiores populações, refletindo no aumento do rendimento de grãos e no índice de área foliar (IAF) durante o pendoamento, e resultando em maior atividade fotossintética e maior acúmulo de matéria seca.

SCARSBROOK & DOSS (1973) avaliaram o espaçamento e a densidade populacional entre híbridos de milho, em área irrigada. O IAF nas menores populações foi associado à produção máxima, o que não ocorreu para as demais densidades. Segundo os autores, para as maiores densidades populacionais, a equação quadrática foi a que melhor se ajustou às variáveis da produção de grãos e IAF, com ponto de máxima igual a 3,5; indicando que, em valores superiores, não há correspondência deste índice com a produção de grãos.

De certa forma, trabalhos que relacionam produção de matéria seca e de grãos de milho ao IAF têm mostrado uma relação linear entre si (EIK & HANWAY, 1966). WINTER & OHLROGGE (1973) obtiveram a maior produção de grãos (9.480 kg ha^{-1}) com a densidade populacional de 84.000 plantas por hectare e esta apresentou IAF de 3,8 e, quando utilizaram densidade em torno de 70.000 plantas por hectare, o índice foi de 4,7.

No Brasil, de acordo com a região, genótipo e sistema de produção considerado, o IAF crítico para a cultura do milho encontra-se dentro dos limites de 3 a 5, observados por FANCELLI & DOURADO NETO (1997), BOEDHRAM et al. (2001) e SÁ et al. (2002) para densidades entre 44.500 a 103.750 plantas por hectare.

Geralmente, são as folhas que melhor refletem o estado nutricional das plantas e, portanto, podem expressar uma relação direta entre o suprimento de nutrientes pelo

solo ou adubo e os seus teores foliares. Esta relação foi observada por BADILLO-FELICIANO et al. (1979) e por EL-HOUT & BLACKMER (1990) em híbridos de milho avaliados no florescimento. Os teores de N na folha foram de 35 e 28 g kg⁻¹ para as doses de 134 e 67 kg ha⁻¹ de N e de 17 a 28 para as doses de 56 e 224 kg ha⁻¹ de N, respectivamente.

Para MALAVOLTA et al. (1989) uma planta de milho sob estresse de nitrogênio transloca N das folhas mais velhas para as mais novas, resultando em clorose nas folhas mais velhas. Este amarelecer nas folhas, geralmente, é seguido por queda prematura das mesmas. Em contraste, plantas que recebem excesso de nitrogênio, têm o verde de suas folhas escurecido e atrasam a senescência. Testes envolvendo análise de tecido foliar de milho para comparar a concentração de N na folha da espiga, no pendoamento, variam de 27,5 a 32,5 g kg⁻¹. Estes valores são semelhantes aos encontrados por SCHEPERS et al. (1992), que variaram de 29,0 a 36,0 mg g⁻¹.

Uma deficiência leve de N causará restrição no crescimento da planta, mas geralmente só poderá ser percebida através da comparação com plantas que tenham um adequado suprimento de N. Além dos sintomas característicos de uma ou outra desordem os quais só se manifestam em casos graves, a identificação do nível nutricional da planta somente é possível pela análise química da mesma.

Segundo BÜLL (1993), em termos mundiais, há uma variação muito grande com relação ao tipo de folha a ser amostrada, variando desde a sexta folha, a partir da base, até aquela denominada +4, ou seja, a quarta folha a partir do ápice, cuja inserção da bainha com o colmo é visível. Além disso, comenta o autor, há variações também na parte da folha a ser analisada e na inclusão ou não da nervura central. Segundo o autor, como é muito pequena a variação entre os teores foliares de N obtidos para as diferentes formas de amostragem, de modo geral, podem ser considerados adequados, para a cultura do milho, valores entre 2,72 e 3,25%.

ISFAN et al. (1995), no Canada, observaram em análise de plantas de milho na fase de 8 folhas (plantas com 25 a 30 cm de altura), correlação positiva e significativa entre a concentração de N-total, produção de matéria seca e doses de N. A concentração de N variou de 3,2% a 3,73% para as doses 0 e 200 kg ha⁻¹ de N,

respectivamente ($r = 0,881$). Na fase de pendoamento, a concentração de N variou de 2,36% para a dose com 0 kg ha⁻¹ de N a 3,25% para a dose com 200 kg ha⁻¹ de N e foi significativamente afetada pelo tipo de solo e pelo ano, e não o foi pelo método de aplicação do fertilizante nitrogenado. Na colheita, a concentração de N da parte aérea, sem sabugo e grãos, variou de 0,96% para a dose com 0 kg ha⁻¹ de N a 1,54% para a dose com 200 kg ha⁻¹ de N. A concentração de N na planta e a extração de N foram positivamente correlacionadas, e a extração variou de 72,4 a 194,6 kg ha⁻¹ para as doses 0 e 200 kg ha⁻¹ de N, respectivamente.

O comportamento de leguminosas como fornecedoras de N para o milho em sucessão, nos sistemas de cultivo mínimo e convencional, foi avaliado por CERETTA et al. (1994) em solo podzólico vermelho-amarelo em Santa Maria (RS). Os autores observaram que a concentração de N-total nas folhas inferior e oposta à espiga, na fase de pleno florescimento do milho, variou de 2,21 a 2,75% para as diferentes leguminosas utilizadas, independentemente do sistema de cultivo utilizado.

Como a fotossíntese máxima é associada com folhas totalmente expandidas, uma prática recomendável é a comparação entre as últimas folhas expandidas. Geralmente, a seleção da folha é associada com a principal espiga para reduzir a variabilidade entre plantas e facilitar a comparação entre os tratamentos (DWYER & STEWART, 1986). No Brasil, há basicamente quatro tipos de recomendação de amostragem definidos: terço basal da folha +4, excluída a nervura central (GALLO & COELHO, 1963); folha inteira abaixo da espiga (MALAVOLTA et al., 1989); terço médio da folha imediatamente abaixo e oposta à espiga superior (COELHO & FRANÇA, 1995); e o terço médio da folha imediatamente abaixo da espiga superior (RAIJ & CANTARELLA, 1996). Em todos os casos, coletam-se 30 folhas por hectare por ocasião do pendoamento.

Segundo FANCELLI & DOURADO NETO (1997), há outros períodos da vida da planta que podem refletir o seu estado nutricional. Estes períodos são:

a) Estádio 1 (V4), identificado quando a planta tem quatro folhas totalmente desdobradas. Nesta fase, acontece o desenvolvimento radicular, que está associado ao da parte aérea, com a disponibilidade do N determinando o aumento da relação parte

aérea / raízes;

b) Estádio 2 (V8), em que as plantas apresentam 8 folhas totalmente desdobradas ou maduras. Neste estágio, com o sistema radicular bem distribuído no solo, é favorecido o aproveitamento de fertilizantes, coincidindo com taxa elevada de absorção de nutrientes, principalmente potássio e nitrogênio;

c) Estádio 3 (V12), em que as plantas apresentam 12 folhas totalmente desdobradas. Nesta fase, as plantas apresentam de 80 a 90% da área foliar máxima, além de alta taxa de crescimento do colmo, do pendão e da espiga superior. Por isso, a disponibilidade de nutrientes e a distribuição de chuvas são fatores decisivos para a confirmação do potencial de produção e rendimento da cultura. Como o tamanho da espiga é determinado neste período, a ocorrência de deficiências nutricionais pode comprometer seriamente a produção;

d) Pendoamento (VT), em que deficiências de nutrientes nesta fase promovem significativa queda no rendimento da cultura, principalmente pela redução do comprimento das espigas, peso das espigas e peso dos grãos.

Embora as recomendações com base na concentração de N na folha reflitam muito bem a absorção de N, elas não refletem o N disponível no solo devido à absorção do nitrato ser influenciada por outros fatores (CERRATO & BLACKMER, 1991 e GEYPENS & VANDENDRIESSCHE, 1996), e este aspecto tem limitado o emprego do método devido à possibilidade de haver no solo concentração excessiva de NO_3^- (MORRIS & BLACKER, 1989 e EL-HOUT & BLACKMER, 1990).

De acordo com PETERSON et al. (1993), a avaliação da intensidade da cor verde das folhas de uma planta no campo, com o clorofilômetro da Minolta (modelo SPAD 502), pode ser mais uma ferramenta para o manejo das adubações nitrogenadas. O aparelho, segundo o fabricante, determina a concentração relativa de clorofila presente, medida na unidade SPAD, que é baseada na absorbância da folha em duas regiões de comprimento de onda. A clorofila tem picos de absorbância no comprimento de onda vermelho (400 – 500 nm) e azul (600 – 700 nm), não havendo transmitância na região do infravermelho (>700 nm). Usando estas duas transmitâncias, o aparelho calcula um valor proporcional à quantidade de clorofila presente na folha, expresso em

SPAD. Assim, o aparelho pode ser utilizado para acompanhar a condição nutricional de plantas e dar indicação sobre a severidade da deficiência de nitrogênio que a planta manifesta através da redução da coloração verde nas folhas. Desta forma, o emprego de um medidor de clorofila, que permite medidas rápidas a campo, é uma técnica com futuro promissor para avaliar o momento para a aplicação do N na cultura do milho irrigado (BLACKMER & SCHEPERS, 1995).

Trabalhos têm indicado correlação positiva entre a concentração de N e concentração de clorofila na folha (GIRARDIN et al., 1985; ERCOLI et al., 1993; COSTA et al., 1994). COSTA et al. (1994) observaram correlação positiva e significativa entre clorofila e doses de nitrogênio ($r = 0,79$), clorofila e rendimento de grãos ($r = 0,68$) e entre doses de nitrogênio e rendimento de grãos ($r = 0,79$). Estas correlações possibilitam o uso do conteúdo de clorofila na folha para estimar-se a suficiência de N na planta e a necessidade adicional de fertilizante nitrogenado.

WASKOM et al. (1996), utilizando o clorofilômetro para acompanhar o status do N em uma cultura de milho irrigado, foram utilizadas 4 doses de N (0; 45; 90 e 135 kg ha⁻¹ de N) antes da semeadura para o estabelecimento de níveis de fertilidade. As leituras foram feitas em 20 folhas por subparcela, nos estádios V6 (6 folhas), V10 (10 folhas), VT (pendoamento) e R4 (grão pastoso). As mesmas folhas foram removidas para análise de N. Os resultados mostraram correlação significativa entre a produção de grãos e a leitura SPAD, nos estádios V10, VT e R4, apresentando coeficientes de correlação de 0,343; 0,560 e 0,675.

JEMISON & LYTLE (1996), utilizando a análise da concentração de nitrato no solo e leitura SPAD da folha no estádio V6 e a folha da espiga (V12) na fase de enchimento de grão para identificar deficiência ou excesso de nitrogênio, observaram que a leitura SPAD, no estádio V6, foi influenciada pela época da amostragem e pelos híbridos utilizados. Utilizando a folha da espiga, a leitura SPAD respondeu à adubação adicional de N em 83% dos casos, mas as parcelas com N excessivo não foram identificadas. Para PETERSON et al. (1993), os estudos têm mostrado que fatores ambientais e diferentes variedades podem afetar as medidas feitas pelo clorofilômetro. Por esta razão, o mais apropriado uso do equipamento é comparar o verde das folhas

de milho do campo com folhas bem nutridas com nitrogênio, utilizadas como referência. Quando a percentagem relativa entre as leituras SPAD for inferior a 95%, é sugerida a adubação adicional.

De acordo com VARVEL et al. (1997), a determinação da suficiência de N durante o ciclo da cultura de milho é básica, na medida em que as correções possam ser feitas a tempo para a obtenção de produções máximas. Os autores analisaram o comportamento das leituras do clorofilômetro em milho sob sistemas de cultivo em monocultura e de rotação de cultura com soja-milho, irrigada. Utilizaram delineamento experimental em parcelas subdivididas, com híbridos nas parcelas principais e doses de N (0; 40; 120 e 160 kg ha⁻¹ de N, em 1991 e 1992; 0; 50; 100; 150 e 200 kg ha⁻¹ de N, em 1993, 1994 e 1995) nas subparcelas. A monitorização foi feita entre os estádios V8 (8ª folha) e o R2 (início do enchimento de grão). As leituras eram analisadas e depois divididas pelas leituras da área-padrão para obter o índice de suficiência, expresso em percentagem. Toda vez que o índice de suficiência era menor do que 95% eram adicionados 30 kg ha⁻¹ de N, quantidade definida nos experimentos conduzidos no primeiro ano. Esse critério foi aplicado duas vezes em 1991, três vezes em 1992, quatro vezes em 1993, uma vez em 1994 e quatro vezes em 1995 e, com ele, dos cinco anos de pesquisa, em três anos, foi atingida a produção máxima. Segundo os autores, a produção máxima pode ser obtida quando as adubações nitrogenadas são baseadas nas leituras SPAD e no índice de suficiência, se houver N suficiente no início do ciclo vegetativo. Quando a deficiência de N foi detectada no início do ciclo vegetativo (planta com 8 folhas), mesmo que corrigida, não foi possível alcançar a produção máxima. No entanto, quando a deficiência não era severa, foi possível corrigi-la e atingir a produção máxima. Estes resultados mostram a importância de ter-se nitrogênio disponível no início do ciclo vegetativo para as plantas de milho.

PIEKIELEK & FOX (1992), na Pennsylvania, estudaram a correlação entre a leitura do clorofilômetro nas folhas V3; V4; V5 e V6, a produção de grãos e a capacidade do solo em suprir N, e procuraram verificar se o clorofilômetro poderia ser útil para recomendar o momento de aplicar o fertilizante nitrogenado em cobertura. Os autores observaram que, enquanto a produção de grãos variou de 3,4 a 13,0 t ha⁻¹ para

as doses 0 e 200 kg ha⁻¹ de N (na forma de NH₄NO₃), a capacidade do solo em suprir N variou de 42 a 250 kg ha⁻¹ de N, e a média dos valores em SPAD variou de 11,5 a 59,6. A leitura em V5 foi a que melhor se correlacionou com a produção de grãos, indicando que a leitura de 43,4 SPAD respondeu por 92% da produção relativa de grãos.

De maneira geral, as medidas e a intensidade da cor relacionadas à folha, os testes que determinam o teor de N no tecido vegetal, podem ser úteis para identificar a deficiência de nitrogênio em um determinado estágio de desenvolvimento da planta. Para tanto, segundo ARGENTA et al. (2002), um indicador ideal deve reproduzir a relação do nível de nitrogênio no sistema solo/planta, ser capaz de detectar a deficiência ou o excesso de N, e ser de rápido diagnóstico para permitir a correção ainda na própria estação de crescimento.

2.3 Adubação nitrogenada

2.3.1 Efeito da rotação de culturas

A capacidade produtiva também pode ser obtida com a redução do revolvimento do solo (BERTOL & FISCHER, 1997; CASTRO FILHO et al., 1991) e/ou com a utilização de sistemas de manejo que incorporam N ao solo (SCHULTE & BUNDY, 1985; KARLEN et al., 1992), fixado da atmosfera por leguminosas, no sentido de recuperar os teores de matéria orgânica e a capacidade de fornecimento do solo de N à cultura (TEIXEIRA et al., 1994; BAYER & MIELNICZUK, 1997; ESCOSTEGUY et al., 1997).

Uma das práticas utilizadas para o aumento da produtividade de milho é a da rotação com a cultura da soja. Estudos têm demonstrado aumento na produtividade do milho em até 30% em relação ao cultivado em monocultura, devido ao aporte de N da leguminosa (PETERSON & VARVEL, 1989; CROOKSTON et al., 1991). Para alguns autores, os resultados são mais evidentes em anos secos ou em condições de estresse (RAIMBAULT & VYN, 1991; COPELAND et al., 1993; RANDALL & IRAGAVARAPU, 1995); para outros, não foram observadas vantagens na redução da adubação nitrogenada em função do cultivo de uma leguminosa anterior ao milho (LORY et al.,

1995).

Segundo ALVAREZ et al. (1995), comparações entre as quantidades de nitrogênio fixado simbioticamente e retornado ao solo pelos resíduos da soja, com as quantidades de N removidas na colheita de grãos, sugerem que parte da contribuição do N atribuída à soja é feita às custas da diminuição do N disponível no solo. Para VANOTTI & BUNDY (1995), a diminuição do N disponível no solo, observada no segundo ano de rotação após a cultura da soja, sugere que parte da contribuição do N atribuída à soja seja devido ao estímulo do crescimento da população microbiana a intensificar a mineralização do N do solo e, desta forma, beneficiando a cultura do milho. Esses resultados são semelhantes aos obtidos por POWER et al. (1986), em Nebraska, que obtiveram aumentos significativos na mineralização do N em solos com resíduos de soja comparados com os de milho.

Pesquisas que utilizam ^{15}N têm sugerido que a maior parte do N da fitomassa das leguminosas tem como destino o solo (HARRIS & HESTERMAN, 1990), ficando acumulado na forma de N orgânico. A quantidade e a distribuição de N inorgânico, principalmente N-NO_3^- , que permanece no perfil do solo, são resultantes do fertilizante utilizado, do regime de temperatura e umidade do solo, e da aplicação de doses de N maiores do que as necessárias para atingir rendimentos ótimos (TORBERT et al., 1996; BARRIOS et al., 1998).

BUNDY et al. (1993) observaram, em estudo de quatro anos com milho adubado de 0 a 224 kg ha^{-1} de N, produções de 5 a 30% maiores quando o milho era cultivado após a cultura da soja do que em monocultura. Contudo, OMay et al. (1997) observaram que, após 10 anos de avaliação de sistemas de monocultura de milho e de rotação com a cultura da soja, com ou sem adubação, a quantidade (em g kg^{-1}) tanto do carbono orgânico quanto do N no solo foram maiores, significativamente, quando o milho foi cultivado como monocultura do que quando cultivado em rotação com a soja. A diferença entre os sistemas de cultivo foi atribuída à maior quantidade de resíduo deixada pela cultura do milho e pela diminuição do C orgânico e N causados pela cultura da soja.

PETERSON & VARVEL (1989), em Nebraska, estudaram o efeito da adubação

nitrogenada na produção de grãos de milho em monocultura e em rotação. As culturas foram conduzidas em área não irrigada, e as doses de N utilizadas foram 0; 90 e 180 kg ha⁻¹ para uma densidade populacional de 47.000 plantas ha⁻¹. A análise de variância dos dados de produção de grãos indica que tanto a rotação de cultura como a adubação nitrogenada afetaram a produção. O milho em monocultura produziu menos do que em rotação para a mesma dose de N. O maior incremento à produção foi notado para a dose de 90 kg ha⁻¹ de N. Embora a produção de grãos de milho, em monocultura, tenha respondido de maneira linear às doses de N, seus grãos foram menos densos do que os produzidos em rotação, 679 e 697 kg m⁻³, respectivamente.

VARVEL et al. (1995), utilizando lisímetros para avaliar a lixiviação de nitrato em monocultura de milho e rotação de milho/soja, irrigados, verificaram que, no sistema de rotação, houve redução de 28% no consumo de água e de 19% no de nitrato lixiviado, quando comparados ao sistema de monocultura. Segundo os autores, esta diferença foi devida à maior agressividade de extração de água pela cultura da soja no final do ciclo e menor necessidade por fertilizante nitrogenado.

A resposta de produção da cultura do milho à rotação com plantas leguminosas não se limita ao aproveitamento do nitrogênio deixado pela cultura que antecedeu a cultura do milho e pode estar relacionada a outros efeitos, tais como: capacidade de retenção da umidade no solo (RODER et al., 1989); melhoria das propriedades físicas do solo, promovendo maior crescimento radicular e conseqüente maior utilização tanto do N do solo quanto do fertilizante (RAIMBAULT & VYN, 1991; TORBERT et al., 1996); ou mesmo causada pelo efeito N-NO₃⁻ residual do solo (BUNDY & MALONE, 1988; JOKELA & RANDALL, 1989).

2.3.2 Resposta à adubação

O nitrogênio é um elemento notável em vários aspectos e de comportamento completamente diferente dos demais macronutrientes. É o mais caro dos nutrientes e o requerido em maiores quantidades pela maioria das culturas. Embora exista em teores totais elevados em solos, equivalentes a algumas toneladas de N por hectare, a um

dado momento, são baixas as quantidades disponíveis (RAIJ, 1983). Também cita o autor que, por ser o nitrogênio móvel no solo, não se acumulam os efeitos diretos das adubações, embora possa haver efeito de um ano para outro, de adubações nitrogenadas, através da ciclagem do elemento pelas plantas.

Dados de pesquisa de COELHO et al. (1992), obtidos em Latossolo Vermelho-Escuro, de textura muito argilosa, indicam que, independentemente da fonte de N e do método de aplicação, a produção de grãos aumentou de 3.943 para 7.110 kg ha⁻¹ com o aumento da dose de 0 para 120 kg ha⁻¹ de N, correspondendo a um incremento de 80% no rendimento. Segundo os autores, essa resposta é explicada pelo baixo teor de N mineral no solo por ocasião da semeadura (14 kg ha⁻¹ de N na camada de 0 a 0,2 m). Ainda, no mesmo trabalho, foi observado que a porcentagem média de N na matéria seca total (grãos e palhada) variou de 6,1 g kg⁻¹, na testemunha, a 10,6 g kg⁻¹ com a aplicação de 120 ou 240 kg ha⁻¹, e 80% (75 kg ha⁻¹) do N extraído pela cultura encontrava-se nos grãos.

POZO et al. (1992), em Granada na Espanha, avaliaram a resposta na produção de grãos de uma cultura de milho, sob irrigação, a doses de N, utilizando a uréia como fonte de N. O solo utilizado apresentava, na camada de 0 a 0,3 m de profundidade, 47,9 % de areia, 42,2% de silte, 9,9% de argila e 1,5% de matéria orgânica. As doses de N utilizadas variaram de 200 a 400 kg ha⁻¹ no primeiro ano, de 0 a 200 kg ha⁻¹ no segundo e de 0 a 300 kg ha⁻¹ no terceiro. Nos dois primeiros anos, não houve diferença significativa entre os tratamentos, assim como a concentração de N no grão não foi afetada pelas doses de N. No terceiro ano, tanto a produção de grãos como o peso dos grãos das parcelas-testemunha foram maiores do que nos demais tratamentos (P<0,05). A ausência de resposta nos dois primeiros anos foi atribuída ao teor elevado de N-NO₃⁻ no solo. Os dados indicam que, no início do estudo, os teores de N-NO₃⁻ eram de 20 mg kg⁻¹ e 36 mg kg⁻¹ de solo, nas camadas de 0 a 0,3 e 0,3 a 0,6 m de profundidade, respectivamente. O resultado do terceiro ano, segundo os autores, foi atribuído a um possível efeito depressivo devido ao excesso de nitrogênio aplicado.

De acordo com CANTARELLA (1993), a recomendação de adubação nitrogenada em outros países, tais como EUA, Espanha, Itália, França e Alemanha,

para culturas de milho de alta produtividade (superior a 9.000 kg ha^{-1}), varia de 150 a 300 kg ha^{-1} . Comparando-se a recomendação oficial de adubação nitrogenada do Estado de São Paulo com a dos países citados, para as mesmas estimativas de produção, ela é da ordem de 120 kg ha^{-1} . Para o autor, as perdas e a eficiência de uso dos nutrientes nos solos intemperizados do Brasil, bem como os materiais genéticos de milho aqui utilizados, não garantem a correspondência entre doses de N e produção de grãos alcançada em outros países. Segundo COELHO & FRANÇA (1999), as recomendações atuais para a adubação nitrogenada em cobertura são realizadas com base em curvas de resposta, histórico da área e produtividade esperada. A adubação nitrogenada em cobertura, para a cultura do milho de sequeiro, de modo geral, varia de 40 a 70 kg ha^{-1} de N. Em agricultura irrigada, em que prevalece o uso de alta tecnologia para a obtenção de elevadas produtividades, esta recomendação é insuficiente. Nestas condições, os autores sugerem doses de nitrogênio entre 100 e 200 kg ha^{-1} .

ANDERSON et al. (1997) em Iowa, avaliaram o efeito de plantas anuais e perenes na remoção do N do solo, o N residual deixado por estas plantas, a estabilidade dos agregados do solo e a produção de milho. A remoção de N do solo foi proporcional às doses aplicadas: com a dose de 0 kg ha^{-1} de N, as gramíneas removeram de 28 a 95 kg ha^{-1} de N e o milho 87 kg ha^{-1} de N; na dose de 70 kg ha^{-1} de N, tanto as plantas anuais como as perenes removeram entre 38 kg ha^{-1} e 151 kg ha^{-1} de N; para a dose de 140 kg ha^{-1} de N, somente as espécies anuais removeram mais N do que o aplicado; e na dose de 280 kg ha^{-1} de N, somente os cultivos duplos de inverno removeram mais N do que o aplicado. A produção máxima de grãos de milho foi obtida com doses de 224 kg ha^{-1} de N. A avaliação da eficiência no uso do fertilizante nitrogenado pelo milho variou de 33 a 64%, a menor eficiência esteve geralmente ligada às maiores doses de N, resultados próximos aos apresentados por WIENHOLD et al. (1995), ANDERSON et al. (1997) e GENTRY et al. (2001).

Estudos comparativos sobre a eficiência agrônômica das diferentes fontes de N, como adubos nitrogenados solúveis, mostram similaridade entre eles (CANTARELLA & RAIJ, 1985). Na prática, a escolha do fertilizante pelo produtor tem-se baseado no custo da unidade de nitrogênio, e, nesse sentido, a uréia constitui-se na fonte mais vantajosa.

Segundo KIEHL (1989), a uréia aplicada ao solo sofre, em poucos dias, uma reação de hidrólise enzimática que resulta em apreciável liberação de amônia (NH_3). Embora sendo um gás, esse composto é passível de retenção no solo, principalmente sob a forma de amônio (NH_4^+).

De modo geral, a época de aplicar-se nitrogênio em cobertura, na cultura do milho, é baseada no desenvolvimento da planta ou em determinado período após a germinação. Normalmente, o manejo do N envolve em aplicá-lo no início do ciclo vegetativo, antecipando a necessidade futura da cultura, ou aplicá-lo em pequena quantidade no início do ciclo e parcelar o restante em adubações adicionais. A baixa recuperação aparente do N aplicado para as doses elevadas de nitrogênio mostra a importância de ajustar-se as aplicações de fertilizantes para o mais próximo possível da quantidade requerida pela cultura.

Dois aspectos relacionados à aplicação de nitrogênio e ao crescimento do milho foram levantados por MILLER et al. (1975). O primeiro é que a aplicação de nitrogênio no plantio dá ao milho um rápido desenvolvimento que não pode ser completamente compensado com aplicações tardias, e o segundo é que uma significativa parcela do N aplicado na é perdida. Para os autores, em solos aluviais úmidos, as doses menores tenderam a ser mais efetivas quando aplicadas tardiamente, enquanto as maiores foram mais efetivas quando aplicadas no início do desenvolvimento da cultura.

No Brasil, segundo COELHO et al. (2003), existe um consenso entre técnicos e produtores de que, aumentando o número de aplicações do adubo nitrogenado, aumenta a eficiência do nitrogênio usado e diminuem as perdas, principalmente as por lixiviação. Como consequência, e devido às facilidades que os sistemas de irrigação oferecem para aplicação de fertilizantes via água, é comum o parcelamento do fertilizante nitrogenado em quatro, seis ou até oito vezes durante o ciclo da cultura. Para os autores, a baixa intensidade de nitrificação e de perdas por lixiviação, nos perfis dos solos, poderia explicar por que a aplicação parcelada de nitrogênio em duas, três ou mais vezes para a cultura do milho, com doses variando de 60 kg ha^{-1} a 120 kg ha^{-1} , em solos de textura média e argilosa, não refletiu em maiores produtividades em relação a uma única aplicação na fase inicial de maior exigência da cultura, ou seja, 35 a 40 dias

após o plantio.

GROVE et al. (1980) verificaram, em um Latossolo Vermelho Escuro (Typic haplustox), textura argilosa, sob vegetação de cerrado e cultivado com milho no período chuvoso, que a aplicação em cobertura de 80 kg ha^{-1} de N na forma de uréia, parcelada em duas vezes, 40 kg ha^{-1} de N aos 20 e aos 60 dias após a semeadura, não resultava em aumentos na produção de grãos ou de matéria seca total, quando comparada à adubação em cobertura de toda a dose, aos 30 dias após a semeadura. Resultados discordantes aos apresentados foram observados por MELGAR et al. (1991), quando avaliaram o efeito de doses e métodos de aplicação de fertilizante nitrogenado (uréia) para milho em Latossolo Vermelho-Amarelo álico, muito argiloso, na Estação Experimental da EMBRAPA de Manaus. Os autores verificaram que, embora tenha havido resposta às doses do fertilizante aplicado por ocasião da semeadura, os valores mais altos de rendimento de grãos e de matéria seca total foram obtidos com a aplicação de 120 kg ha^{-1} de N, em duas aplicações iguais, aos 25 e 55 dias após a emergência das plantas. Segundo os autores, houve aumento na densidade das espigas, no peso dos grãos e na proporção de matéria seca total assimilada durante os estádios de crescimento e pós-pendoamento.

Resposta em produção ao parcelamento também foi observada por BASSOI & REICHARDT (1995) sob condições de irrigação em Terra Roxa Estruturada, quando o nitrogênio em cobertura foi parcelado em duas aplicações. Os dados apresentados mostram que as adubações em cobertura, nos estádios mais avançados da cultura do milho, via água de irrigação, permitiram um maior acúmulo de matéria seca e do nutriente nas plantas, acarretando maior translocação de nitrogênio para os grãos e, conseqüentemente, maior produção de grãos em relação à aplicação de N via solo, feita em estádios iniciais do desenvolvimento da cultura.

Também sob condições de irrigação e em solo classificado como Terra Roxa Estruturada, HEINRICHS et al. (1995) observaram que, quando o nitrogênio em cobertura era parcelado em duas aplicações, havia uma tendência no aumento dos valores médios do peso de grãos, para todos os híbridos estudados, além de resposta significativa, tanto para o comprimento da espiga quanto para o número de grãos por

espiga. Mais recentemente, JOKELA & RANDALL (1997) verificaram que, em média, 25 e 38% do nitrogênio aplicado, quando nas maiores doses avaliadas, estava nos grãos e na planta, respectivamente. A quase totalidade do N (inorgânico e orgânico) permaneceu no solo até o final do ano em que foi feita a aplicação (70 a 90% na camada de 0 a 0,4 m de profundidade). O efeito mais consistente da época de aplicação deu-se na concentração do N encontrada no solo. O adiamento da adubação em cobertura, das primeiras semanas para o estágio vegetativo de 8 folhas, aumentou a forma inorgânica e diminuiu a orgânica no final do ciclo vegetativo. Embora a diferença não tenha sido significativa, a absorção do N do fertilizante pelas plantas aumentou com o das doses, mas a porcentagem de recuperação decresceu.

III. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local, características e solo da área do experimento

O experimento foi desenvolvido no ano agrícola de 2000-2001, em área irrigada por aspersão, com pivô central, na fazenda Lago Azul, geograficamente situada na região Norte do Estado de São Paulo, a 20° 40' 26" de latitude Sul e 48° 15' 04" de longitude Oeste, altitude de 550 m, no município de Morro Agudo (SP).

A região apresenta, segundo a classificação climática de Köppen, clima do tipo AW (tropical com verão chuvoso, inverno seco e com temperatura média do mês mais frio superior a 18°C). Os regimes hídrico e térmico da região são, segundo OLIVEIRA & PRADO (1987), údico e epitérmico, respectivamente. Segundo os dados obtidos na Estação Meteorológica da CAROL¹, em Orlândia (SP), distante 40 km da área do experimento, a média histórica de precipitação pluvial na região, nos últimos 10 anos, para o período de maio a outubro, é de 344 mm e, para o período de novembro a abril, de 1.160 mm. Os dados de temperatura foram ajustados à área do experimento, com base na altitude e latitude, conforme metodologia sugerida por PINTO et al. (1972).

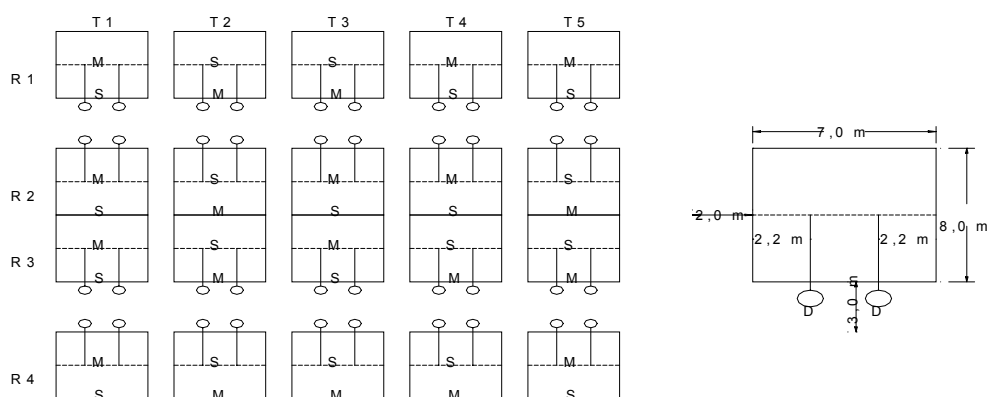
O solo do local do experimento é um Latossolo Vermelho, de textura argilosa,

¹Cooperativa dos Agricultores da Região de Orlândia.

eutrófico (EMBRAPA, 1999), possivelmente ácrico, com declividade menor do que 1% e vinha sendo utilizado em rotação de gramínea e leguminosa.

3.2 Demarcação da área do experimento

Em julho de 1998, a área do experimento (2.068 m^2) foi dividida em quatro blocos de 344 m^2 ($43 \times 8 \text{ m}$), com cinco parcelas cada um, de maneira que ficassem posicionados sob o raio de ação de mesmos aspersores do sistema de irrigação e entre dois terraços consecutivos. As parcelas de $8 \times 7 \text{ m}$, com área total de 56 m^2 , foram constituídas por 10 linhas de milho de 7 m de comprimento, perpendiculares as linhas de dreno e espaçadas entre si de $0,8 \text{ m}$. Da divisão de cada parcela em duas, no sentido do comprimento, obtiveram-se as subparcelas utilizadas no sistema de rotação. Cada subparcela apresentou área total de 28 m^2 e área útil de 12 m^2 ($2,4 \times 5 \text{ m}$). Entre as parcelas, foram mantidos carregadores com $2,0 \text{ m}$ de largura (Figura 1).



M = monocultura; S = Rotação Milho x Soja; T = tratamentos; R = repetições e D = tubos-dreno.

Figura 3. Representação esquemática do posicionamento das parcelas, subparcelas, e do sistema de drenagem, na área do experimento.

3.3 Implantação do sistema de drenagem na área do experimento

Foi instalado sistema de drenagem e coletores de água em 20 subparcelas, conforme apresentado esquematicamente na Figura 1. Em cada subparcela, foram abertas duas valetas de $0,20 \text{ m}$ de largura, $0,65 \text{ m}$ de profundidade e $5,0 \text{ m}$ de

comprimento no sentido transversal ao comprimento da parcela. As valetas foram locadas a 2,20 m da extremidade da subparcela e distanciadas, entre si, de 2,60 m. Como dreno, foram utilizados tubos de PVC rígido com 100 mm de diâmetro, cada um com 40 furos de 20 mm de diâmetro distribuídos em três fileiras longitudinais para a coleta da solução do solo percolada, observando um desnível médio de 2% em direção ao reservatório. Como reservatório, na extremidade do tubo voltada para o carreador, foi adaptado um joelho de PVC de 100 mm de diâmetro com “visita” de 50 mm, vedado por um “cap” e, à “visita”, foi adaptado um tubo de acesso de PVC de 50 mm de diâmetro e 1,0 m de comprimento, por meio do qual era coletada a solução armazenada no reservatório (Figura 2). Para a retirada da água, era introduzido no reservatório, por meio do tubo de acesso, um tubo de plástico ($\varnothing$ 4 mm) ligado a uma bomba de vácuo manual.

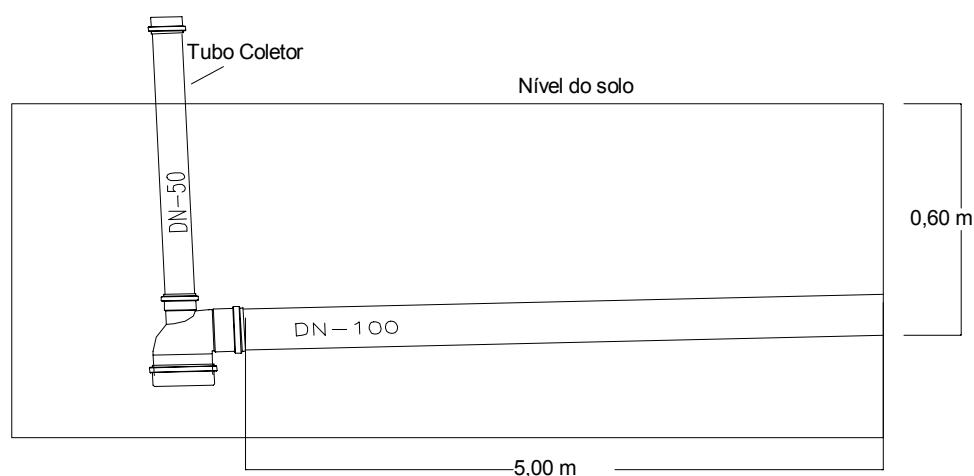


Figura 4. Esquema do posicionamento funcional do tubo-dreno usado para a coleta da água gravitacional do solo.

O sistema e a profundidade de drenagem subsuperficial utilizados foram construídos com base na profundidade do sistema radicular do milho sob irrigação, nos moldes apresentados em GAST et al. (1978) e em KLADIVKO et al. (1991), que trabalharam com solos saturados. Para garantir a coleta da solução do solo percolada para os drenos, o fundo e a lateral das valetas até a altura de 0,30 m foram

impermeabilizados com lona de polietileno, na qual a solução se acumulava e era coletada pelos drenos. Para evitar entupimentos e entrada de terra nos drenos, os tubos foram envoltos em manta geotêxtil de poliéster (Bidin OP 20).

Após o fechamento das valetas e visando minimizar os efeitos de compactação e desestruturação impostos à área pela implantação do sistema de drenagem, foi feita uma escarificação (escarificador com cinco hastes de 0,06 m de largura espaçadas em 0,4 m) a uma profundidade de 0,3 m, seguida de gradagem (grade aradora com 20 discos de 28") e duas gradagens com grade niveladora (44 discos de 18"). A seguir, a área foi utilizada com culturas de milho (de outubro de 1998 a fevereiro de 1999), de feijão (de abril a agosto de 1999) e de milho (de setembro de 1999 a fevereiro de 2000).

3.4 Caracterização química da área do experimento

Em fevereiro de 2000, foram coletadas amostras compostas de solo das camadas de 0 a 0,2; de 0,2 a 0,4, e de 0,4 a 0,6 m de profundidade. As análises químicas para avaliação da fertilidade foram feitas segundo o descrito em RAIJ et al. (1987), e os resultados obtidos são os apresentados na Tabela 1.

Na amostra coletada na profundidade de 0 a 0,2 m, foi feita a caracterização granulométrica, de acordo com CAMARGO et al. (1996), e os resultados obtidos, em g kg^{-1} , foram os seguintes: argila = 590; limo = 210; areia muito fina = 90; areia fina = 90, e areia média = 20, o que levou à classe textural argilosa.

Tabela 1. Análise química de solo da área do experimento (fevereiro de 2000).

Prof.	P(res)	MO	pH _{cacl2}	K	Ca	Mg	H+Al	CTC	V
m	mg dm ⁻³	g dm ⁻³			mmol _c dm ⁻³				%
0,0 – 0,2	92	23	5,9	2,8	43	12	25	83	70
0,2 – 0,4	9	19	5,1	1,0	16	5	38	60	37
0,4 – 0,6	5	16	5,2	1,0	17	4	31	53	42

3.5 Cultura para o estabelecimento do sistema de rotação

Para o estabelecimento do sistema de rotação, foram sorteadas as subparcelas para a semeadura do milho, para dar seqüência ao sistema de monocultura e as para a semeadura da soja, para a seqüência milho-soja. Para evitar problema de sombreamento do milho sobre a soja, fez-se primeiro a semeadura da soja (08/03/2000) e depois a do milho (17/05/2000). O espaçamento da soja foi de 0,4 m nas entrelinhas, com 18 a 20 sementes por metro na linha, visando obter população em torno de 450.000 plantas ha^{-1} . A cultivar de soja empregada foi a Conquista (MG/BR46) que, no Estado de São Paulo, período juvenil longo (120 a 130 dias). A adubação foi feita de maneira a garantir, no solo, teores suficientes de P e K e na expectativa de produtividade de 2,5 a 2,9 t ha^{-1} de grãos: 10 kg ha^{-1} de N; 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 , e 50 kg ha^{-1} de K_2O . Na colheita (27/06/2000), a produção de matéria seca total da parte aérea da soja, menos grãos, foi de 7.943 kg ha^{-1} , e a análise de N total revelou teores de 17,4 g kg^{-1} . A produção de grãos de soja foi de 2.570 kg ha^{-1} com 14% de umidade. A resteva da cultura foi devolvida à subparcela de origem.

O milho foi semeado manualmente, com espaçamento de 0,8 m nas entrelinhas e 5 a 6 sementes por metro na linha, com desbaste posterior, ajustando-se a densidade populacional para 60.000 plantas ha^{-1} . O genótipo de milho empregado (Cargill 333B) é um híbrido simples e de ciclo médio (950 unidades de calor). A adubação inicial foi feita quando se procedeu à semeadura da soja, aplicando-se 10 kg ha^{-1} de N; 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 , e 50 kg ha^{-1} de K_2O . A adubação nitrogenada de cobertura foi feita de acordo com RAIJ & CANTARELLA (1996), com base na expectativa de produtividade de 8 a 10 t ha^{-1} de grãos, para solo classificado como de alta resposta ao nitrogênio. O parcelamento da adubação em cobertura foi feito de acordo com RESENDE et al. (1990), quando das plantas nos estádios vegetativos de V4; V8 e V12.

3.6 Estabelecimento, condução e colheita do ensaio

3.6.1 Delineamento experimental

O delineamento experimental empregado foi em parcelas subdivididas, com

quatro repetições. Nas parcelas, como tratamento principal, foram aplicadas, em cobertura, cinco doses de nitrogênio na forma de uréia $[(\text{NH}_2)_2\text{CO}]$, e nas subparcelas, duas seqüências de culturas (milho-milho-milho e milho-soja-milho), conforme esquema da análise de variância apresentado na Tabela 2.

Tabela 2. Esquema de análise de variância: parcelas subdivididas com cinco doses de N nas parcelas e duas rotações de cultura nas subparcelas.

Causas da Variação	Graus de Liberdade
Blocos	03
Doses (D)	04
Resíduo (a)	12
Parcelas	(19)
Rotações (R)	01
Interação DxR	04
Resíduo (b)	15
Total	39

3.6.2 Amostragem de solo

Em outubro de 2000, procedeu-se à amostragem de solo, subparcela por subparcela, para avaliar a fertilidade do solo das subparcelas antes da instalação do experimento, propriamente dito. As amostras de solo, da camada de 0 a 0,2 m de profundidade, foram peneiradas em peneira com abertura de malha de 2 mm, homogeneizadas e divididas em duas. Metade das amostras, destinada à determinação de N-NH_4^+ e N-NO_3^- segundo o descrito em SILVA et al. (1999), de acordo com o procedimento adotado por MATTOS JÚNIOR et al. (1995), foi conservada em freezer (-20°C) até o processamento. A outra metade, destinada à análise de rotina, foi seca em estufa com circulação de ar, em torno de 50°C . Para a análise de rotina, seguiu-se a metodologia descrita em RAIJ et al. (1987).

3.6.3 Semeadura

Em 25/11/2000, após o preparo do solo (escarificação e grade) e as sementes tratadas com 2 L de Futur 300 (Thiodicarb 300 g L^{-1} , óxido de zinco 250 g L^{-1} ,

molibdênio 10 g L⁻¹ e boro 2 g L⁻¹), para cada 100 kg de semente, e semeadas em sulco tratado com 1 kg ha⁻¹ de Aldicarb, para controle de pragas de solo, fez-se a semeadura do milho, usando-se espaçamento de 0,8 m nas entrelinhas e distribuição de 8 a 10 sementes por metro nas linhas, sendo, com desbaste, ajustada a densidade populacional para 70.000 plantas ha⁻¹. O genótipo de milho empregado foi o Cargill 333B.

A adubação na semeadura foi feita com base na média geral dos resultados da análise de solo (Tabela 1) e ajustado o fertilizante formulado à recomendação citada em RAIJ & CANTARELLA (1996) para P e K para uma expectativa de produtividade de 8 a 10 t ha⁻¹ de grãos com: 5 kg ha⁻¹ de N; 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅; 50 kg ha⁻¹ K₂O (250 kg ha⁻¹ da fórmula 02-20-20), e mais 18 kg ha⁻¹ de N e 36 kg ha⁻¹ de S (150 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio).

3.6.4 Tratos culturais

Imediatamente após a semeadura, para o controle das plantas invasoras na área, foi aplicada uma mistura de herbicidas à base de Atrazine e Glifosate.

Foram feitas aplicações com 1.100 g ha⁻¹ de Clorpirifós granulado aos 15 e 30 dae e com 15 g ha⁻¹ de Lufenuron aos 50 dae para controle de *Spodoptera frugiperda*. Aos 45 dae, em área total e aos 53 dae nas bordaduras, foi aplicado 200 g ha⁻¹ de Propiconazole, para controle de *Cercospora zeae-maydis* e 50 g ha⁻¹ de Spinosad para controle de *H.zea*. Aos 64 dae, em área total, foi aplicado 250 g ha⁻¹ de Tebuconazole para controle de *Cercospora zeae-maydis*, *Curvularia lunata* e *Phaeosphaeria maydis* e 600 g ha⁻¹ de Methamidophós para controle de *H. zea* e *Diabrotica speciosa*.

Uma semana após a emergência das plântulas, fez-se o primeiro desbaste, deixando-se oito plantas por metro linear e, no segundo desbaste, uma semana depois, deixaram-se de cinco a seis plantas por metro linear, de forma a ajustar a população para 70.000 plantas por hectare.

3.6.5 Manejo da água

O método de irrigação utilizado foi por aspersão e o sistema utilizado por pivô central, operando em baixa pressão (91 m.c.a. a 1750 r.p.m), com 11 torres (525 m), dotado de difusores e reguladores de pressão. O conjunto foi avaliado, utilizando-se dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC=82%), segundo método proposto por Heermann & Hein (1968), do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD=79%) e da eficiência de aplicação potencial (EAP=79%), de acordo com a metodologia apresentada por Merrian & Keller (1979), citados por COTRIM et al. (1988). Os resultados obtidos permitiram, segundo BERNARDO (1989), verificar que o equipamento apresentava boa uniformidade de aplicação de água na superfície do solo.

Os componentes P (chuva, em mm) e ETo (evapotranspiração de referência, em mm) foram calculados com base nos dados obtidos em um pluviômetro e um tanque classe A, respectivamente, instalados junto à área do experimento. O valor de ETo foi obtido, multiplicando-se a evaporação do tanque classe A (ECA) pelo coeficiente do tanque (Kp), admitido como sendo 0,75. A evapotranspiração máxima (ETm) foi obtida pelo produto da ETo e o coeficiente de cultura (Kc). Os valores de Kc utilizados referem-se àqueles preconizados por Doorenbos & Pruitt (1976), citados por RESENDE et al. (1990).

O momento de se proceder à irrigação foi determinado utilizando-se tensiômetros instalados nas fileiras de plantas de milho, em duas profundidades: dois pares a 0,2 m e outros dois a 0,4 m (medidos a partir do ponto referente ao comprimento médio da cápsula até a superfície do solo). As leituras nos tensiômetros foram realizadas na manhã seguinte, após as precipitações e/ou irrigações, e o potencial mátrico (Ψ_m , em centímetro de coluna de mercúrio) foi calculado por meio da expressão:

$$\Psi_m = -12,6 h_{Hg} + hc + z$$

em que h_{Hg} = altura de mercúrio (em cm) a partir do nível na cuba; hc = altura do nível de mercúrio na cuba em relação ao solo (em cm) = 105 cm, e z = profundidade da cápsula (em cm). Adotou-se como valor de potencial mátrico crítico o intervalo entre 50 a 55 cm de coluna de mercúrio nos tensiômetros a 20 e 40 cm de profundidade (entre 49,5 e 55,7 kPa), respectivamente, conforme a expressão anterior, para definir-se

quando irrigar (SAAD & LIBARDI, 1992).

A quantidade de água aplicada em cada irrigação foi calculada com o seguinte procedimento:

$$L = \sum_{i=1}^n ET_n i / E_f$$

em que L = Lâmina bruta de água aplicada (mm); ETm = Evapotranspiração máxima diária da cultura, i = dias entre duas irrigações consecutivas e, Ef = Eficiência da irrigação, calculada em 80%.

3.6.6 Adubação nitrogenada em cobertura

O parcelamento do nitrogênio em cobertura foi feito em quatro fases de desenvolvimento da cultura, segundo sugestão de RESENDE et al. (1990) e os estádios fenológicos da cultura. As doses foram aplicadas manualmente, paralelamente a linha de semeadura com auxílio de um recipiente plástico previamente dosado. Todas as linhas da parcela receberam a mesma quantidade. Após cada aplicação a área era irrigada com no mínimo 10 mm de água para a incorporação da uréia, conforme esquema apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Parcelamento, épocas e doses das aplicações de nitrogênio utilizadas em cobertura.

Fases de Desenvolvimento	Tratamentos ⁽¹⁾				
	1 (N ₀)	2 (N _{0,5})	3 (N ₁)	4 (N _{1,5})	5 (N ₂)
	----- kg ha ⁻¹ -----				
4 folhas ² - 14 dae ³ (12-12)	0	60	60	60	60
8 folhas ² - 30 dae (29-12)	0	0	20	40	60
12 folhas ² - 46 dae (15-01)	0	0	20	40	60
Pendoamento - 57 dae (26-1)	0	0	20	40	60
Total	0	60	120	180	240

⁽¹⁾N₀; N_{0,5}; N₁; N_{1,5} e N₂ correspondem a submúltiplos e múltiplos da dose recomendada, em cobertura com N₁ para produtividade entre 8 e 10 t ha⁻¹ e classe de resposta a N, alta (RAIJ & CANTARELLA, 1996), ²Folhas recém-maduras (lígula visível); ³dae = dias após a emergência das plântulas.

3.6.7 Amostragens de água, planta e solo

3.6.7.1 Água

As inspeções do volume de água acumulado nos reservatórios dos drenos foram feitas a intervalos não maiores do que três dias, e a coleta realizada quando o volume era maior do que 30 mL em, no mínimo, 12,5% dos drenos. Nestes casos, todo o volume contido no reservatório era transferido para uma proveta, medido e retirada uma amostra de até 100 mL (volume suficiente para análise) e o resto descartado. As amostras de água foram armazenadas em frascos de plástico e conservadas em freezer (-20°C) até o processamento, conforme procedimento adotado por KHAKURAL & ALVA (1996).

3.6.7.2 Planta

Para a determinação do N-total das folhas, foram coletadas amostras do terço médio de 30 folhas colhidas por subparcela, ao acaso, em quatro fases de desenvolvimento da cultura: estádios 1 e 2 (folhas 4 e 8 recém-maduras), segundo FANCELLI (1996); no pendoamento, a folha posicionada imediatamente abaixo da espiga superior (folha 12), segundo RAIJ & CANTARELLA (1996); e a folha ⁺4, designada como a quarta folha a partir do ápice, segundo descrito em GALLO et al. (1981). Na fase do pendoamento, foi colhida, ao acaso, na área útil de cada subparcela, a parte aérea de cinco plantas, para a determinação do índice de área foliar e do N-total na planta.

3.6.7.3 Solo

Após a colheita do milho, o solo das subparcelas foi amostrado nas profundidades de 0 a 0,2 e de 0,2 a 0,4 m, para caracterização química (análise básica de fertilidade e de nitrogênio inorgânico). O procedimento adotado no preparo das amostras foi descrito em 3.6.2.

3.6.8 Colheita

A colheita foi realizada em 16/04/2001, após a maturação fisiológica da planta, na área útil representada pelas 3 linhas centrais de cada subparcela, desprezando-se um metro de cada extremidade. O rendimento de grãos, por hectare, foi estimado por meio da extrapolação da produção colhida na área útil das subparcelas. A umidade dos grãos foi estimada com auxílio de um determinador de umidade de cereais, marca Burrows, modelo Universal. O peso dos grãos foi corrigido para 14% de umidade por meio da fórmula:

$$P = P_c (100 - U) / (100 - U_{14})$$

em que P = peso corrigido; U_{14} = umidade padrão adotada (14%); U = umidade observada (em %), e P_c = peso no campo.

3.7 Avaliações

3.7.1 Concentração de N na água coletada

A determinação do nitrogênio amoniacal e nítrico (NH_4^+ e NO_3^-) foi feita em alíquotas de 30 mL de água, mediante destilação a vapor, conforme descrito em SILVA et al. (1999), na presença de óxido de magnésio para determinação de NH_4^+ e de liga de Devarda, para a de NO_3^- . O destilado foi recebido em solução de ácido bórico, contendo indicadores e, posteriormente, titulado com H_2SO_4 padronizado.

3.7.2 Planta

3.7.2.1 Clorofila

A clorofila foi avaliada através de um clorofilômetro e do índice de suficiência. Para tal, nas folhas, assim que coletadas, foram feitas leituras de unidades SPAD, utilizando-se do método descrito em PETERSON et al. (1993). As leituras com o clorofilômetro (Minolta Câmera Co., modelo SPAD-502) foram feitas na região média do terço médio de 30 folhas por parcela e a 1 cm da margem. Com o objetivo minimizar o efeito de outros fatores dos da dose de N nas leituras, foi calculado o índice de

suficiência de clorofila (IS) pela divisão da leitura média do tratamento testado pela leitura média da área otimamente adubada com N, onde, teoricamente, não havia deficiência de N, conforme descrito em PETERSON et al. (1993), por meio da expressão:

$$\text{IS} = (\text{Leitura SPAD da amostra} / \text{Leitura SPAD do padrão}) \times 100.$$

em que o padrão corresponde a leitura média de 30 folhas de plantas que, em área anexa à do experimento, haviam recebido 300 kg ha^{-1} de N e foram admitidas como bem supridas do nutriente.

3.7.2.2 Área e índice de área foliar

A área foliar foi estimada com as folhas remanescentes de cinco plantas representativas de cada subparcela que tiveram seu comprimento (C) e máxima largura da folha (L) medidos no estágio de pendramento. A área foliar (AF) foi estimada de acordo com STEWART & DWYER (1999), ou seja, pelo produto do comprimento (C) pela largura (L) multiplicado por 0,75 utilizado como fator de correção geométrico, para a cultura do milho, determinado por ESCOSTEGUY et al. (1997).

Para estimar o índice de área foliar (IAF), foi utilizada a expressão:

$$\text{IAF} = \text{área foliar calculada} / \text{área ocupada por uma planta (0,14 m}^2\text{)}.$$

3.7.2.3 Nitrogênio total

As amostras de folhas e de planta foram lavadas, secas em estufa a aproximadamente 65°C até peso constante e moídas em moinho tipo Wiley. Para a determinação do N-total, fez-se uso do método semimicro-Kjeldahl, conforme descrito em SARRUGE & HAAG (1974). As quantidades de N acumuladas na folha foram obtidas multiplicando-se, respectivamente, a massa seca por folha pelo respectivo teor de nitrogênio.

3.7.3 Recuperação aparente do N aplicado como fertilizante

A recuperação aparente do fertilizante nitrogênio foi estimada subtraindo o N removido na parcela-testemunha do N removido quando o N foi aplicado, dividido pela quantidade de N aplicado e multiplicado por 100, conforme citado por Omay et al. (1998).

3.7.4 Estimativa de perda de nitrato por lixiviação

A estimativa de perda de nitrato por lixiviação foi calculada pelo produto da concentração de N-NO_3^- em cada amostragem pelo volume de água drenado no mesmo período, conforme adaptação do citado em RANDALL & IRAGAVARAPU (1995).

3.8 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos a análises de variância, de regressão e de correlação, utilizando os procedimentos do SAS (Statistical Analysis System), for windows v.6.12, (1996) para delineamento experimental de parcelas subdivididas em blocos ao acaso. Por meio da análise de variância, foi feito o estudo do efeito das doses de N, das rotações, e a interação entre eles. O efeito das doses de N sobre o rendimento de grãos de milho foi avaliado pela análise de regressão.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Produção de milho e extração de nitrogênio

A análise de rotina no solo das subparcelas, antes da instalação do experimento, não mostrou diferença significativa para nenhum dos parâmetros analisados.

Durante o período de desenvolvimento da cultura (novembro a abril), não foram observados fatores limitantes à produção de grãos, e a produtividade obtida evidencia o alto potencial produtivo da cultura do milho alcançado no Brasil em condições

experimentais e por agricultor que adota tecnologia adequada, conforme citado em COELHO & FRANÇA (1999).

À medida que se aumentou a dose de N aplicada de zero para 240 kg ha⁻¹ de N, aplicada em cobertura, houve incremento na produção de massa seca da parte aérea (37%), de grãos de milho (28%), no teor de N na massa seca (38%), e no N extraído pela massa seca (89%) e pelos grãos (34%) (Figura 5). A maior dose de N aplicada (240 kg ha⁻¹) proporcionou o maior rendimento embora não diferindo da dose de 180 kg ha⁻¹, com acréscimo de 2.448 kg ha⁻¹ na produção de grãos, em relação à testemunha (N₀).

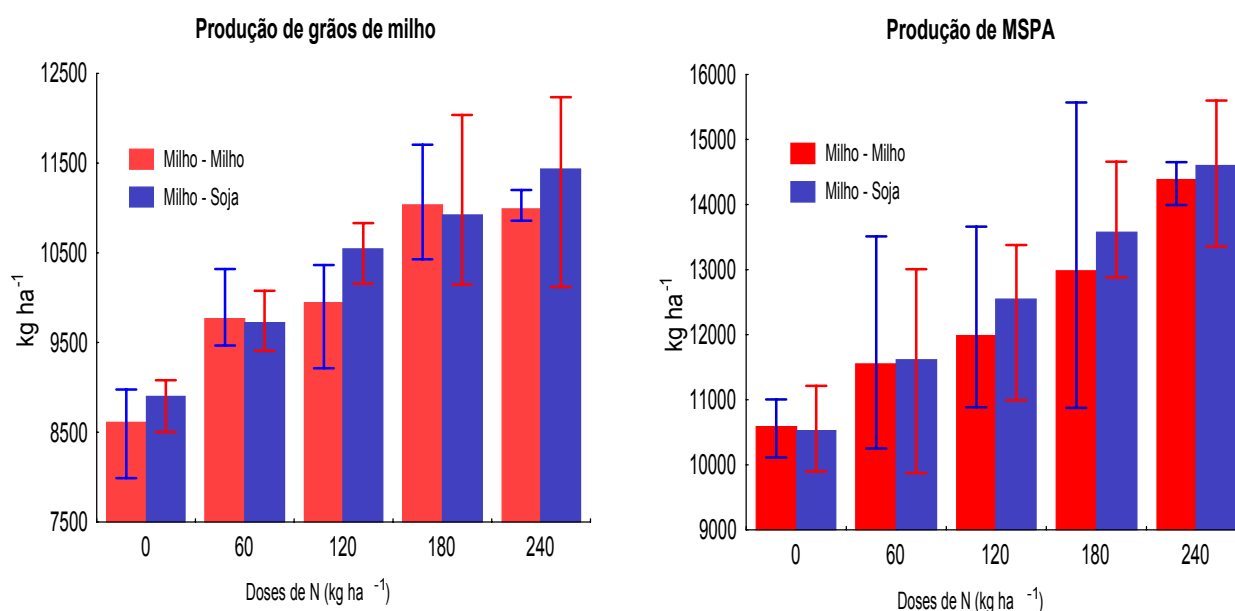


Figura 5. Aumento na produção de grão e matéria seca da parte aérea em função do N aplicado

A dose de N aplicada está próxima às citadas por CANTARELLA (1993) e por COELHO & FRANÇA (1999) para produtividades maiores que 9.000 kg ha⁻¹. O primeiro autor cita que, em várias partes do mundo, a recomendação de N para culturas de milho de alta produtividade varia de 150 a 300 kg ha⁻¹, e os segundos recomendam o emprego de 180 a 220 kg ha⁻¹ de N para a cultura de milho irrigada. Na Tabela 4, estão apresentados os valores médios de produção de massa seca da parte aérea e de grãos de milho, os respectivos teores de N e quantidades extraídas de N, bem como o teste F

para os valores médios e o coeficiente de variação (CV).

Tabela 4. Produção de massa seca da parte aérea e de grãos (kg ha^{-1}), concentração (g kg^{-1}) e extração de nitrogênio (kg ha^{-1}) pela cultura.

Fator	Produção		Teor de N		N extraído		
	MSPA	Grãos	MSPA	Grãos	MSPA	Grãos	Total
	----- kg ha ⁻¹ -----		----- g kg ⁻¹ -----		----- kg ha ⁻¹ -----		
Doses de N (D)							
0	10.559 c	8.755 d	7,9 d	14,9 a	84 d	131 c	215 d
60	11.589 bc	9.741 c	8,9 c	15,0 a	103 cd	147 bc	250 c
120	12.277 bc	10.247 bc	9,7 b	15,9 a	120 bc	163 ab	283 b
180	13.279 ab	10.974 ab	10,1 b	15,5 a	134 b	170 a	305 ab
240	14.482 a	11.203 a	10,9 a	15,7 a	159 a	176 a	322 a
F(D)	10,42**	33,44**	76,78**	2,57ns	35,75**	22,46**	37,37**
Rotação (R)							
mm	12.297 a	10.068 a	9,3 b	15,2 b	115 b	154 b	269 a
sm	12.575 a	10.300 a	9,8 a	15,6 a	125 a	161 a	281 a
F-R	0,69 ns	1,80 ns	10,63**	4,88**	4,70**	5,55*	4,51*
F-DxR	0,14 ns	0,64 ns	0,28 ns	3,03 ns	0,21 ns	1,26 ns	1,39 ns
C.V.%	8,52	5,36	5,08	3,75	11,33	6,46	6,45

MSPA = massa seca da parte aérea. Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5%. *, ** Significativos a 1 e 5% pelo teste F, mm=Monocultura de milho, sm=rotação de cultura, F(D)= Teste F para dose, F(R)= Teste F para rotação, F(DxR)= teste F para a interação dose x rotação, C.V= coeficiente de variação e, ns = não significativo.

O teor de nitrogênio nos grãos não foi afetado significativamente pelas doses de N aplicadas; contudo, a quantidade de N extraída nos grãos aumentou de 130 até 176 kg ha^{-1} e esteve entre 15 e 16 kg de N por tonelada de grãos, com valores similares aos 17 kg t^{-1} citados em RAIJ et al. (1996).

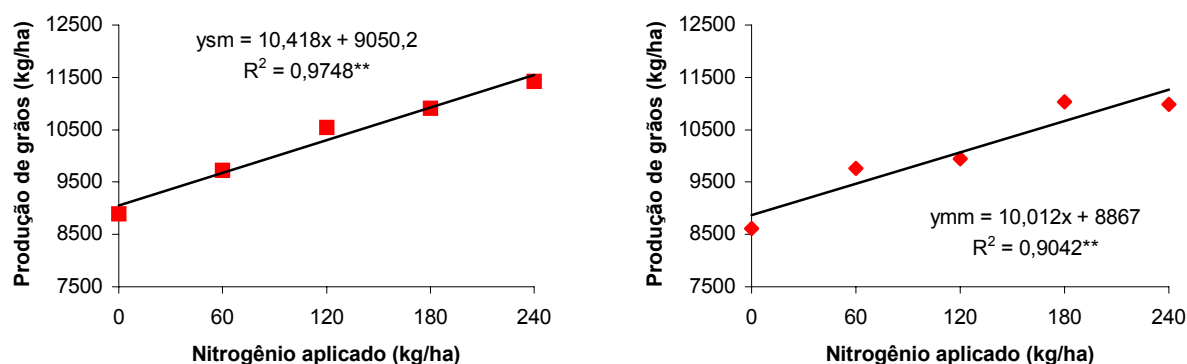
Embora a rotação de cultura não tenha afetado as produções de massa seca e grãos de milho, tanto o teor de N quanto o N extraído da matéria seca da parte aérea e dos grãos foram maiores significativamente ($P < 5\%$) quando a cultura anterior foi a soja.

Dados semelhantes foram apresentados por BUNDY et al. (1993) mostrando que a remoção de N no sistema de cultivo de milho em monocultura foi significativamente menor do que quando a cultura do milho foi semeada após a cultura da soja. Segundo os autores, esta observação dava a eles a justificativa para as maiores produtividades da cultura de milho, normalmente obtida em rotação com a soja. Segundo COPELAND et al. (1993), aparentemente existem outros fatores além do N deixado pela cultura da soja no solo, que contribuem para o aumento da produtividade do milho quando em

seqüência à cultura da soja. Para esses autores, o efeito da rotação pode estar associado a um aumento da atividade radicular da planta, resultando em maior remoção de água e nutriente do solo.

O cálculo da recuperação do fertilizante nitrogenado aplicado, feito conforme o citado em OMAI et al. (1998), indica que a utilização do N foi similar entre os sistemas utilizados. Para os dois sistemas, a recuperação média foi de aproximadamente 59% quando da aplicação de 60 kg ha^{-1} de N, diminuindo para aproximadamente 45% para a dose máxima de 240 kg ha^{-1} de N. Esses resultados estão entre os valores de 22 a 68% citados em outros experimentos que utilizaram doses de N semelhantes (COELHO et al., 1992; OMAI et al., 1998; ANDERSON et al., 1997).

Para expressar a resposta em grãos de milho à adubação nitrogenada, foi ajustada a função de produção pelo método da regressão polinomial (Figura 3).



a) rotação milho-soja-milho

b) rotação milho-milho-milho

Figura 3. Produção de grãos de milho (kg ha^{-1}) em função das doses de nitrogênio aplicadas (kg ha^{-1}).

A quantidade de N necessária para atingir 90% da produção máxima de grãos ($10.082 \text{ kg ha}^{-1}$) foi de aproximadamente 120 kg ha^{-1} de N, que é a recomendada por RAIJ et al. (1996) para produção estimada de 8.000 a $10.000 \text{ kg ha}^{-1}$ em solos que permitam à planta alta resposta a nitrogênio.

Embora o sistema de rotação tenha sido avaliado apenas por um ano, os resultados contrastam com a expectativa de maiores produtividades quando a cultura

de soja precede à do milho (PETERSON & VARVEL, 1989 e Omay et al., 1998). No entanto, em alguns estudos o resultado entre a diferença do cultivo entre a monocultura e a rotação é mais evidente em anos secos ou em condições de estresse (RAIMBAULT & VYN, 1991; RANDALL & IRAGAVARAPU, 1995), em outros, também não foram observadas vantagens do cultivo em rotação que levassem à redução da adubação nitrogenada (LORY et al., 1995).

Entre as prováveis causas que podem justificar a variação não significativa entre as produções de grãos de milho no sistema de monocultura e em rotação com a soja, estão a época e a densidade populacional da semeadura da soja, que embora tenha apresentado produtividade razoável pode ter exaurido parte do N disponível; os teores de matéria orgânica e os teores de nitrato no solo, no início do experimento, que tiveram redução significativa no tempo. Outra causa provável para a variação não significativa da produção de grãos de milho, entre a monocultura e a rotação com a cultura da soja, foi o teor elevado de nitrato dissolvido na solução do solo (equivalente a aproximadamente 80 kg ha^{-1}). Durante o experimento, houve redução significativa no teor de nitrato da solução do solo, na ordem de 82% (Figura 6).

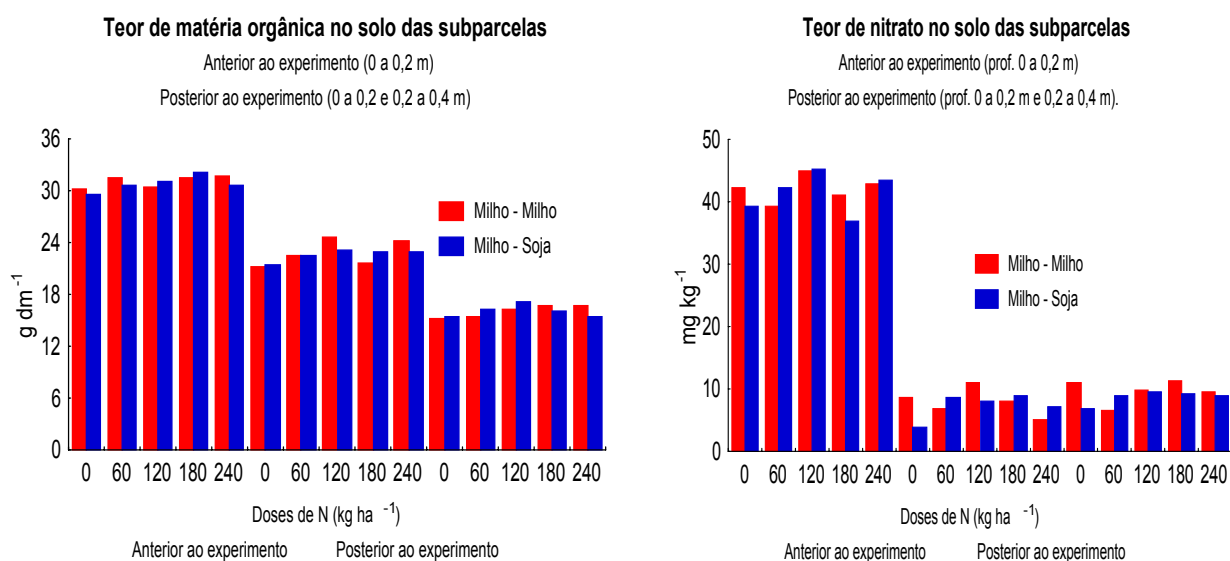


Figura 6. Teores de matéria orgânica e nitrato na semeadura e na colheita.

Com relação à matéria orgânica, não foram observadas entre as parcelas variações significativas nos seus teores, que receberam o tratamento do sistema de

rotação da monocultura ou a rotação de cultura com a soja, que pudessem refletir alguma diferença na mineralização do N orgânico do solo contido na matéria orgânica (Tabela 5). Esses resultados, de certa forma, diferem dos obtidos por POWER et al. (1986), que obtiveram aumentos significativos na mineralização do N em solos com resíduos de soja comparados com os de milho.

Tabela 5. Teor de matéria orgânica, amônio e nitrato no solo das subparcelas, no início e final do experimento.

Fator	B ⁽³⁾	Antes do experimento.			Depois do experimento					
		Prof. de 0 a 0,2 m			Prof. de 0 a 0,2 m			Prof. de 0,2 a 0,4 m		
		M.O.	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	M.O.	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	M.O.	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻
		g dm ⁻³	mg kg ⁻¹		g dm ⁻³	mg kg ⁻¹		g dm ⁻³	mg kg ⁻¹	
Doses de N (D)										
0	1	30,7 a	9,2 a	43,5 a	21,4 a	5,7 a	6,2 a	15,4 a	5,7 a	8,9 a
60	2	31,0 a	10,1 a	41,1 a	22,5 a	5,5 a	7,7 a	15,9 a	3,8 a	7,8 a
120	3	31,5 a	8,2 a	42,1 a	24,0 a	3,6 a	9,6 a	16,7 a	7,3 a	9,7 a
180	4	30,7 a	9,9 a	41,6 a	22,5 a	7,3 a	8,5 a	16,2 a	6,9 a	10,4 a
240	-	-	-	-	23,6 a	4,5 a	5,9 a	16,1 a	6,9 a	9,3 a
F (D)		0,85ns	0,94ns	1,10ns	3,14ns	1,73ns	1,85ns	0,88ns	1,23ns	0,15ns
Rotação (R)										
M ⁽¹⁾		-	-	-	22,9 a	5,0 a	7,3 a	16,0 a	5,0 a	8,8 a
R ⁽²⁾		-	-	-	22,6 a	5,6 a	7,9 a	16,1 a	7,2 a	9,6 a
F (R)		-	-	-	0,29ns	0,50ns	0,20ns	0,02ns	0,82ns	0,47ns
F(DxR)		-	-	-	0,70ns	1,02ns	0,98ns	1,46ns	1,03ns	0,65ns
C.V		4,19	30,50	7,62	7,78	57,94	58,12	6,74	50,80	44,43

⁽¹⁾ monocultura de milho; ⁽²⁾ rotação soja-milho; ⁽³⁾ blocos. Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5%. *, ** Significativos a 1 e 5% pelo teste F, ns = não significativo e, hífen = parâmetros não avaliados.

Admitindo como aceitável que são necessários 20 kg ha⁻¹ de N para produção de 1.000 kg ha⁻¹ de grãos de milho, conforme ESCOSTEGUY et al. (1997), para a quantidade de grãos produzida nas parcelas-testemunha (8.755 kg ha⁻¹), pode-se estimar que o suprimento de N do solo foi de cerca de 175 kg ha⁻¹. Desta quantidade de N, parte pode ter como origem o teor da matéria orgânica do solo, o que explicaria a produtividade elevada nas parcelas-testemunha. Resultados semelhantes foram observados por ESCOSTEGUY et al. (1997) e por Omay et al. (1998).

A causa do elevado teor de nitrato dissolvido na solução do solo geralmente é atribuída a condições climáticas e à baixa produtividade da cultura anterior (RANDALL & IRAGAVARAPU, 1995).

Na Tabela 6, são apresentadas as condições climáticas durante o período do experimento. De março a outubro de 2000, período que antecedeu o experimento, embora tenha ocorrido um volume de chuvas maior do que a média histórica na região nos últimos 10 anos, segundo os dados da Estação Meteorológica da Cooperativa dos Agricultores da Região de Orlândia (CAROL), durante a fase compreendida entre a 6ª e 10ª semana após a emergência, foram observadas temperaturas elevadas, ocorrência de geada (dias 16 e 17 de julho), escassez de umidade e o menor índice pluviométrico, durante o mês de agosto, dos últimos 10 anos. Segundo FANCELLI & DOURADO NETO (1997), na fase de desenvolvimento da cultura entre a 6ª e 10ª semana, a distribuição das chuvas e a disponibilidade de nutrientes constituem-se em fatores decisivos para a confirmação do potencial de produção e rendimento da cultura.

Na colheita (21/10/2000), como provável resultado das condições climáticas, observou-se redução significativa na produção de grãos de milho da cultura que antecedeu o experimento (5.377 kg ha^{-1}) em relação à estimativa inicialmente prevista (8.000 a $10.000 \text{ kg ha}^{-1}$), a produção de matéria seca da parte aérea da planta, menos a de grãos, foi de $15.468 \text{ kg ha}^{-1}$, e a análise de N total revelou teores de $7,7 \text{ g kg}^{-1}$.

Tabela 6. Dados meteorológicos da região e da área do experimental durante o desenvolvimento do experimento.

Ano/mês	Pluviometria		³ Temperatura			^{3,4} UR	⁵ Eto	
	¹ prec.	² irrig.	máx.	mín.	méd.		dia	mês
	mm			°C		%		mm
2000								
Fevereiro	360	0	30	21	24,5	87	4,2	116,3
Março (ss)	200	80	30	21	24,5	86	4,5	140,3
Abril	17	216	31	20	24,5	77	7,5	223,8
Maio (sm)	35	128	28	16	21,0	75	6,0	184,8
Junho (cs)	0	160	28	17	21,5	68	6,0	181,1
Julho	14	152	24	17	19,5	67	5,1	157,4
Agosto	29	128	30	18	23,0	61	5,9	181,9
Setembro	120	24	30	18	23,5	71	5,2	156,8
Outubro (cm)	130	32	34	22	27,0	62	6,1	189,5
Novembro (sm)	381	16	32	20	25,0	70	4,5	134,1
Dezembro	280	40	32	21	25,5	73	5,9	182,2
2001								
Janeiro	142	56	30	19	24,5	74	5,4	167,5
Fevereiro	108	40	29	19	24,0	76	5,2	145,9
Março	180	16	29	18	23,5	76	5,9	181,8
Abril (cm)	22	48	29	18	23,5	71	6,8	202,9

(¹) Precipitação; (²) Irrigação; (³) Dados obtidos da Estação Meteorológica da Cooperativa dos Agricultores da Região de Orlândia (CAROL); (⁴) UR = Umidade Relativa do Ar; (⁵) Evapotranspiração de referência; ss = semeadura de soja; sm = semeadura de milho; cs = colheita de soja; cm = colheita de milho.

Estudos conduzidos durante anos secos ou quando a produtividade foi baixa, têm mostrado altos teores de NO_3^- residual no solo após a colheita, com a posterior lixiviação deste nitrato residual (KLADIVKO et al., 1991; FISHER et al., 1999). Nestas condições, embora a percolação da água do solo seja mínima, a mineralização do N continua a ocorrer, havendo acúmulo de NH_4^+ antes do período das chuvas, e ocorrendo uma rápida conversão de NH_4^+ para NO_3^- no início do período úmido (MORENO et al., 1997, e HALVORSON et al., 2001).

4.2 Indicadores de planta e suas relações com a produção

Durante o desenvolvimento da cultura, foram realizadas amostragens, leituras e medições em folhas de plantas para determinar se alguma medida na planta poderia ser utilizada como indicadora para avaliar a necessidade de adubação nitrogenada adicional ou evitar a adubação excessiva.

A escolha dos possíveis indicadores teve como base o citado em ARGENTA et al. (2002) e foram considerados: concentração de N, concentração relativa de clorofila e índice de suficiência de clorofila nas folhas, e o índice de área foliar. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 7.

As doses de nitrogênio aplicadas afetaram significativamente as concentrações de N nas folhas 8 e 12. Entre a concentração de N na folha 8 nas parcelas-testemunha e nas parcelas que receberam 120 kg ha^{-1} de N, houve um acréscimo de 20,8%, enquanto, na folha 12, com as mesmas doses, o acréscimo correspondente foi de 12,0%. A menor concentração observada na folha 12 em relação à folha 8, possivelmente, é devida ao efeito da diluição. No estágio de 12 folhas desenvolvidas, segundo FANCELLI & DOURADO NETO (1997), a planta é caracterizada pela presença de 85 a 90% da área foliar além da alta taxa de crescimento do colmo, pendão e espiga. As concentrações médias de N encontradas na folha 12 estão próximas daquelas citadas por ISFAN et al. (1995), que variaram de 32 a $37,3 \text{ g kg}^{-1}$, quando as doses variaram de 0 a 200 kg ha^{-1} de N. Valores menores são citados por MALAVOLTA et al. (1989) e SCHEPERS et al. (1992) para as concentrações médias de N

encontradas na folha 12, que variam entre 27,5 e 32,5 g kg⁻¹.

Tabela 7. Teores de nitrogênio na folha, concentração relativa de clorofila, índice de suficiência (IS) e índice de área foliar (IAF), em função de dose e sistema de rotação.

Fator	Concentração de N nas folhas				Concentração relativa de clorofila nas folhas				IAF
	4	8	12	+4	8	12	IS 8	IS 12	VT
kg ha ⁻¹	----- g kg ⁻¹ -----				----- SPAD -----		----- % -----		
Doses de N (D)									
0	41,4 a	29,9 b	30,6 b	28,4 a	49,8 b	53,3 b	92	95	3,9 c
60	44,0 a	34,6 ab	33,6 ab	28,9 a	51,7 ab	54,9 a	95	98	4,2 bc
120	-	36,1 a	34,3 a	29,6 a	52,3 a	54,8 a	97	97	4,3 ab
180	-	-	35,9 a	30,1 a	-	55,1 a	-	98	4,5 a
240	-	-	-	30,6 a	-	-	-	-	4,6 a
⁽¹⁾ Ref.	-	-	-		54	56	100	100	-
F (D)	ns	7,28 **	8,74 **	3,26 *	4,78 *	9,50 **	-	-	15,38**
Rotação (R)									
M (2)	44,1 a	34,9 a	33,9 a	29,5 a	51,3 a	54,9 a	95	98	4,26 a
R (3)	43,9 a	34,1 a	33,6 a	29,5 a	51,4 a	54,5 a	95	97	4,35 a
F (R)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
F (DXR)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-	-	ns
CV %	6,79	7,05	4,20	2,90	2,61	1,23	-	-	6,97

⁽¹⁾ Como referência, foram utilizadas as leituras de plantas cultivadas em área anexa ao experimento em que se utilizaram 300 kg ha⁻¹ de N; ⁽²⁾ monocultura de milho; ⁽³⁾ rotação soja-milho. Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5%. *, ** Significativos a 1 e 5% pelo teste F, ns = não significativo, VT = Pendoamento e, hífen = Parâmetros não avaliados devido a senescência das folhas.

A concentração relativa de clorofila, em SPAD, das folhas 8 e 12, obtida com o clorofilômetro, foi afetada pela dose de N aplicada. Para a folha 8, houve diferença significativa somente entre os valores das parcelas-testemunha e das parcelas que receberam a dose de 120 kg ha⁻¹ de N, e estas não diferiram dos valores das parcelas que receberam 60 kg ha⁻¹ de N, enquanto a diferença para a folha 12 foi significativa entre os valores encontrados na parcela-testemunha e os das parcelas que receberam a dose de 60; 120 e 180 kg ha⁻¹ de N. As leituras obtidas da folha 8 apresentaram uma variabilidade maior (de 49 a 52 spads) do que as obtidos nas leituras da folha 12 (de 53 a 54 spads), conforme apresentados nas Figuras 7, que são semelhantes às faixas de suficiência sugeridas no manual do equipamento para a folha 8 (52,2 a 55,1) e para a folha 11 (52,2 a 56,3).

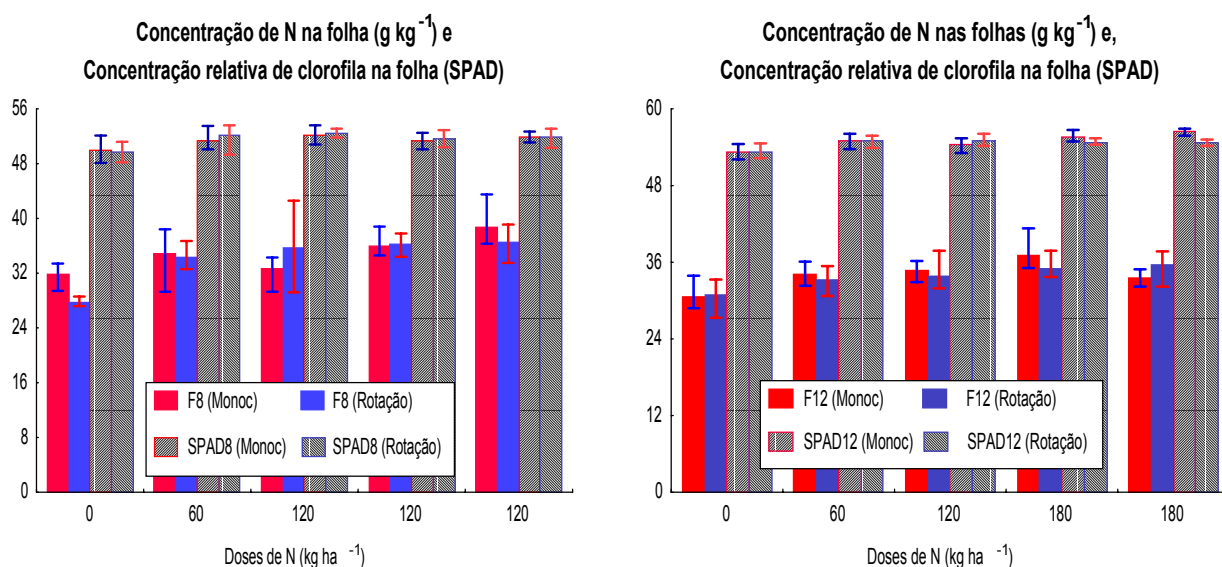


Figura 7. Concentração de N e de clorofila nas folhas 8 e 12.

Quando a regressão linear é calculado com a média dos resultados obtidos, observa-se correlação positiva e significativa entre a produção de grãos e a concentração de N nas folhas 8 ($R^2=0,91$), 12 ($R^2=0,83$); na concentração relativa de clorofila nas folhas 8 ($R^2=0,49$) e 12 ($R^2=0,85$) e no índice de área foliar ($R^2=0,86$). No entanto, esses resultados são bem menores quando a regressão é calculada com a inclusão da soma dos quadrados do resíduo (repetições) ao invés da média, conforme apresentado nas Figuras 4; 5 e 6. O valor encontrado para a concentração relativa de clorofila na folha 8 pode significar que a concentração de clorofila neste estágio de desenvolvimento da cultura pode ser mais dependente de outros fatores do que a produção de grãos. Resultados semelhantes foram obtidos por PIEKIELEK & FOX (1992) e VARVEL et al. (1997).

Neste estudo, foi utilizado, como valor crítico para indicação de resposta da cultura à adubação nitrogenada, o índice de suficiência (IS) no valor menor ou igual a 95%, conforme o sugerido em BACKMER & SCHEPERS (1995). Os resultados apresentados na Tabela 7 indicam que, tanto para a folha 8 como para a folha 12, o valor do índice de suficiência aliado à concentração relativa de clorofila nos estádios V8 e V12 foi capaz de detectar a necessidade da adubação nitrogenada complementar, conforme observado por PETERSON et al. (1993) e VARVEL et al. (1997).

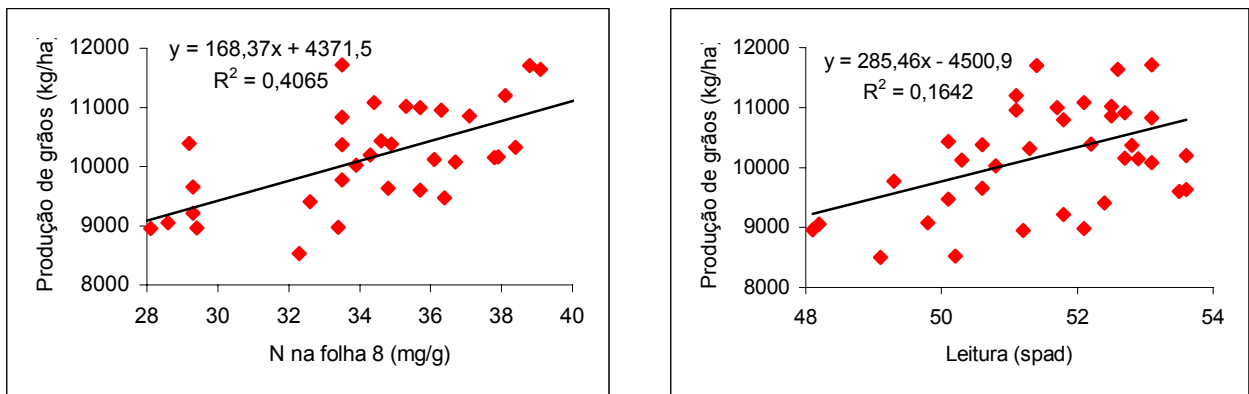


Figura 4. Produção de grãos de milho em função dos teores de N e concentração relativa de clorofila (spad) na folha 8.

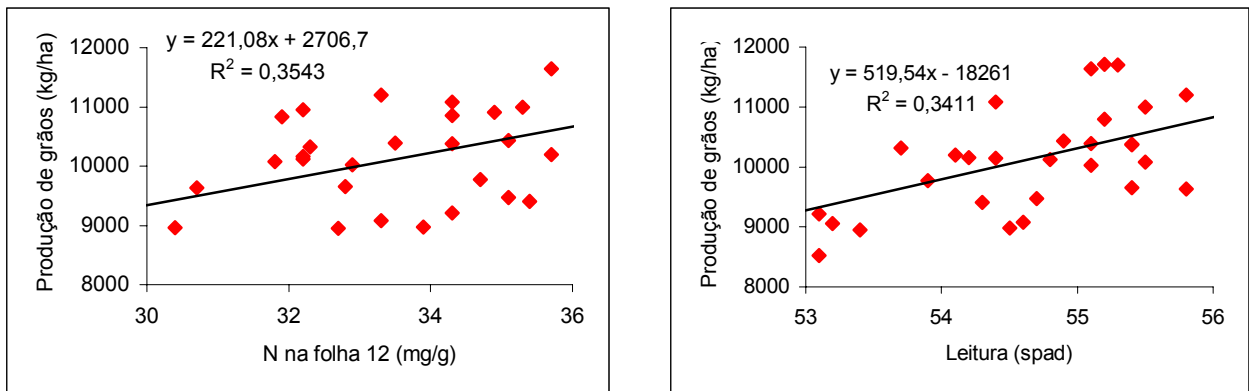


Figura 5. Produção de grãos de milho em função dos teores de N e concentração relativa de clorofila (spad) na folha 12.

O índice de área foliar (IAF), calculado com base nas medidas das folhas remanescentes no estágio de pendoamento (VT), variou, em média, de 3,9 nas parcelas-testemunha a 4,6 nas parcelas que receberam 240 kg ha^{-1} de N. A variação entre os valores encontrados encontra-se dentro dos limites (de 3 e 5) observados por FANCELLI & DOURADO NETO (1997), BOEDHRAM et al. (2001) e SÁ et al. (2002). De maneira geral, trabalhos têm sugerido correlação positiva entre a concentração de nitrogênio na folha e clorofila com a produção de grãos de milho (SCHEPERS et al., 1992; COSTA et al., 1994; ISFAN et al., 1995). Comportamento semelhante também é observado com o índice de área foliar (EIK & HANWAY, 1966, e WINTER & OHLROGGE, 1973).

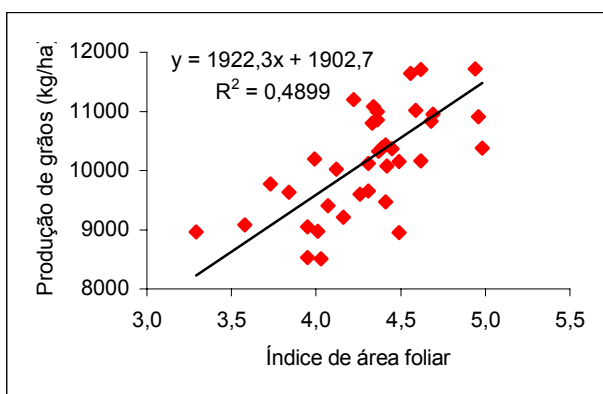


Figura 6. Produção de grãos de milho em função do índice de área foliar.

Para avaliar a participação individual de cada indicador na variação da produtividade de grãos de milho, fez-se uso do método de regressão múltipla (stepwise), que consiste na inclusão de variáveis no modelo até que a equação de regressão tenha todas as estimativas dos parâmetros ajustadas. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Coeficientes de determinação da regressão da produção em função dos indicadores de planta, valores de F e níveis de significância.

Ordem	Variáveis	R ² parcial	R ² modelo	F	prob>F
1	IAF	0,4899	0,4899	36,49	**
2	N Folha 8	0,0987	0,5886	8,87	**
3	N Folha +4	0,0697	0,6583	7,34	*
4	N Folha 12	0,0386	0,6969	4,45	*
5	SPAD 4	0,0312	0,7485	4,09	*
6	N Folha 4	0,0204	0,7173	2,45	ns

IAF = índice de área foliar; N Folhas 8, 12, e +4 = concentração de N nas folhas 8, 12, e +4; SPAD 4 = índice relativo de clorofila na folha 4, em spad. *, ** : Significativos a 1 e 5 %, pelo teste F, e ns = não significativo.

Os coeficientes de determinação sugerem que o IAF pode ser responsável por 48,9% da produção de grãos de milho e que junto ao da concentração de N na folha 8, para a região do experimento, explicam juntos, aproximadamente, 59% da variação ocorrida na produtividade.

4.3 Precipitação, drenagem e lixiviação de nitrato

Em contraste, as adversidades climáticas ocorridas antes do experimento, as condições climáticas e o desenvolvimento da cultura foram normais para a época e região, exceto para o mês de novembro (semeadura), quando o volume de chuva ultrapassou em 215 mm a média histórica da região dos últimos 10 anos.

A água recebida na área do experimento (chuva mais irrigação) e o volume captado pelos drenos, distribuídos em quatro períodos: outubro e novembro de 2000 (Período I), dezembro de 2000 e janeiro de 2001 (Período II), fevereiro e março de 2001 (Período III), e março e abril de 2001 (Período IV), estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Volumes de chuva, de água de irrigação e de água drenada, concentração e estimativa de perda de nitrato por lixiviação.

Períodos	Chuva	Irrigação	Volume drenado	Nitrato no volume drenado	
				Concentração	Lixiviado
	mm		L	mg L ⁻¹	kg ha ⁻¹
I - Out./nov.	511	48	42,0 a ^x	12,3 c	25,0 b ^x
II - Dez./jan.	422	96	22,8 ab	64,4 a	71,0 a
III - Fev./mar.	198	48	12,5 b ^x	56,6 a	34,3 ab
IV - Mar./abr.	112	56	10,9 b	30,3 b	15,9 b
Totais	1491		88,2	⁽¹⁾ 38,7	165,2
C.V. %.	-		90,2	31,9	111,8
F (Tempo - T)	-		5,18**	75,42**	5,39**
F (Dose - D)	-		0,94 ns	1,46 ns	0,69 ns
F (T x D)	-		0,55 ns	2,61 **	0,36 ns

Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si, pelo teste de Tukey, a 5 %. *, ** Significativos a 1 e 5 %, pelo teste F, ns = não significativo e, ⁽¹⁾ média ponderada.

A análise de variância dos volumes drenados (C.V = 90%) e da quantidade de nitrato lixiviado (C.V = 112%) da água captada pelos drenos entre as subparcelas sugere que embora a área seja relativamente uniforme e de pequena declividade (<1%) houve migração de água e de nitrato entre as subparcelas e, provavelmente por caminhos preferenciais devido a declividade do terreno não favorecer a erosão laminar, resultados semelhantes aos observados por KLADIVKO et al. (1991). Os coeficientes de variação são condizentes com os valores encontrados na literatura (LOCKMAN & STORER, 1990; PETTYGROVE et al., 1990).

O tempo afetou significativamente a variabilidade na drenagem entre os períodos

analisados. Durante os dois primeiros períodos (de outubro de 2000 a janeiro de 2001), foi registrado o equivalente a 72% do total de água recebida na área do experimento (2068 m^2) e 74% do total drenado nas parcelas através dos tubos de dreno (Figura 10), como era de se esperar, indicando que o volume drenado está relacionado principalmente com o volume de chuvas, conforme relatado por RANDALL & IRAGAVARAPU (1995) e por MORENO et al. (1997).

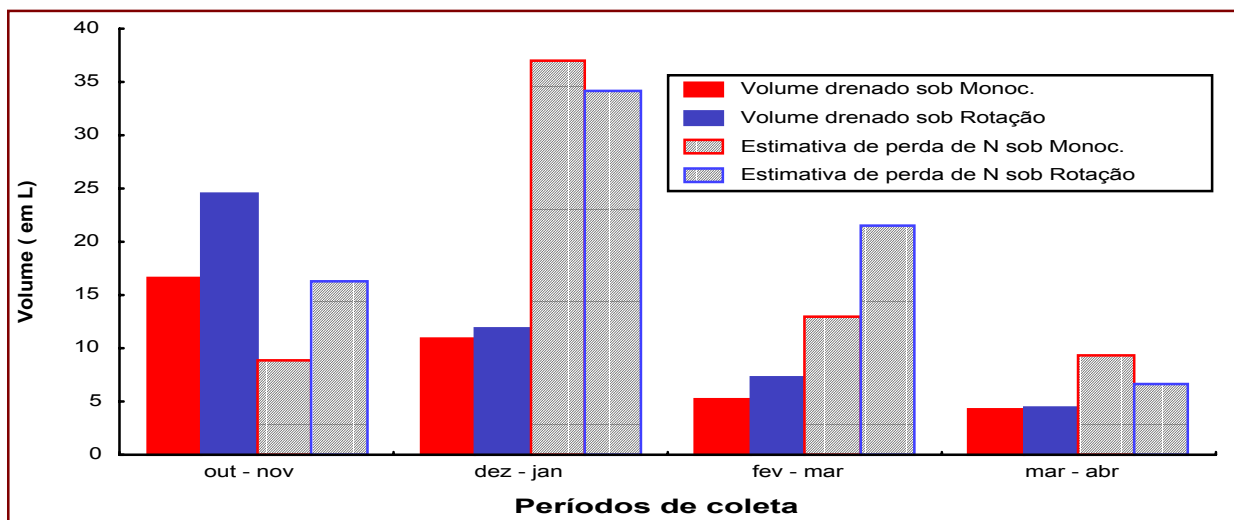


Figura 11. Variação sazonal do volume drenado e da estimativa de perda de nitrato por lixiviação

Para o período de dezembro de 2000 a março de 2001, embora não tenha sido registrado um grande volume de chuva, este período foi responsável por apresentar as maiores concentrações de nitrato na água captada pelos drenos. As concentrações para o segundo e terceiro períodos variaram de 37,6 a 109,7 e de 38,2 a 66,6 mg L^{-1} , respectivamente. O aumento da concentração de NO_3^- na água coletada dos drenos pode ter sido causado pelo efeito da interação entre dose e tempo. Neste período, foram aplicadas as doses de nitrogênio em coberturas, realizadas aos 15; 30; 46 e 57 dias após a emergência das plantas, que ocorreram aos 12 e 29 dias de dezembro (2000) e aos 15 e 26 dias de janeiro (2001). Resultados semelhantes aos obtidos por HUBBARD et al. (1984) e RANDALL & IRAGAVARAPU (1995).

A estimativa de lixiviação de nitrato variou consideravelmente como resultado do efeito combinado da concentração de NO_3^- na água e o volume de água drenado.

Embora a correlação entre a concentração de nitrato na água e a quantidade de nitrato perdida por lixiviação não tenha sido significativa ($P < 5\%$), houve correlação positiva e significativa ($P < 1\%$) entre o volume drenado e o nitrato lixiviado, como era de se esperar. Os coeficientes de correlação nos períodos considerados foram: período I ($r = 0,94$), período II ($r = 0,91$), período III ($r = 0,99$) e período IV ($r = 0,89$).

De certa forma, os resultados apresentados discordam dos obtidos por Mello Jr. et al. (1994), citados por COELHO et al. (2003). Segundo os autores, em solos sob vegetação de cerrado, o processo de nitrificação é lento, prolongando a permanência do N na forma amoniacal, o que contribuiria para a redução das perdas por lixiviação de nitrato; os mesmos autores concluem que, devido à grande estabilidade do N no solo durante o período de desenvolvimento da cultura, não há evidência de alto potencial de perda de nitrato por lixiviação neste tipo de solo. Segundo COELHO et al. (1999), a baixa intensidade de nitrificação do N e as perdas por lixiviação, em solos de textura média e argilosa, não justificam mais do que uma única adubação nitrogenada em cobertura, aos 35 ou 40 dias após a semeadura.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram as observações feitas por JOKELA & RANDALL (1989) e MAGDOFF (1991) de que a quantidade de nitrato no solo indica não somente o N disponível para as plantas, mas também o potencial de perdas por lixiviação ou denitrificação, o que demonstra a importância dos fluxos de drenagem nesse solo, refletindo na lixiviação o potencial da perda de fertilizante e nutrientes do solo, além de outras consequências ambientais.

V. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem as seguintes conclusões:

- a) O solo e o manejo adotado no experimento permitiram a obtenção de produtividades elevadas de grãos de milho, com médias de 8.755 kg ha^{-1} na testemunha (0 kg ha^{-1} de N) e $11.200 \text{ kg ha}^{-1}$ com 240 kg ha^{-1} de N, que foi a maior dose do nutriente utilizada.
- b) Um ano de utilização de programa de rotação de cultura, utilizando a soja, não apresenta efeito significativo na produção de massa seca e de grãos, e na quantidade de nitrogênio extraída pelas partes da planta.
- c) Dentre os indicadores estudados, o índice de área foliar, no pendoamento, é o mais adequado para a estimativa do potencial de produção de grãos e o índice relativo de clorofila em V8 e V12 aliados ao índice de suficiência resultaram nos melhores indicadores de resposta à adubação nitrogenada complementar.
- d) A expressiva lixiviação de nitrato (165 kg ha^{-1} de N) e a redução na concentração do nitrato no solo durante o experimento indicam a necessidade de melhor manejo da água e monitoramento do nitrato residual para tentar reduzir a lixiviação.

VI. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ADDISCOTT, T.M. Measuring and modelling nitrogen leaching: parallel problems. Plant and Soil, v.181, p. 1-6, 1996.

AITA, C.; CERETTA, C.A.; THOMAS, A.L.; PAVINATO, A.; BAYER, C. Espécies de inverno como fonte de nitrogênio para o milho no sistema de cultivo mínimo e feijão em plantio direto. Rev. Bras. Cienc. Solo, v.18, p.101-108, 1994.

ALABURDA, J.; NISHIHARA, L. Presença de compostos de nitrogênio em água de poços. Rev. Saúde Pública, v.32, n.2, p.160-5, 1998.

ALVAREZ, R.; LEMCOFF, J.H.; MAERZARI, A.H. Balance de nitrógeno em um solo cultivado com soja. Cienc. Suelo, v.13, p.38-40, 1995.

ANDERSON, I.C.; BUXTON, D.R.; KARLEN, D.L.; CAMBARDELLA, C. Cropping system effects on nitrogen removal, soil nitrogen, aggregate stability, and subsequent corn grain yield. Agron. J., v.89, p. 881-6, 1997.

ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; MIELNICZUK, J.; BORTOLINI, C.G. Parâmetros de planta como indicadores do nível de nitrogênio na cultura do milho. Pesq. Agropec. Bras., v.37, n.4, p.519-527, 2002.

BADILLO-FELICIANO, J.; LUGO-LÓPEZ, A.; SCOTT, T.W. Influence of cultivars, N levels and time of N application on plant characters, leaf composition and yield of corn grown on as oxisol. J. Agric. Puerto Rico, v.63, n.3, p.273-80, 1979.

BARRIOS, E.; KWESIGA, F.; BURESH, R.J.; SPRENT, J.I.; COE, R. Relating preseason soil nitrogen to maize yield in tree legume-maize rotations. Soil Sci. Soc. Am. J., v.62, p.1604-9, 1998.

BASSOI, L.H. Distribuição do sistema radicular do milho em Terra Roxa Estruturada Latossólica: II. Comparação entre cultura irrigada e fertirrigada. Sci. Agric., v.51, n.3, p.541-8, 1994.

BASSOI, L.H.; REICHARDT, K. Acúmulo de matéria seca e de nitrogênio em milho cultivado no período de inverno com aplicação de nitrogênio no solo e via água de irrigação. Pesq. Agropec. Bras., v.30, n.12, p.1361-73, 1995.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Nitrogênio total de um solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. Rev. Bras. Cienc. Solo, v.21, p.235-9, 1997.

BERNARDO, S. Manual de irrigação. 4. ed. Viçosa: Imprensa Universitária, UFV, 1989. 488p.

BERTOL, O.J.; FISCHER, I.I. Semeadura direta versus sistemas de preparo reduzido: efeito na cobertura do solo e no rendimento da cultura da soja. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.17, n.2, p.87-96, 1997.

BIJAY, S.; YADVINDER, S.; SEKHON, G.S.; FOLLETT, R.F.; WIERENGA, P.J. Fertilizer-N use efficiency and nitrate pollution of groundwater in developing countries. J. Contam. Hydrol., v.20, n. 3/4, p.167-84, 1995.

BINFORD, G.D.; BLACKMER, A.M.; CERRATO, M.E. Relationships between corn yields and soil nitrate in late spring. Agron. J., v.84, p.53-59, 1992.

BLACKMER, A.M.; POTTKER, D.; CERRATO, M.E.; WEBB, J. Correlations between soil nitrate concentrations in late spring and corn ields in Iowa. J. Prod. Agric., v.2, p.103-109, 1989.

BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S. Use of a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. J. Prod. Agric., v.8, p.56-60, 1995.

BOEDHRAM, N.; ARKEBAUER, T.J.; BATCHELOR, W.D. Season-long characterization of vertical distribution of leaf area in corn. Agron. J., v.93, p. 1235-42, 2001.

BÜLL, L.T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L.T., CANTARELLA, H. (Ed.) Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p.63-145.

BUNDY, L.G.; ANDRASKI, T.W.; WOLKOWSKI, R.P. Nitrogen credits in soybean-corn cropsequences on three soils. Agron. J., v.85, p.1061-67, 1993.

BUNDY, L.G.; MALONE, E.S. Effect of residual profile nitrate on corn response to applied nitrogen. Soil Sci. Soc. Am. J., v.52, p. 1377-83, 1988.

BUNDY, L.G.; WALTERS, D.T.; OLNES, A.E. Evaluation of soil nitrate tests for predicting corn nitrogen response in the North Central Region, 30p. Madison: University of Wisconsin, 1999. 30p. (Research Publication, 342).

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas: IAC, 1996. 94p. (Boletim Técnico, 106).

CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H. (Ed.). Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p.147-85.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van. Adubação nitrogenada no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO SOBRE ADUBAÇÃO NITROGENADA NO BRASIL, 1985, Ilhéus. Anais...

Ilhéus: CEPLAC/SBCS, 1985. p.47-79.

CASTRO FILHO, C.; HENKLAIN, J.C.; VIEIRA, M.J.; CASÃO JR., R. Tillage methods and soil and water conservation in southern Brazil. Soil Til. Res., v.20, p.271-283, 1991.

CERETTA, C.A.; AITA, C.; BRAIDA, J.A.; PAVINATO, A.; SALET, R.L. Fornecimento de nitrogênio por leguminosas na primavera para o milho em sucessão nos sistemas de cultivo mínimo e convencional. Rev. Bras. Cienc. Solo, v.18, p.215-20, 1994.

CERRATO, M.E.; BLACKMER, A.M. Relationships between leaf nitrogen concentrations and the nitrogen status of corn. J. Prod. Agric., v4, p.525-30, 1991.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E.; BAHIA FILHO, A.F.C.; GUEDES, G.A.A. Doses e métodos de aplicação de fertilizantes nitrogenados na cultura do milho sob irrigação. Rev. Bras. Cienc. Solo, v.16, p.61-7, 1992.

COELHO, A.M.; CRUZ, J.C.; PEREIRA FILHO, I.A. Rendimento do milho no Brasil: chegamos ao máximo? Inf. Agron., v.101, p. 1-12, 2003. Encarte técnico.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E. Seja o doutor do seu milho. n.2, Inf.Agron., v.71, p.1-24, 1995. (Arquivo de agrônomo, n.2).

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E. Nutrição e adubação do milho, 1999. Disponível em: <<http://www.cnpms.embrapa.br/deficiencia/deficiencia/html>>. Acesso em: 09 nov. 2001.

COPELAND, P.J.; ALLMARAS, R.R.; CROOKSTON, R.K.; NELSON, W.W. Corn-soybean rotation effects on soil water depletion. Agron. J., v.85, p.203-210, 1993.

COSTA, C.; IDE, F.; FRANÇA, S.; MÁRIO, J.L.; NESELLO, S.P. Relação entre doses de nitrogênio, clorofila e rendimento de grãos de milho. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 20., 1994, Goiânia. Resumos... Goiânia: ABMS, 1994. p.132.

COTRIM, C.E.; BERNARDO, S.; SEDIYAMA, G.C.; SOARES, A.A.; DENÍCULI, W. Desempenho de um sistema de irrigação do tipo pivô central de baixa pressão. ITEM: Irrig. Tecnol. Moderna, v.33, p.21-30, 1988.

CROOKSTON, R.K.; KURLE, J.E.; COPELAND, P.J.; FORD, H.J.; LUESCHEN, W.E. rotational cropping sequence affects yield of corn and soybean. Agron. J., v.83, p.108-113, 1991.

DELGADO, J.A.; FOLLETT, R.F.; SHARKOFF, J.L.; BRODAHL, M.K.; SHAFFER, M.J. NLEAP facts about nitrogen management. J. Soil Water Cons., v.53, n.4, p.332-337, 1998.

DRURY, C.F.; MCKENNEY, D.J.; FINDLAY, W.I.; GAYNOR, J.D. Influence of tillage on

nitrateloss in surface runoff and tile drainage. Soil Sci. Soc. Am. J., v.57, p.797-802, 1993.

DWYER, L.M.; STEWART, D.W. Effect of leaf age and position on net photosynthetic rates in maize (zea mays L.). Agric. For. Meteorol., v.37, p.29-46, 1986.

EIK, K.; HANWAY, J.J. Leaf area in relation to yield of corn grain. Agron. J., v.58, p.16-21, 1966.

EL-HOUT, N.M.; BLACKMER, A.M., Changes in nitrogen concentrations of corn leaves near silking time. Commun. Soil Sci. Plant Anal., v.21, n.1/2, p.169-78, 1990.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: Embrapa Solos, 1999. 412 p.

ERCOLI, L.; MARIOTTI, M.; MASONI, A.; MASSANTINI, F. Relationship between nitrogen and chlorophyll content and spectral properties in maize leaves. Eur. J. Agron., v.2, n.2, p.113-117, 1993.

ESCOSTEGUY, P.A.V.; RIZZARDI, M.A.; ARGENTA, G. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho em duas épocas de semeadura. Rev. Bras. Cienc. Solo, v.21, p.71-7, 1997.

FANCELLI, A.L.; DOURADO-NETO, D. Milho: fisiologia da produção. In: SEMINÁRIO SOBRE FISILOGIA DA PRODUÇÃO E MANEJO DE ÁGUA E DE NUTRIENTES NA CULTURA DO MILHO DE ALTA PRODUTIVIDADE, 1996, Piracicaba. Anais ... Piracicaba: Potafos, 1996. 29p.

FANCELLI, A.L.; DOURADO-NETO, D. Fenologia do milho. Inf. Agron., v.78, p.1-16, 1997. Encarte Técnico.

FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. Nitrogênio no solo. Jaboticabal: Depto. de Solos e Adubos, UNESP, 1997. 23p. (Apostila).

FISHER, M.J.; FAUSEY, N.R.; SUBLER, S.E.; BROWN, L.C.; BIERMAN, P.M. Water table management, nitrogen dynamics, and yields of corn and soybean. Soil Sci. Soc. Am. J. v.63, p.1786-95, 1999.

FAS - FOREIGN AGRICULTURAL SERVICE – United States Department of Agriculture. Disponível em: <http://www.faz.usda.gov/wap/circular/2003/03-01/wap_01-03.pdf> Acesso em 10 fev.2003.

GALLO, J.R.; COELHO, F.A.S. Diagnose da nutrição nitrogenada do milho pela análise química das folhas. Bragantia, v.22, p.537-8, 1963.

GALLO, P.B.; LAVORENTI, A.; SAWAZAKI, E.; HIROCE, R.; MASCARENHAS, H.A.A. Efeito de cultivos anteriores de soja na produção e no teor de nitrogênio das folhas e grãos de milho. Rev. Bras. Cienc. Solo, v.5, p.64-7, 1981.

GAST, R.G.; NELSON, W.W.; RANDALL, G.W. Nitrate accumulation in soils and loss in tile drainage following nitrogen applications to continuous corn. J. Environ. Qual., v.7, n.2, p.258-61, 1978.

GELBERT, K.H.; CHURCH, L.; CASEY, G.; LONDON, M.; ROERIG, D.S. Nitrate levels in drinking water in rural New York State. Environ. Res., section A, n.80, p.34-40, 1999.

GENTRY, L.E.; BELOW, F.E.; DAVID, M.B.; BERGEROU, J.A. Source of the soybean N credit in maize production. Plant Soil, v.236, p.175-184, 2001.

GEYPENS, M.; VANDENDRIESSCHE, H. Advisory systems for nitrogen fertilizer recommendations. Plant. Soil, v.181, p.31-8, 1996.

GIANELLO, C.; BREMNER, J.M. A rapid steam distillation method of assessing potentially available organic nitrogen in soil. Commun. Soil Sci. Plant Anal., v.19, n.4, p.1551-68, 1988.

GIRARDIN, P.; TOLLENAAR, M.; MULDON, J.F. The effect of temporary N starvation on leaf photosynthetic rate and chlorophyll content of maize. Can. J. Plant Sci., v.65, n.3, p.491-500, 1985.

GROVE, T.L.; RITCHEY, K.D.; NARDEMAN JUNIOR, G.C. Nitrogen fertilization of maize on an oxisol of the cerrado of Brasil. Agron. J., v.72, n.2, p.261-5, 1980.

HALVORSON, A.D.; WIENHOLD, B.J.; BLACK, A.L. Tillage and nitrogen fertilization influence grain and soil nitrogen in an annual cropping system. Agron. J., v.63, p. 836-41, 2001.

HARRIS, G.H.; HESTERMAN, O.B. Quantifying the nitrogen contribution from alfafa to soil and two succeeding crops using nitrogen⁻¹⁵. Agron. J., v.82, p.129-38, 1990.

HEINRICHS, R.; LIMA, M.G.; AMABILE, R.F.; FANCELLI, A.L. Desempenho de híbridos de milho submetidos a diferentes níveis de nitrogênio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25., 1995, Viçosa. Resumos... Viçosa: ed, 1995, v.3, p.1371.

HUBBARD, R.K., ASMUSSEN, L.E., ALLISON, H.D. Shallow groundwater quality beneath an intensive multiple-cropping system using center pivot irrigation. J. Environ. Qual., v.13, p.156 - 61, 1984.

HUNTER, R.B. Increased leaf area (source) and yield of maize in short-season areas. Crop Sci., v.20, p.571-574, 1980.

IFA - INTERNATIONAL FERTILIZER INDUSTRY ASSOCIATION, 2001 Disponível em: <<http://www.fertilizer.org/ifa/statistics/crops/fubc5ed.pdf>>. Acesso em: 9 nov. 2002.

ISFAN, D.; ZIZKA, J.; D'AVIGNON, A.; DESCHÊNES, M. Relationships between nitrogen rate, plant nitrogen concentration, yield and residual soil nitrate-nitrogen in silage corn. Commun. Soil Sci. Plant Anal., v.26, n.15/16, p.2531-57, 1995.

JEMISON, J.M.; LYTLER, D.E. Field evaluation of two nitrogen testing methods in maize. J. Prod. Agric., v.9, n.1, p.108-13, 1996.

JOKELA, E.W.; RANDALL, G.W. Corn yield and residual soil nitrate as affected by time and rate of nitrogen application. Agron. J., v.81, p.720-6, 1989.

JOKELA, E.W.; RANDALL, G.W. Fate of fertilizer nitrogen as affected by time and rate of application on corn. Soil Sci. Soc. Am. J., v.61, p.1695-703, 1997.

KARLEN, D.L.; EASH, N.S.; UNGER, P.W. Soil and crop management effects on soil quality indicators. Am. J. Altern. Agric., v.7, p.48-55, 1992.

KER, J.C.; PEREIRA, N.R.; CARVALHO, Jr., W.; CARVALHO FARIA, A. Cerrados: Solos, aptidão e potencialidade agrícola. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO NO CERRADO, 1990, Goiania. Anais... Campinas: Fundação Cargill, 1992. p.1-31.

KHAKURAL, B.R.; ALVA, A.K. Concentration of nitrate in solution as influenced by sample holding time and methods of analysis. Commun. Soil Sci. Plant Anal., v.27, n.1/2, p.101-7, 1996.

KIEHL, J.C. Distribuição e retenção da amônia no solo após aplicação de uréia. Rev. Bras. Cienc. Solo. v.13, p.75-80, 1989.

KLADIVKO, E.J.; Van SCOYOC, G.E.; MONKE, E.J.; OATES, K.M.; PASK, W. Pesticide and nutrient movement into subsurface tile drains on a silt loam soil in Indiana. J. Environ. Qual., v.20, p.264-70, 1991.

LEMAIRE, G.; GASTAL, F.N. N uptake and distribution in plant canopies. In: LEMAIER, G. (Ed.). Diagnosis of the nitrogen status in crops. Berlin: Springer, 1997. p.1-56.

LIANG, B.C.; MACKENZIE, A.F.; KIRBY, P.C.; REMILLARD, M. Corn production in relation to water inputs and heat units. Agron. J., v.83, p.794-9, 1991.

LOCKMAN, R.B.; STORER, D.A. Soil nitrate and ammonium variation with area and date sampled. Commun Soil Sci. Plant Anal., v21, p.2219-26, 1990.

LORY, J.A.; RUSSELLE, M.P.; PETERSON, T.A. Comparison of two nitrogen credit

methods: traditional vs. difference. Agron. J., v.87, p. 648-51, 1995.

MAGDOFF, F.R. Understanding the Magdoff pre-sidedress nitrate test for corn. J. Prod. Agric., v. 4, p.297-305, 1991.

MAHMOUDJAFARI, M.; KLUITENBERG, G.J.; HAVLIN, J.L.; SISSON, J.B.; SCHWAB, A.P. Spatial variability of nitrogen mineralization at the field scale. Soil Sci. Soc. Am. J., v.61, p. 1214-21, 1997.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1989. 319p.

MATTOS JUNIOR, D.; CANTARELLA, H.; RAIJ, B.VAN. Manuseio e conservação de amostras de solo para preservação do nitrogênio inorgânico. Rev. Bras. Cienc. Solo, v.19, p.423-31, 1995.

MEIRVENNE, M. van; HOFMAN, G. Spatial variability of soil nitrate nitrogen potatoes and its change during winter. Plant Soil, n.120, p.103-110, 1989.

MELGAR, R.J.; SMYTH, T.J.; CRAVO, M.S.; SÁNCHEZ, P.A. Doses e épocas de aplicação de fertilizante nitrogenado para milho em Latossolo da Amazônia Central. Rev. Bras. Cienc. Solo, Campinas, v.15, p.289-96, 1991.

MENGEL, D.B.; BARBER, S.A. Rate of nutrient uptake per unit of corn root under field conditions. Agron. J., v.66, p.399-402, 1974.

MILLER, H.F.; KAVANAUGH, J.; THOMAS, G.W. Time of N application and yields of corn in wet, alluvial soils. Agron. J., v.67, p.401-4, 1975.

MORENO, F.; CAYUELA, J.A.; FERNANDEZ, J.E.; FERNANDEZ, B.E.; MURILLO, J.M.; CABRERA, F. Water balance and nitrate leaching in an irrigated maize crop in SW Spain. Agric. Water Managen., v.32, n.1, p.71-83, 1997.

MORRIS, T.F.; BLACKMER, A.M. Survey of the nitrogen status of corn in two Iowa counties in 1988. In: ANNUAL MEETING SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 53., 1989, Las Vegas. Agronomy Abstracts... Madison: American Society of Agronomy, 1989. p.247.

OLIVEIRA, J.B.; PRADO, H. Levantamento pedológico semi detalhado do Estado de São Paulo: quadrícula de Ribeirão Preto. Campinas: EMBRAPA-IAC, 1987. 133p. (Boletim Científico, 7).

OMAY, A.B.; RICE, C.W.; MADDUX, L.D., GORDON, W.B. Changes in soil microbial and chemical properties under long-term crop rotation and fertilization. Soil Sci. Soc. Am. J.,

v.61, p.1672-78, 1997.

OMAY, A.B.; RICE, C.W.; MADDUX, L.D.; GORDON, W.B. Corn yield and nitrogen uptake in monoculture and in rotation with soybean. Soil Sci. Soc. Am. J., v.62, p.1596-603, 1998.

PETERSON, T.A.; BLACKMER, T.M.; FRANCIS, D.D.; SCHEPERS, J.S. Using a chlorophyll meter to improve N management. Nebraska: Cooperative Extension, Institute of agriculture and Natural Resources, University of Nebraska, Lincoln. 1993. p.1-4. (Nebguide G93-1171A)

PETERSON, T.A.; VARVEL, G.E. Crop yield as affected by rotation and nitrogen rate. III. corn. Agron. J., v.81, p.735-38, 1989.

PETTYGROVE, G.S.; JIAYOU, D.; WILLIAMS, J.F.; WICK, C.; HAFEZ, A.A.B.; De BOER, G. Variability of several forms of soil nitrogen in two rice fields. Commun. Soil Sci. Plant Anal., v.21, p.1843-855, 1990.

PIEKIELEK, W.P.; FOX, R.H. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. Agron. J., v.8, p.59-65, 1992.

PINTO, H.S.; ORTOLANI, A.A.; AFONSI, R. R. Estimativa das temperaturas médias mensais do Estado de São Paulo em função de altitude e latitude. Cad. Ciênc. Terra, v.23, p.1-20, 1972.

POWER, J.F.; DORAN, J.W.; WELHELM, W.W. Uptake of nitrogen from soil, fertilizer, and crop residues by no-till corn and soybean. Soil Sci. Soc. Am. J., v.50, p.137-42, 1986.

POZO, C.; CRUCES, C.; RAMOS, J.M.; MORAL, L.F.G. Depresion en el rendimiento del maiz causado por altas concentraciones de N residual en el suelo. Suelo Planta, v.4, 617-28, 1992.

RAIJ, Bernardo van. Avaliação da fertilidade do solo. 2.ed. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato, 1983. 142p.

RAIJ, B. Van; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M.E.; LOPES, A.S.; BATAGLIA, O.C. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas: Fundação Cargill, 1987. 170p.

RAIJ, VAN B. van; CANTARELLA, H. Milho para grãos e silagem. In: RAIJ, B. Van., CANTARELLA, H., QUAGGIO, J.A., FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônomo & Fundação IAC, 1996. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAIMBAULT, B.A.; VYN, T.J. Crop rotations and tillage effects on corn growth and soil structural stability. Agron. J., v.83, p.979-85, 1991.

RANDALL, G.W.; IRAGAVARAPU, T.K. Impact of long-term tillage systems for continuous corn on nitrate leaching to tile drainage. J. Environ. Qual., v.24, p.360-66, 1995.

RECK, W.R.; OVERMAN, A.R. Estimation of corn response to water and applied nitrogen. J. Plant Nutr., v.19, p.201-14, 1996.

RESENDE, M.; ALVES, V.M.C.; FRANÇA, G.E.; MONTEIRO, J.A. Manejo de irrigação e fertilizantes na cultura do milho. Inf. Agropec., v.14, p.26-34, 1990.

RODER, W.; MASON, S.C.; CLEGG, M.D.; KNIEP, K.R. Yield-soil water relationships in sorghum-soybean cropping systems with different fertilizer regimes. Agron. J., v.81, p.470-5, 1989.

ROTA, A.M. O potencial brasileiro em agricultura irrigada diante da competitividade internacional. ITEM: Irrig. Tecnol. Moderna, v.51, p.27-28, 2001.

SÁ, M.; RAMALHO, M.A.P.; SOBRINHO, F.S. Aspectos morfológicos e fisiológicos de cultivares modernos e antigos de milho. Ciênc. Agrotec., v.26, n.5, p.1082-91, 2002.

SAAD, A.M.; LIBARDI, P.L. Uso prático do tensiômetro pelo agricultor irrigante. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 1992. 27p.

SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. Análises químicas em plantas. Piracicaba: ESALQ, 1974. 55p.

SAS - STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM INSTITUTE. SAS User's Guide. Cary: 1996. 956p.

SCARSBROOK, C.E.; DOSS, B.D. Leaf area index and radiation as related to corn yield. Agron. J., v.65, p.459-61, 1973.

SCHEPERS, J.S.; MORAVEK, M.G.; ALBERTS, E.E.; FRANK, K.D. Maize production impacts on groundwater quality. J. Environ. Qual., v. 20, p.12-16, 1991.

SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D.; VIGIL, M.; BELOW, F.E. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. Commun. Soil Sci. Plant Anal., v.23, p.2173-187, 1992.

SCHULTE, E.E.; BUNDY, L.G. Sampling soils for testing under conservation tillage. Better Crops Plant Food, v.69, n.20, p.22-23, 1985.

SEXTON, B.T.; MONCRIEF, J.F.; ROSEN, C.J.; GRUPTA, S.C.; CHENG, H.H.

Optimizing bitrogen and irrigation inputs for corn based on nitrate leaching and yield on a course-textured soil. J. Environ. Qual., v.25, p.983-992, 1996.

SILVA, F.C. et al. Análises químicas para avaliação da fertilidade do solo. In: SILVA, F.C. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília: EMBRAPA, 1999. 370p.

STEWART, D.W.; DWYER, L.M. Mathematical characterization of leaf shape and area of maize hybrids. Crop Sci., v.39, n.2, p.422-7, 1999.

TEIXEIRA, L.A.J.; TESTA, V.M.; MIELNICZUK, J. Nitrogênio no solo, nutrição e rendimento de milho afetados por sistemas de culturas. Rev. Bras. Cienc. Solo, v.18, p.207-14, 1994.

TOLLENAAR, M.; AQUILERA, A. Radiation use efficiency of an old a new maize hybrid. Agron. J., v.84, p.536-41, 1992.

TORBERT, H.A.; REEVES, D.W.; MULVANEY, R.L. Winter legume cover crop benefits to corn: Rotation vs. fixed-nitrogen effects. Agron. J., v.88, p.527-35, 1996.

UHART, S.A.; ANDRADE, F.H. Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. Crop. Sci., v.35, p.1376-83, 1995.

USEPA - UNITED STATE ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 1992. Annual needes survey. USEPA. Office of Water. Washington, D.C.

VANOTTI, M.B.; BUNDY, L.G., Corn nitrogen recommendations based on yield response data. J. Prod. Agric., v.7, n.2, p.249-56, 1994.

VANOTTI, M.B.; BUNDY, L.G. Soybean effects on soil nitrogen availability in crop rotations. Agron. J., v.87, p.676-80, 1995.

VARVEL, G.E.; KLOCKE, N.L.; WILHELM, W.W. Corn-soybean rotation effects on soil and plant N indices. In: CLEAN WATER, CLEAN ENVIRONMENT, 21ST CENTURY: Team agriculture, working to protect water resources. 1995. p. 235-8.

VARVEL, G.E.; SCHEPERS, J.S.; FRANCIS, D.D. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. Soil Sci. Soc. Am. J., v.61, p.1233-9, 1997.

WASKOM, R.M.; WESFALL, D.G.; SPELLMAN, D.E.; SOLTANPOUR, P.N. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. Commun. Soil Sci. Plant Anal., v.27, n.3-4, p.545-60, 1996.

WENDLAND, F.; ALBERT, H.; BACH, M.; SCHMIDT, R. Potential nitrate pollution of groundwater in Germany: A supraregional differentiated model. Environ. Geol. v.24, p.1-6, 1994.

WIENHOLD, B.J.; TROOIEN, T.P.; REICHMAN, G.A. Yield and nitrogen use efficiency of irrigated corn in the Northern Great Plains. Agron. J., v.87, p.842-6, 1995.

WINTER, S.R.; OHLROGGE, A.J. Leaf angle, leaf area and corn (zea mays L.) yield. Agron. J., v.65, p.395-7, 1973.