

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA
CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE TRIGO - CNPT

ADUBAÇÃO NITROGENADA NO SISTEMA PLANTIO DIRETO

S. Wiethölter

Passo Fundo, RS
1996

ADUBAÇÃO NITROGENADA NO SISTEMA PLANTIO DIRETO⁽¹⁾

S. Wiethölter⁽²⁾

1. Introdução

Durante milhares de anos as plantas cresceram, morreram e foram decompostas. Este ciclo de crescimento, morte e decomposição de plantas auxiliou na formação da camada superficial do solo. Os resíduos das plantas retornaram os nutrientes absorvidos ao solo, formando uma camada rica em matéria orgânica. Este foi o trabalho da natureza.

O sistema plantio direto, na sua essência, é uma forma de conduzir a produção de alimentos utilizando analogia com a natureza. Vastas regiões do sul do país eram cobertas pela vegetação específica dos assim denominados campos nativos ou de mata nativa. A vegetação de campo nativo mantém o ano todo uma cobertura completa do solo, mas, devido a baixa fertilidade destes solos sob os aspectos químicos, proporciona baixos rendimentos de forragem. Durante cerca de um século, parte dos solos no Planalto do Rio Grande do Sul foram lavrados, gradeados e semeados com diversas culturas e, muitas vezes, a palha foi incinerada para facilitar as operações do assim chamado preparo convencional do solo. No entanto, olhando para as condições originais destes solos, observa-se que este sistema de manejo do solo não tem semelhança com o sistema natural proporcionado pela pastagem nativa. Desta forma, a semeadura de culturas diretamente, sem o preparo do solo e a manutenção da resteva da cultura anterior na superfície, constitui uma simulação de uso do solo que a própria natureza realizou por milhares ou milhões de anos. Assim, o chamado sistema plantio direto se constitui numa simulação do sistema criado pela natureza, qual seja o de manter o solo permanentemente coberto, ou com plantas (a vegetação da pastagem nativa na primavera e verão) ou com palha (parte aérea da pastagem nativa morta pela geada no outono e, principalmente, no inverno). Portanto, o que o agricultor realiza hoje no sistema plantio direto é semelhante: ele cultiva o solo continuamente com espécies produtoras de grãos, ou, então, cultiva espécies que objetivam cobertura do solo e fixação de N e produção de palha para cobrir o solo na safra seguinte, fechando-se, assim, o sistema e a imitação da natureza que extensas áreas de campos nativos ou de mata apresentavam.

Um dos aspectos de grande importância para o sucesso do sistema plantio direto é a adubação do solo, ou seja, a adição de nutrientes que se apresentam no solo em insuficiente quantidade quimicamente disponível para o adequado desenvolvimento das plantas. Dos 16 elementos essenciais às plantas (Tabela 1), o nitrogênio e o potássio são os nutrientes absorvidos em maior quantidade pela maioria das culturas. Em adição, a maioria dos solos apresentam deficiência de N em relação a demanda das culturas, pelo menos durante certa

⁽¹⁾Apostila para a Disciplina de Fertilidade do Solo, Curso de Pós-graduação Lato Sensu no Sistema Plantio Direto, Faculdade de Agronomia, Universidade de Passo Fundo.

⁽²⁾Pesquisador, EMBRAPA-Centro Nacional de Pesquisa de Trigo, Caixa Postal 569, 99001-970 Passo Fundo, RS. Bolsista do CNPq.

fase de desenvolvimento das plantas. Devido as transformações biológicas e químicas que o N está sujeito no solo e que podem alterar significativamente a quantidade disponível deste elemento às plantas, o entendimento dos diversos processos que ocorrem é fundamental para tornar o manejo de N adequado em termos econômicos e ambientais.

Objetiva-se neste trabalho descrever os principais processos pelo qual o N sofre transformações na sua forma química no solo e como utilizar esta informação no uso deste nutriente no sistema plantio direto.

Tabela 1. Forma química de absorção e concentração dos nutrientes nas plantas e na matéria orgânica do solo

Elemento	Forma química em que é absorvido	Teor na matéria seca das plantas ⁽¹⁾	Teor na matéria orgânica do solo ⁽²⁾
Macronutrientes			
Carbono ⁽³⁾	CO ₂	~ 44 %	50-58 %
Oxigênio ⁽³⁾	H ₂ O e O ₂	~ 44 %	39 %
Hidrogênio ⁽³⁾	H ₂ O	~ 6 %	5 %
Nitrogênio	NO ₃ ⁻ e NH ₄ ⁺	1,0-4,0 % ⁽⁴⁾	5 %
Potássio	K ⁺	0,5-6,0 %	1 %
Cálcio	Ca ²⁺	0,2-3,5 %	-
Fósforo	H ₂ PO ₄ ⁻ e HPO ₄ ²⁻	0,1-0,8 %	0,5 %
Magnésio	Mg ²⁺	0,1-0,8 %	-
Enxofre	SO ₄ ²⁻	0,05-1,0 %	0,5 %
Micronutrientes			
Cloro	Cl ⁻	100-10.000 mg kg ⁻¹	-
Ferro	Fe ²⁺	25-300 mg kg ⁻¹	-
Manganês	Mn ²⁺	15-800 mg kg ⁻¹	-
Zinco	Zn ²⁺	15-100 mg kg ⁻¹	-
Boro	BO ₃ ⁻ e B ₄ O ₇ ²⁻	5-75 mg kg ⁻¹	-
Cobre	Cu ²⁺	4-30 mg kg ⁻¹	-
Molibdênio	MoO ₄ ²⁻	0,1-0,5 mg kg ⁻¹	-

⁽¹⁾Raven et al. (1981, p.541).

⁽²⁾Schnitzer (1982, p.581-582); Barber (1984, p.20).

⁽³⁾Na fotossíntese, em que são formados os carboidratos, H₂O + CO₂ → C(H₂O)_n + *O₂, o O₂ liberado para a atmosfera provém do H₂O e não do CO₂

⁽⁴⁾O trigo no estágio de afilamento geralmente contém de 5,0 a 5,5 % de N. Folhas de soja fisiologicamente maduras podem conter o mesmo teor.

Obs: O cobalto é absorvido na forma de Co²⁺ e encontra-se em quantidades traço nas plantas e é essencial para os microorganismos fixadores de N. O sódio é absorvido na forma de Na⁺ e em quantidades traço e é usado no balanço iônico das plantas, mas não é essencial para a maioria das espécies.

2. Transformações de N no solo

a) O ciclo de N no solo

Ganhos de N no solo ocorrem através da fixação de N_2 molecular pelos microorganismos livres (*Azotobacter*, *Clostridium*) e simbióticos (*Rhizobium*) e pelo retorno de nitrato (NO_3^-) na água da chuva (vide Equações [26], [27] e [28] do Anexo I). Perdas de N ocorrem pela remoção das culturas, pela lixiviação e pela volatilização. A conversão de N_2 para formas combinadas ocorre através da **fixação biológica** de N_2 . Por sua vez, as formas orgânicas são convertidas em NH_4^+ e em NO_3^- pelo processo denominado **mineralização**. A conversão para NH_4^+ é denominado **amonificação**; a oxidação deste composto para NO_3^- é designado por **nitrificação**. A utilização de NH_4^+ e de NO_3^- pelas plantas e por microorganismos do solo constitui **assimilação** e **imobilização**, respectivamente. O N combinado é novamente devolvido à atmosfera como óxido nitroso (N_2O) e N_2 molecular através da **denitrificação** biológica, completando, assim, o ciclo de N na natureza (Stevenson, 1986, p.106; Barber, 1984, p.184).

b) A matéria orgânica como fonte de N

A matéria orgânica (MO) do solo pode ser dividida em substâncias húmicas e não húmicas. A fração **não húmica** é facilmente atacada pelos microorganismos, desaparecendo rapidamente e é constituído de substâncias ainda quimicamente caracterizáveis, como: carboidratos, proteínas, amino ácidos, gorduras, ceras e ácidos orgânicos de baixo peso molecular. Substâncias **húmicas** constituem a maior parte da matéria orgânica (65 a 75 %, constituído de ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e humina) e são decompostas lentamente. São compostos orgânicos complexos, amorfos, hidrófilos (grande afinidade por água), ácidos, parcialmente aromáticos e com peso molecular variando de algumas centenas a vários milhares de gramas/mol. A composição da matéria orgânica do solo, conforme indicado na Tabela 1, com base em peso, é aproximadamente a seguinte: 50 % C, 5 % N, 0,5 % P, 0,5 % S, 39 % O e 5 % H. A capacidade de troca de cátions da matéria orgânica varia de 100 a 400 cmol_c/kg (Schnitzer, 1982, p.581-582; Barber, 1984, p.20). No caso do teor de C do solo, que é utilizado por alguns laboratórios do país, geralmente se considera como sendo 58 % da matéria orgânica, obtendo-se, assim, o fator van Bemmelen, de 1,724, para converter teor de C em teor de MO (Nelson & Sommers, 1982, p.561). Porém, solos diferentes apresentam diferentes tipos de matéria orgânica e o fator pode variar. Assim, para matéria orgânica estável o fator é 1,80, para matéria orgânica em decomposição, 1,85 e para material foliar, 1,89 (Hesse, 1971, p.209).

Cerca de 93 a 97 % do N existente na camada arável do solo ocorre em compostos orgânicos. Os restantes 3 a 7 % podem ser considerados como amônio (NH_4^+) fixado pelas argilas, pois os argilo-minerais fixam NH_4^+ a semelhança de K^+ , uma vez que estes íons possuem raio iônico de dimensões equivalentes na forma desidratada (Stevenson, 1986,

p.193). Supondo que um solo contenha 3 % de matéria orgânica (60.000 kg MO/ha) e que esta apresente 5 % de N (Barber, 1984, p.180) e 58 % de C (Stevenson, 1986, p.45), uma camada de 17 a 20 cm ($\sim 2 \times 10^6$ kg) conterá 3.000 kg N/ha e 34.800 kg C/ha (relação C/N = 11,6). Porém, apenas traços desta quantidade de N estarão nas formas disponíveis de NO_3^- e NH_4^+ , pois, a soma de N destas formas raramente passa de 30 kg/ha (15 mg N/L) nos nossos solos nos primeiros 20 cm de solo, ou seja, menos de 1 % do total de N está disponível para as plantas numa determinada safra. Stevenson (1986, p.167) indica que menos de 0,1 % do N total do solo existe a qualquer momento como NO_3^- e NH_4^+ . Desta forma, apenas poucos kg/ha do total de N no solo estão disponíveis para as plantas.

Os teores de NO_3^- solúvel e de NH_4^+ trocável no solo variam muito durante o ano, e são muito afetados pela temperatura e pela precipitação pluviométrica. Em geral, o teor é menor no inverno devido a menor temperatura mas também devido a possibilidade de lixiviação. Na primavera, devido ao aumento da temperatura e da taxa de mineralização da matéria orgânica e dos resíduos, o teor aumenta (é comum observar visualmente este fato no Planalto do Rio Grande do Sul na cultura do trigo e da cevada em particular em que as plantas amareladas tornam-se verdes). Já no verão, a taxa de decomposição dos resíduos e da matéria orgânica é alta em função da temperatura, mas, por outro lado, o crescimento das plantas é intenso e o NO_3^- e o NH_4^+ gerados são rapidamente absorvidos pelas plantas e pouca lixiviação ocorre (Wiethölter, 1992, p.96). Desta forma, os teores de NO_3^- e de NH_4^+ no solo representam um delicado balanço entre mineralização e imobilização por microorganismos e por plantas e o processo, no conjunto, é afetado pela atividade dos microorganismos (dependente da umidade e da temperatura) e pela relação C/N dos resíduos culturais (Stevenson, 1986, p.168)

O N na forma inorgânica ocorre no solo principalmente como íons NO_3^- e NH_4^+ ; em alguns solos com pH alto, pequenas quantidades de nitrito (NO_2^-) podem ocorrer. No entanto, NO_3^- é geralmente a forma principal, uma vez que o processo de nitrificação promovido pelos microorganismos converte NH_4^+ em NO_3^- (Barber, 1984, p.180).

c) Mineralização, imobilização e volatilização de N

A maior parte do N na matéria orgânica está na forma de grupos NH_2 . Os compostos orgânicos contendo N são principalmente aminoácidos (20 a 50 %) e hexoaminas (5 a 10 %). Desta forma, aproximadamente metade dos compostos nitrogenados são de origem desconhecida. De outra parte, o N orgânico pode ser dividido em uma fração que pode sofrer **mineralização** imediata e uma fração estável (húmica), sendo que a fração prontamente mineralizável é geralmente menos que 1/3 do total (Barber, 1984, p.180).

A suposição de que de 1 a 3 % do N da matéria orgânica é mineralizado durante uma safra e estará disponível às plantas, deve ser encarada com atenção, pois o teor de húmus no

solo na maioria dos solos está num estado de quase-equilíbrio (ou estado constante, estacionário, contínuo, estável ou steady state), ou seja, o seu conteúdo não varia significativamente de um ano para o outro. O teor total de N nos solos é dependente dos mesmos fatores que afetam o teor de matéria orgânica do solo, entre os quais os fatores que influenciaram a intemperização do solo ao longo do tempo, como por exemplo, o clima, a topografia, a vegetação (campo ou mata), o material de origem (basalto, granito, arenito, etc) e a idade do solo. É bem conhecido o fato de que o teor de matéria orgânica do solo declina rapidamente nos primeiros anos de cultivo de um solo, especialmente aquele cuja vegetação era de mata nativa, atravessando, assim, o estado denominado transitório, variável ou transient state. Após este declínio inicial, estabelece-se um novo estado estável ou de equilíbrio, profundamente dependente do sistema de cultivo do solo. Assim sendo, a eficiência em manter as reservas de N no solo é uma função da dose, do tipo e do teor de N (e da relação C/N) de resíduos orgânicos aplicados, além da forma de incorporação ou da manutenção na superfície do solo dos restos culturais. Fatores climáticos, como temperatura e umidade do solo, são igualmente importantes, pois estes afetarão a taxa de decomposição dos resíduos culturais bem como o excesso de umidade pode promover a lixiviação de N mineral (Stevenson, 1986, p.193).

No estado contínuo, a quantidade de N liberada durante o ano (e que é comumente recuperada na porção colhida das culturas, é lixiviada ou é perdida por desnitrificação) é contrabalanceada pela **imobilização** de N de outras fontes no húmus recém formado. Desta forma, uma liberação líquida anual só ocorre quando o teor de MO está declinando, uma condição que deve ser evitada, pois esta geralmente conduz a uma redução da capacidade produtiva do solo (Stevenson, 1986, p.94). Neste sentido, quando ocorre um aumento do teor de MO no solo no sistema plantio direto poder-se-ia esperar um aumento da disponibilidade de N. Mas, por outro lado, **um aumento do teor de MO também significa um aumento de N imobilizado no solo**. Por esta razão, durante os primeiros anos de estabelecimento do plantio direto, pode-se verificar uma demanda um pouco maior de N (Cantarella, 1993, p.172) e, algum tempo após, quando o solo atingiu um novo patamar de MO (e de N), a demanda de N se estabiliza novamente, a não ser que os tetos de rendimento e de exportação de N do sistema tenham sido alterados significativamente (Thomas & Frye, 1984, p.91-97). A solução mais lógica para incorporar N no solo é a utilização sistemática de leguminosas na sucessão de culturas.

Em experimento conduzido durante 7 anos, comparando os sistemas convencional e plantio direto, Salet (1994, p.49) verificou, na camada de 0 a 5 cm, que o sistema plantio direto apresentava um teor total de N de 1281 kg/ha e o sistema convencional 760 kg N/ha, demonstrando, assim, a imobilização de N no sistema plantio direto ocorrida ao longo do tempo. Diferenças entre os dois sistemas também ocorreram nos teores de $N-NO_3^-$ e $N-NH_4^+$ do solo, na camada de 0 a 5 cm. Durante os meses de novembro e de dezembro o sistema plantio direto apresentou teores maiores, mas após a aplicação de N os teores foram maiores no sistema convencional. De outra parte, Sá (1993, p.44) indica que após 10 anos de condução de um experimento, os teores de $N-NO_3^-$ e $N-NH_4^+$ do solo durante 10

semanas, na camada de 0 a 7 cm, foram cerca de três vezes superior no sistema plantio direto do que no sistema convencional. Nas camadas inferiores do solo as diferenças entre os sistemas foram menores, denotando a importância da atividade biológica na superfície do solo na decomposição dos resíduos culturais no sistema plantio direto.

Um outro aspecto a considerar é a possibilidade de **volatilização** de N, nas formas de NH_3 , N_2O e N_2 . Como no sistema plantio direto os resíduos culturais permanecem na superfície do solo, a decomposição deste material ocorre principalmente na interface solo-palha. O N liberado destes resíduos, numa instância inicial fica em contato com uma fina camada de solo e, o processo de evaporação sendo intenso, pode promover volatilização de N (Phillips & Young, 1973, p.152). Por outro lado, os fertilizantes nitrogenados são colocados na superfície do solo e, na transformação química destes, podem ocorrer perdas de NH_3 , como por exemplo da uréia. Estas perdas são potencialmente maiores quando a aplicação é feita na superfície de solo seco (Bouwmeester et al., 1985), de pH alcalino (Stumpe et al., 1984), de baixa capacidade de troca de cátions (Anjos & Tedesco, 1974, 1976; Vlek & Craswell, 1979; Keller & Mengel, 1986) e de baixa capacidade tampão de H^+ (Ferguson, et al., 1984). No entanto, quando a aplicação é feita imediatamente antes de um chuva de 25 mm as chances de volatilização de NH_3 praticamente inexistem (Keller & Mengel, 1986). Conforme indicado na Equação [20], havendo contínua retirada de OH^- do ambiente de reação da uréia, a reação tende para a direita e NH_3 não é acumulado. Isto ocorre nos solos que são ávidos por OH^- , ou seja nos solos ácidos. Mas, alguma atenção deve ser dada para os solos nos quais foi aplicado calcário na superfície em quantidades exageradas, pois o ambiente de reação da uréia poderia ocorrer em solo alcalino e, nestas condições, o potencial de volatilização de NH_3 poderia crescer, conforme previsto na Equação [24].

d) Reciclagem de N ao longo do tempo

O tempo médio de residência de N (usando o isótopo ^{15}N) aplicado como fertilizante numa determinada cultura é de aproximadamente 5 anos. Devido ao processo de humificação, o N que permanece ainda no solo após este período inicial terá um tempo de residência de cerca de 25 anos. Após este período o tempo de permanência é o mesmo que o N contido no húmus já presente no solo, que é estimado em 200 a 800 anos. Desta forma, depreende-se que somente uma pequena quantidade de N permanecerá no solo por um longo período (Stevenson, 1986, p.193), ocorrendo uma contínua reciclagem.

e) Demanda de N no sistema plantio direto

Considerando que no sistema plantio direto os resíduos das culturas são mantidos na superfície do solo e são muito pouco misturados com o mesmo, a taxa de decomposição destes resíduos é menor do que se fossem incorporados, como no sistema convencional de preparo do solo (Parker, 1962; Brown & Dickey, 1970). Isto afeta negativamente a disponibilidade de N para as plantas no sistema plantio direto. A absorção de N pelas plantas nos dois sistemas é equivalente por unidade de produto colhido, ou seja, a eficiência de

utilização de N pelas plantas é similar. Se os rendimentos nos dois sistemas são idênticos, então não haverá demanda diferenciada de N (Thomas & Frye, 1984, p.91). Este é um fato comum observado nos experimentos conduzidos no Centro Nacional de Pesquisa de Trigo (CNPT), em Passo Fundo, RS (Denardin, 1995), envolvendo as culturas de cevada (11 safras), soja (11 safras) e milho (5 safras), bem como em outros locais (Kochhann, 1990), em que os rendimentos são iguais ou 10 % superiores no sistema plantio direto. Porém, para condições de lavoura (Hayes, 1982, p.75) e na região do Planalto do Rio Grande do Sul, muitas vezes se considera que o sistema plantio direto apresenta uma produção cerca de 10 % superior ao sistema convencional ou mínimo de preparo do solo. Nestas circunstâncias, a demanda de N será 10 % superior ao sistema convencional. Porém, devido a menor taxa de decomposição da resteva, pelo menos nos períodos iniciais de implantação do sistema plantio direto, poder-se-ia considerar que, neste caso, a demanda de N poderia ser maior que 10 % em relação ao sistema convencional (de 20 a 25 %; segundo Phillips & Young, 1973, p.152), especialmente se a cultura anterior for uma gramínea e a quantidade de resteva for elevada. No entanto, uma vez tendo atingido um novo equilíbrio de formação e de decomposição de MO, as demandas nos dois sistemas devem tornar-se equivalentes ou menores para o sistema plantio direto (Campbell et al. 1993), conquanto os rendimentos sejam similares.

Se, pois, um dos objetivos básicos do sistema plantio direto é favorecer o aumento do teor de MO (ou de C) do solo e, em havendo imobilização de N nos estágios iniciais, então também haverá fixação de C (carbon sequestering), o que torna o sistema plantio direto apropriado para atender a uma das principais demandas globais, que é reduzir a tendência crescente de aumento do teor de CO₂ da atmosfera, causado pela combustão de combustíveis fósseis. No entanto, ao ocorrer fixação de C no solo também ocorrerá fixação de O, pois, de acordo com a Tabela 1, a matéria orgânica do solo contém 39 % de O. Porém, as plantas contém 44 % de C e de O (Tabela 1). Portanto, toda vez que palha é incorporada no solo haverá uma liberação de 5 % de O para a atmosfera e o C da planta concentra-se de 44 para 50 a 58 % na matéria orgânica do solo. Desta forma, a matéria orgânica do solo se constitui num importante sistema de concentração de C, que as plantas extraíram do ar e entregaram para o solo. Assim, ao enriquecer em 1 % o teor de matéria orgânica de um solo nos primeiros 20 cm, estar-se-á acrescentando a este solo cerca de 10 t de C/ha e 1 t de N/ha (5 % de N na matéria orgânica, Tabela 1). Depreende-se, pois, que incrementar o teor de matéria orgânica de um solo é um tarefa contínua e que levará muitos anos para ser obtida.

f) Lixiviação de NO₃⁻

No sistema plantio direto, devido a redução do escoamento superficial de água e da erosão do solo, um volume maior de água tende a infiltrar em relação ao sistema de preparo convencional. Desta forma, poder-se-ia esperar uma perda maior de N (e de outros nutrientes) pelo processo de lixiviação.

Em geral a lixiviação de NO_3^- é favorecida quando a precipitação é maior que a evapotranspiração de água. Por outro lado, quando as plantas estão no estágio inicial de desenvolvimento em um solo bem coberto com resíduos culturais, a evaporação é menor no sistema plantio direto do que no sistema convencional (Thomas & Frye, 1984, p.92), podendo haver menor perda de N por volatilização (Phillips & Young, 1973, p.152). De outra parte, quando um solo é manejado no sistema sem-preparo por alguns anos, os macroporos e galerias formados por insetos não são mais quebrados antes da semeadura de cada cultura. A água da chuva tende, assim, a se infiltrar por estes poros em vez de permear todo o volume do solo. Em consequência, chuvas de alta intensidade podem promover lixiviação de NO_3^- no sistema plantio direto, enquanto que no sistema convencional talvez não ocorra nenhuma lixiviação devido a menor velocidade de movimentação da água no perfil do solo (Thomas & Frye, 1984, p.93).

Durante o desenvolvimento das culturas, a lixiviação de N para camadas de solo fora do alcance das raízes é de pouca importância, pois o NO_3^- e o NH_4^+ , provenientes do processo de mineralização da matéria orgânica, dos resíduos culturais ou dos fertilizantes, é continuamente absorvido pelas raízes das plantas. De outra parte, toda vez que ocorre um movimento descendente de água no solo, alguma quantidade de NO_3^- é transportada junto com a água, uma vez que o ânion NO_3^- não é adsorvido pelas partículas do solo, sendo seu movimento no solo seguido pelo movimento da água, tanto na direção descendente como na ascendente no perfil. Deve ser considerado também que nos interstícios de muitos macro ou microporos pode estar ocorrendo liberação de NO_3^- mas a água da chuva nem sempre permeia todos os agregados a tal ponto de lixiviar todo o NO_3^- presente no solo num determinado momento. Estes micro-sítios do solo que não são penetrados pela água da chuva de forma rápida, podem, no entanto, conter raízes e neles estar ocorrendo absorção de N. Desta forma, a quantidade de N lixiviada nem sempre é significativa para o balanço do N no sistema, pelo menos durante o período de desenvolvimento das plantas. As Figuras 1 a 7 (Wiethölter, 1992, p.25-31, 91-94, 118-123), demonstram que a lixiviação de NO_3^- é muita baixa nos períodos de desenvolvimento de trigo, de aveia e de soja, cultivados em lisímetros. Porém, durante os períodos de pousio, especialmente após a colheita da soja, as perdas podem variar de 19 (baixa precipitação e plantas colhidas na maturação, 3/5/91-12/8/91, 102 dias, Figura 6) a 73 kg N/ha (alta precipitação e plantas colhidas na floração, 22/2/90-20/7/90, 149 dias, Figura 3). As perdas foram maiores nos primeiros 60 dias após a colheita da soja. Desta forma, torna-se evidente que a contínua cobertura verde do solo é um fator importante em termos de preservação do N no sistema de produção, fazendo com que o N dos resíduos culturais seja reciclado e mantido na camada superficial do solo, em vez de se perder para camadas fora do alcance das raízes. Diante dessa constatação, torna-se importante que toda vez que o intervalo entre duas culturas seja superior a 30-40 dias que uma cultura de cobertura temporária do solo seja semeada, com o único intuito de fazer com que o NO_3^- residual seja incorporado em plantas e que estas ao serem decompostas liberem N para a próxima cultura. Isto é especialmente importante após a cultura da soja,

mas pode ser importante também após a cultura do milho, uma vez que a decomposição das folhas de milho é rápida e há liberação de N. A medida que partes da resteva de milho de menor taxa de decomposição (colmos) vão sendo decompostas, haverá imobilização de N, o que para o sistema plantio direto também é importante por causa da imperiosa necessidade de palha para cobrir o solo.

Em termos genéricos, poder-se-ia inferir que a lixiviação de NO_3^- é maior nos períodos mais frios (coincidindo com a aplicação de N em cobertura nas culturas de inverno, Figura 1) e quando a precipitação é maior que a evapotranspiração. No verão, quando o desenvolvimento das culturas é intenso, a lixiviação é mínima (Legg & Meisinger, 1982, p.516), a não ser durante chuvas contínuas e de alta intensidade.

g) Decomposição da resteva das culturas no sistema plantio direto

Os principais componentes da palha são a celulose (um polímero da glicose), a hemicelulose (um polímero da glicose e outros açúcares), a lignina (um polímero de fenóis), formando as fibras. Outros componentes são: 2 a 4 % de proteína (0,4 a 0,7 % N e o dobro nas leguminosas, Tabelas 2 e 4) e 5 a 10 % de cinzas. O teor de K é cerca de 1 % e o de sílica varia de 1 a 3 %. Nos estágios iniciais da decomposição a lignina é fisicamente protegida e não é decomposta. O teor de lignina nas palhas de cevada, de trigo, de aveia e de milho é, respectivamente, igual a 13, 14, 17 e 19 % (Bacon, 1979, p.229; Lynch, 1979, p.47). Estudos recentes têm indicado que a relação lignina/N é um índice efetivo para indicar a liberação de N de resíduos orgânicos (Raij, 1995, p.122).

Essencialmente, portanto, a palha é constituída de carboidratos. Um dos fatores que dificultam a medição da taxa de decomposição da palha das culturas e a mineralização da matéria orgânica do solo é o número de diferentes espécies de microorganismos que podem existir no solo. Segundo Turco et al. (1994, p.75), o solo pode conter até 10.000 espécies distintas de microorganismos por g de solo.

Conforme indicado na Tabela 2, a palha das principais culturas produtoras de grãos apresenta um teor relativamente baixo de N. Assim, por exemplo, se houve uma produção de 4 t de grãos de milho/ha e 6 t de palha/ha (índice de colheita igual a 0,4), haverá apenas 30 kg N/ha na resteva de milho por ocasião da colheita deste. Numa fase inicial os microorganismos do solo darão preferência pelas folhas (relação C/N menor). Posteriormente, a decomposição dos colmos será lenta devido ao seu teor maior de lignina.

Tabela 2. Teores de N na resteva de algumas culturas na ocasião da colheita dos grãos

Espécie	% N na resteva ⁽¹⁾
Trigo, cevada	0,6
Milho	0,6
Soja	1,0

⁽¹⁾Valores médios obtidos em parcelas sem aplicação de N.

Fonte: Wiethölter (1995). EMBRAPA-CNPT, dados não publicados.

A guisa de exemplo, na Tabela 3 constam as quantidades de grãos e de palha produzidos no sistema plantio direto pelas culturas de soja e de milho, em áreas contíguas numa mesma faixa de terraços. As quantidades de palha de soja e de milho foram amostradas por ocasião da colheita. Estas áreas foram posteriormente semeadas com trigo, no qual se aplicou doses de N na base e em cobertura.

Tabela 3. Rendimento de grãos e de palha de soja e de milho e quantidade de palha remanescente na superfície do solo por ocasião da semeadura do trigo no sistema plantio direto, 1995

Espécie	Rendimento ⁽¹⁾		palha remanescente por ocasião da semeadura do trigo ⁽²⁾
	grãos	palha	
Soja	2.125 (39%)	3.324 (61%) ⁽³⁾	3.330 ⁽⁴⁾
Milho	5.268 (39%)	8.135 (61%) ⁽³⁾	6.080

Fonte: Wiethölter (1995). EMBRAPA-CNPT, dados não publicados.

⁽¹⁾Quantidades amostradas na colheita.

⁽²⁾Na superfície do solo.

⁽³⁾Considerando o teor de N na palha de soja e de milho constante na Tabela 2, a quantidade de N contida nas restevas destas culturas seria igual a 33 e 49 kg/ha, respectivamente. Em realidade, a quantidade de N na resteva de milho no momento da colheita foi maior, uma vez que a colheita dos grãos e a coleta das amostras de palha foi realizada após o ponto de colheita.

⁽⁴⁾Amostrado em 12/7/95. O período entre a colheita da soja (10/5/95) e a semeadura do trigo (13/7/95) foi seco, tendo sido visual a prolongada permanência da resteva de soja na superfície do solo. É possível que tenham sido incluídas algumas plantas de invasoras mortas.

Observa-se na Tabela 3 que aproximadamente 40 % do total de matéria produzida na parte aérea pelas culturas de soja e de milho foi constituído por grãos (relação idêntica grão/palha é observada também nas culturas de trigo, de cevada e de triticale). Desta forma, é possível estimar a quantidade de resteva produzida por estas culturas, multiplicando o rendimento de grãos por 1,5 (60/40). Ressalta-se, no entanto, que as folhas de soja já haviam se desprendido por ocasião da amostragem, e estas apresentam um teor de N mais elevado que as hastes. Os valores indicados na Tabela 3 são semelhantes aos citados por Larson et al. (1978, p.3).

Na Tabela 4 constam as quantidades de palha de milho amostradas na superfície do solo (em função de doses de N aplicadas na superfície do solo antes da semeadura do trigo), na colheita do trigo (a palha de soja não foi amostrada nesta ocasião porque ela já estava quase ausente). Estas amostras foram coletadas um dia antes da colheita do trigo, realizada em 30/11/95. Verificou-se, pois, que os 8135 kg de palha/ha amostrados na colheita do milho (Tabela 3) foram decompostos para 6080 kg/ha durante cerca de 2 meses, perfazendo uma média de aproximadamente 1 t/ha mês, sem que N tenha sido adicionado ao solo. Decorridos mais 4 meses permanecia na superfície do solo 5061 kg palha/ha (Tabela 4), ou seja, cerca de ½ kg/m². Considerando o período desde a colheita do milho (abril) até a colheita do trigo (novembro), equivalente a 7 meses, a decomposição média da resteva de milho foi de, aproximadamente, ½ t/ha mês. Se este período fosse expandido para um ano, chegaria-se a uma decomposição de 6 t/ha ano. Desta forma, a produção mínima de resteva por ano no sistema plantio direto deveria ser superior a 6 t/ha, envolvendo espécies como milho e cereais de inverno, que apresentam relação C/N alta e baixa taxa de decomposição e a soja como fornecedora de N. Desta forma, utilizando a relação palha/grão acima referida de 1,5, constata-se que o sistema plantio direto é viável apenas se houver uma produção

superior a 4 t de grãos/ha ano. Na prática, o rendimento mínimo, para atender os custos fixos e assegurar boa cobertura do solo e possibilitar um acréscimo do teor de matéria orgânica do solo a longo prazo, deveria ser acrescido de 50 %, ou seja, um rendimento anual mínimo de 6 t/ha.

Tabela 4. Quantidade de palha de milho remanescente na superfície e teor de N por ocasião da colheita do trigo, 1995

N aplicado antes da semeadura do trigo	palha de milho amostrada na superfície do solo por ocasião da colheita do trigo	teor de N na palha
	kg/ha	%
0	5.061	0,53
40	4.462	0,54
80	4.523	0,67
120	4.256	0,58
Média	4.576	0,58

Fonte: Wiethölter (1995). EMBRAPA-CNPT, dados não publicados.

Com a adição de N na superfície do solo a decomposição da palha foi apenas um pouco mais rápida (Tabela 4). Caso esta palha tivesse sido incorporada ao solo junto com o N aplicado, a decomposição certamente teria sido muito mais rápida, pois o N aplicado na superfície do solo, na prática, teve pouco contato com a palha, resultando, assim, em pequeno acréscimo na taxa de decomposição da palha. No entanto, conforme assinalado acima, a decomposição da palha de milho nos dois primeiros meses foi muito mais rápida (cerca de 1 t/ha mês), possivelmente porque durante este período foi decomposta a massa foliar do milho, tendo permanecido as frações mais resistentes, principalmente os colmos. Segundo Parker (1962), a palha de milho quando incorporada se decompõe 30 % mais rapidamente do que se mantida na superfície. Já a palha de trigo (Brown & Dickey, 1970) quando enterrada se decompõe cerca de quatro vezes mais rapidamente do que quando mantida na superfície do solo. Desta forma, as restevras das diferentes espécies terão taxas de decomposição distintas, provavelmente em grande parte devido a espessura dos colmos, pois a palha de trigo tendo colmo mais fino que o de milho terá uma superfície de contato com o solo muito maior por unidade de peso de palha.

Os dados do teor de N na palha da Tabela 4 indicam que houve uma tendência de aplicação de N antes da semeadura do trigo aumentar o teor de N nesta palha, até a dose de 80 kg N/ha. Até certo ponto um teor menor na dose de 120 kg N/ha tem razão de ser, pois neste tratamento uma quantidade maior de palha foi decomposta. Em termos médios esta palha tinha 26 kg N/ha. Entre a colheita do milho (8135 kg palha/ha) e a colheita do trigo (média de 4576 kg palha/ha) a liberação de N desta palha foi cerca de 20 kg/ha. No caso da soja, a resteva amostrada na colheita desta foi de 3324 kg/ha (Tabela 3) e um teor de N de 1,0 % (Tabela 2). Como na colheita do trigo praticamente não havia mais palha, a soja teria liberado da parte aérea, 33 kg N/ha e uma quantidade adicional de N contido nas folhas e no

sistema radicular. Se a incorporação de N no solo da soja tivesse sido conforme indicado por Barber (1984, p.182) de 1 kg N/60 kg de grãos, teriam sido liberados $2125/60 = 35$ kg N/ha, que coincidiria com a contribuição da parte aérea se toda a resteva tivesse sido decomposta até a antese do trigo, pois a partir deste estágio a absorção de N pelo trigo começa a diminuir. Desta forma, se tanto o sistema radicular e a parte aérea da soja contribuíram com N, é possível que a estimativa de contribuição da soja em N proposta por Barber esteja correta.

Para preservar o solo do processo de erosão hídrica, uma quantidade mínima de 3 t de palha/ha é necessária (Larson et al., 1978, p.14). Desta forma, na rotação de culturas no sistema plantio direto é imprescindível incluir culturas que, ou produzem uma grande quantidade de massa seca ou então que esta palha tenha uma taxa de decomposição lenta, objetivando, desta forma, propiciar uma boa cobertura de palha durante o desenvolvimento das culturas, pelo menos nos estágios iniciais. Neste contexto, a cultura da soja apresenta dois aspectos conflitantes para o sistema plantio direto: 1) fixação de N para a cultura seguinte (aspecto benéfico) e 2) rápida decomposição dos resíduos (aspecto prejudicial em termos de cobertura do solo mas favorável em termos de liberação de nutrientes). Desta forma, uma seqüência de culturas que permite manter uma satisfatória cobertura do solo por palha seria: aveia-soja, trigo-soja e ervilhaca-milho (Comissão..., 1996, p.20).

h) Efeito da cultura anterior no rendimento das culturas no sistema plantio direto

As quantidades de resteva de milho indicadas na Tabela 4 são elevadas e certamente se constituem em uma significativa capacidade de imobilização de N daquela resteva em contato com solo. Esta, em parte, pode ser uma das razões da diferença ampla nos rendimentos de trigo cultivado após as culturas de soja e de milho no sistema plantio direto, conforme indicado nas Tabelas 5, 6 e 8 (Wiethölter, 1995). É conhecido o fato de que as raízes de trigo se concentram nas proximidades da superfície do solo quando não há déficit hídrico. E, estas plantas encontrando um meio com um contínuo baixo teor de N, ficam deficientes em N. Sintomas típicos de falta deste nutriente, particularmente nas parcelas nas quais não foi aplicado N tem sido observados freqüentemente em trigo cultivado após o milho, ou em milho após trigo (Muzilli, 1985, p.149).

Na Tabela 5 verifica-se que o rendimento médio de trigo, em 1993, após a cultura da soja foi de 295 kg/ha maior que após a cultura do milho. Este experimento [(a exemplo dos de 1994 (Tabela 6) e 1995 (Tabela 8)] foi conduzido em áreas contíguas, lado a lado, na mesma faixa de terraços. Verificou-se que nos tratamentos em que não foi aplicado N em cobertura, o rendimento após soja foi 610 (2080 - 1470) kg/ha maior. Esta diferença em parte pode ser atribuída ao N incorporado ao solo pelo rizóbio da soja. Outros fatores (alelopatia) talvez estejam contribuindo também. Um outro aspecto importante a considerar é o elevado incremento no rendimento que a aplicação de 40 kg N/ha proporcionou, tanto na resteva de soja como na de milho. No caso da aplicação de 40 kg N/ha em cobertura, o rendimento aumentou em 1072 e 1250 kg/ha, respectivamente para as restevas de soja e de milho. Observou-se, também, que a aplicação de N, somente em cobertura, conferiu

rendimentos superiores em todos os tratamentos ao rendimento obtido com a aplicação de N na base (20 kg/ha) e em cobertura.

Apesar de a dose de máximo retorno (máxima eficiência econômica) em 1993 ter sido igual para as duas restevas (110 kg N/ha, vide rodapé da Tabela 5), os rendimentos após milho foram inferiores, conforme já assinalado acima. Para esta dose de N o rendimento de trigo na resteva de milho seria igual a 3548 kg/ha. Na resteva de soja este mesmo rendimento seria obtido com 93 kg N/ha, tendo a soja, portanto, contribuído com o equivalente a 17 kg N/ha.

Em 1994 (Tabelas 6 e 7) e em 1995 (Tabelas 8, 9 e 10), a economia de N proporcionada pela resteva de soja variou de 55 a 59 kg N/ha (Tabela 7 e 9). Desta forma, no conjunto, a resteva de soja incorporou uma quantidade de N equivalente a 17 a 59 kg N/ha, situando-se, aproximadamente, dentro da amplitude de economia de N indicada por Stevenson (1986, p.195), 25 a 45 kg/ha, ou de Barber (1984, p.182), 1 kg N/60 kg de grãos de soja. Na Tabela 11 as respostas do trigo a N obtidas após as culturas de soja e de milho por Sá (1993, p.47) foram equivalentes. No entanto, quando não foi aplicado N, o cultivo de trigo após soja conferiu um rendimento de 387 kg/ha superior ao daquele obtido após milho.

Na Tabela 10 verifica-se que o trigo cultivado na resteva de milho apresenta teor inferior N do que o trigo cultivado na resteva de soja, comprovando, assim, que a presença da resteva de milho inibe a absorção de N em quantidades exigidas pela cultura no estágio de afilhamento.

O efeito do cultivo de leguminosas, como adubo verde, no rendimento de milho, tem sido demonstrado por vários autores (Sá, 1993, p.46; Monegat, 1991, p.138-139). Em geral, as leguminosas de melhor adaptação (ervilhaca, tremoço, etc) proporcionam altos rendimentos de milho, dispensando, em muitos casos, a aplicação de N. Este assunto será abordado em detalhes na Disciplina de Manejo de Culturas no Sistema Plantio Direto.

Tabela 5. Efeito das restevas de soja e de milho no rendimento de trigo. EMBRAPA-CNPT, 1993

Método de aplicação	Dose de N, kg/ha				Média
	0	40	80	120	
----- kg grãos/ha -----					
Resteva de soja:					
Cobertura	2.080	3.152	3.414	3.927	3.144 a
Base + cobertura	2.080 ⁽¹⁾	2.804	3.358	3.494	2.934 b
Média	2.080 D	2.978 C	3.386 B	3.710 A	3.039
Resteva de milho:					
Cobertura	1.470	2.720	3.592	3.613	2.849 a
Base + cobertura	1.470 ⁽²⁾	2.536	2.998	3.550	2.639 a
Média	1.470 C	2.628 B	3.295 A	3.582 A	2.744

⁽¹⁾Com 20 kg N/ha aplicado na base o rendimento foi 2455 kg/ha.

⁽²⁾Com 20 kg N/ha aplicado na base o rendimento foi 2066 kg/ha.

$Y_{soja} = 2100,30 + 24,01N - 0,09N^2$, $r^2 = 0,99$. Dose de máximo retorno (DMR) = 110 kg/ha, para uma relação de preços (RP) = 4,2. $RP = (R\$/kg\ N)/(R\$/kg\ gr\tilde{a}o)$. DMR = 110 kg/ha.

$Y_{milho} = 1475,55 + 33,84N - 0,136N^2$, $r^2 = 0,99$. DMR = 110 kg/ha.

Matéria orgânica do solo = 3 %. Cultivar EMBRAPA-16.

Fonte: Wiethölter (1995). EMBRAPA-CNPT, dados não publicados.

Tabela 6. Efeito das restevas de soja e de milho no rendimento de trigo. EMBRAPA-CNPT, 1994

Dose de N na base, kg/ha ⁽¹⁾	Dose de N aplicado em cobertura, kg/ha				Média
	0	50	100	150	
----- kg grãos/ha -----					
Resteva de soja:					
0	2.042	2.612	2.821	2.817	2.573 a
30	2.437	2.824	2.902	2.805	2.742 a
60	2.597	2.770	2.507	2.446	2.580 a
Média	2.359 B	2.735 A	2.743 A	2.689 A	2.632
Resteva de milho:					
0	1.639	2.226	2.423	2.540	2.207 b
30	2.005	2.395	2.659	2.629	2.422 a
60	2.056	2.302	2.531	2.436	2.331 a
Média	1.900 C	2.308 B	2.538 A	2.535 A	2.320

⁽¹⁾ Aplicado 13 dias antes da semeadura.

Matéria orgânica do solo = 3 %. Cultivar EMBRAPA-16.

Fonte: Wiethölter (1995). EMBRAPA-CNPT, dados não publicados.

Tabela 7. Equações de regressão entre rendimento (Y) de grãos e doses de nitrogênio (N) aplicadas em cobertura na cultura do trigo cultivado após as culturas de soja e de milho. EMBRAPA-CNPT, 1994

Dose de N aplicado na base	Equação de regressão	r ²	Dose de máximo retorno ⁽¹⁾	Dose para rendimento máximo
----- kg/ha -----				
Resteva de soja:				
0 [#]	Y = 2049 + 13,69N - 0,057N ² Prob>F 0,0001 0,0015 0,0207	0,723	81	120
30	Y = 2444 + 9,62N - 0,048N ² Prob>F 0,0001 0,0058 0,0224	0,531	53	100
60	sem ajuste			
Resteva de milho:				
0 ⁽²⁾	Y = 1654 + 12,86N - 0,047N ² Prob>F 0,0001 0,0019 0,0444	0,766	89	137
30	Y = 1996 + 10,59N - 0,042N ² Prob>F 0,0001 0,0004 0,0111	0,806	72	126
60	Y = 2040 + 7,87N - 0,034N ² Prob>F 0,0001 0,0007 0,0101	0,745	50	116

As equações de regressão foram ajustadas empregando os dados das quatro repetições do experimento.

⁽¹⁾ Relação de preços: kg N/kg grãos = 4,5.

DMR = dose para máximo retorno; DRM = dose para rendimento máximo de grãos.

⁽²⁾ Com 89 kg N/ha aplicados na resteva de milho seriam produzidos 2426 kg grãos/ha. Este mesmo rendimento seria obtido com 30 kg N/ha na resteva da soja (#), gerando, a resteva de soja, uma economia de 59 kg N/ha, nesta combinação de tratamentos. No caso da dose de 30 kg N/ha aplicados na base, 72 kg N/ha aplicados após a cultura do milho proporcionariam um rendimento de 2541 kg/ha. O mesmo rendimento seria obtido após a cultura da soja com 15 kg N/ha, conferindo, desta maneira, uma economia de 57 kg N/ha. Matéria orgânica do solo = 3 %. Cultivar EMBRAPA-16.

Matéria orgânica do solo = 3 %. Cultivar EMBRAPA-16.

Fonte: Wiethölter (1995). EMBRAPA-CNPT, dados não publicados

Tabela 8. Efeito de N aplicado na base e em cobertura no rendimento de grãos de trigo no sistema plantio direto. EMBRAPA-CNPT, 1995

N base	N cobertura, kg/ha					Média
	0	40	80	120	160	
Resteva de soja:						
	----- kg/ha -----					
0	2.262	2.968	3.438	3.617	3.644	3.234 b
40	2.663	3.260	3.626	3.665	3.816	3.406 a
80	3.222	3.302	3.569	3.481	3.656	3.446 a
120	3.324	3.573	3.668	3.637	3.670	3.574 a
Média	2.908 C	3.276 B	3.575 A	3.600 A	3.697 A	3.418
CV = 9,3 %.						
Resteva de milho:						
0	1.447	2.329	2.907	3.362	3.432	2.695 c
40	1.934	2.846	3.172	3.406	3.498	2.971 b
80	2.487	2.942	3.209	3.510	3.403	3.110 ab
120	2.728	3.161	3.272	3.489	3.363	3.202 a
Média	2.149 D	2.819 C	3.140 B	3.442 A	3.424 A	2.995
CV = 5,5 %.						

Semeadura: 13/7/96. Matéria orgânica do solo: 3 %.

Matéria orgânica do solo = 3 %. Cultivar EMBRAPA-16.

Fonte: Wiethölter (1995). EMBRAPA-CNPT, dados não publicados.

Tabela 9. Equações de regressão entre rendimento de grãos (Y) e doses de N (N) aplicadas em cobertura na cultura do trigo cultivado após as culturas de soja e de milho no sistema plantio direto. EMBRAPA-CNPT, 1995

N na base	Equação de regressão	DMR ⁽¹⁾	DRM ⁽²⁾	r ²
----- kg/ha -----				
Resteva de soja:				
0*	$Y = 2269 + 20,3N - 0,074N^2$	110	137	0,90
40	$Y = 2690 + 15,5N - 0,054N^2$	106	144	0,82
80	$Y = 3236 + 2,6N$	-	-	0,18
120	$Y = 3423 + 1,89N$	-	-	0,21
	$Y = 2881 + 3,0N_{\text{base}} + 4,5N_{\text{cobertura}}$	-	-	0,46
Resteva de milho:				
0 [#]	$Y = 1445 + 25,0N - 0,08N^2$	131	156	0,95
40	$Y = 1986 + 21,6N - 0,08N^2$	110	135	0,94
80	$Y = 2475 + 13,8N - 0,05N^2$	98	138	0,74
120	$Y = 2738 + 11,2N - 0,05N^2$	72	112	0,61
	$Y = 2090 + 3,7N_{\text{base}} + 8,3N_{\text{cobertura}}$	-	-	0,70

As equações de regressão foram ajustadas empregando os dados das quatro repetições do experimento.

⁽¹⁾Dose de N de máximo retorno para uma relação de preços igual a 4. Preços considerados: trigo, R\$ 200,00/t e uréia, R\$ 360,00/t (R\$ 0,80/kg N). ⁽²⁾Dose de N para rendimento máximo.

[#]Com 131 kg N/ha seriam produzidos 3347 kg grãos/ha. Este mesmo rendimento seria obtido com 72 kg N/ha na resteva da soja (), gerando a resteva de soja uma economia de 59 kg N/ha nesta combinação de tratamentos. No caso da dose de 40 kg N/ha aplicados na base, 110 kg N/ha aplicados após o milho, proporcionariam um rendimento de 3394 kg /ha. Na resteva de soja, o mesmo rendimento seria obtido com 55 kg N/ha. Desta forma, a soja conferiu uma economia de 55 kg N/ha.

Matéria orgânica do solo = 3 %. Cultivar EMBRAPA-16.

Fonte: Wiethölter (1995). EMBRAPA-CNPT, dados não publicados.

Tabela 10. Efeito de N aplicado na base e em cobertura no teor de N na planta de trigo no estágio E23 (3 afilhos). EMBRAPA-CNPT, 1995

N base kg/ha	N cobertura, kg/ha					Média
	0	40	80	120	160	
Resteva de soja:						
	----- % -----					
0	4,4	4,5	4,3	4,0	4,3	4,3 d
40	4,8	4,8	4,6	5,1	4,6	4,8 c
80	5,4	5,2	5,2	5,3	5,0	5,2 b
120	5,7	5,4	5,2	5,5	5,4	5,4 a
Média	5,1 A	5,0 A	4,8 A	5,0 A	4,8 A	4,9
CV = 5,8 %.						
Resteva de milho:						
0	3,6	3,6	3,4	3,8	3,9	3,7 c
40	4,5	4,4	4,5	4,4	4,6	4,5 b
80	4,8	4,8	4,9	4,8	4,8	4,8 a
120	4,9	4,8	5,1	4,9	5,1	5,0 a
Média	4,6 A	4,4 A	4,5 A	4,5 A	4,6 A	4,5
CV = 6,6 %.						

Fonte: Wiethölter (1995). EMBRAPA-CNPT, dados não publicados.
Cultivar EMBRAPA-16.

Tabela 11. Efeito de doses de N no rendimento de trigo cultivado após as culturas de soja e milho (Sá, 1993, p.47)

Dose de N	Rendimento de grãos de trigo	
	Após soja	Após milho
	----- kg/ha -----	
0	3.268	2.881
60	3.728	3.857
120	3.901	4.042
Média	3.632	3.593

Cultivar BR-14.

3. Estimativa da necessidade teórica de N

O desenvolvimento de procedimentos para estimar a necessidade de adubação do solo com P e K está bem mais avançado do que para N. Nas regiões úmidas em especial há muita dificuldade para a obtenção de métodos de análise de solo para N cujos valores analíticos tenham uma correlação satisfatória com o desenvolvimento das plantas. Desta forma, as recomendações da adubação nitrogenada são baseadas em diversos critérios indiretos e subjetivos, incluindo, por exemplo: expectativa de produtividade, histórico de uso anterior do solo, análise foliar para algumas culturas perenes, inferência de taxas de mineralização de N de adubos orgânicos e de restebas, teor de matéria orgânica e análises de $N-NO_3^-$ e de $N-NH_4^+$ do solo, etc (Comissão..., 1995; Raji, 1995). No Brasil o teor de matéria orgânica do solo é utilizado como parâmetro para o estabelecimento da adubação nitrogenada somente nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (Mielniczuk, 1982; Anghinoni, 1986; Wiethölter, 1993; Comissão..., 1995), pois nesta região constatou-se uma associação significativa entre o teor de matéria orgânica do solo e a resposta das culturas a N. Nos Estados Unidos (Bock & Kelley, 1992; Wells & Thompson, 1992) e na Europa (Hoffmann, 1991) está sendo dada muita importância a análise de $N-NO_3^-$ do solo. De qualquer maneira, há uma grande necessidade para procedimentos que permitam mensurar as transformações de N no solo, envolvendo mineralização, desnitrificação, imobilização, fixação de N por organismos livres e simbióticos, etc (Tedesco, 1985; Anghinoni, 1986, p.13; Doran & Smith, 1987).

No sistema plantio direto a preocupação com continuidade da capacidade produtiva do solo faz parte da filosofia deste sistema. Independente das espécies cultivadas, é importante levar em conta no estabelecimento da dose de N a aplicar que a relação

$$N_{\text{entrada}} - N_{\text{saída}} = \Delta N_{\text{solo}} \quad [1]$$

seja positiva (Legg & Meisinger, 1982, p.548). Uma redução no teor de matéria orgânica significa um valor de ΔN_{solo} negativo. Por exemplo, se um solo apresentava 4 % de MO e o teor baixou para 3,8 %, isto implica numa redução do estoque de MO de 2000 kg/ha (\pm 1000 kg C/ha) e de 100 kg N/ha. Desta forma, no sistema plantio direto, ou em qualquer outro sistema de manejo do solo, a obtenção de altos rendimentos de grãos e de palha deve ser um objetivo constante, não só sob o aspecto de viabilidade técnica do plantio direto mas também para assegurar a sustentabilidade econômica do sistema, particularmente com relação a disponibilidade de N.

a) Modelo planta

Para a maioria dos solos a quantidade de N retornada pelos resíduos culturais, pela água da chuva ou pela fixação biológica é suficiente para sintetizar humus novo. Desta maneira, uma estimativa razoável da quantidade de N requerida por uma cultura pode ser obtida dividindo a quantidade removida (parte da planta colhida) pela eficiência como o fertilizante é utilizado pela cultura, ou seja,

$$N_{\text{fert}} = N_{\text{colh}}/E_f, \quad [2]$$

onde N_{fert} é igual a quantidade de N a aplicar, N_{colh} é a quantidade de N a ser removida na porção colhida (grãos por exemplo) e E_f é o fator de eficiência de utilização do fertilizante. Na Equação [2] supõe-se que o N contido na palha está sendo compensado pelo N contido no resíduo cultural da cultura anterior e que o eventual excesso de N teria sido perdido por lixiviação, denitrificação ou volatilização de NH_3 . Se a palha é removida ou queimada, uma quantidade adicional deveria ser adicionada para compensar estas perdas. O fator de eficiência (E_f) varia entre as espécies, os solos e as condições climáticas, mas em geral oscila entre 0,5 e 0,75, ou seja, de 50 a 75 % do N aplicado pode ser absorvido pelas plantas (Stevenson, 1986, p.195).

Considerando, por exemplo, um rendimento esperado de 3 t de grãos de trigo/ha e um teor de N nos grãos de 2,2 % e um valor de E_f de 0,7, a quantidade de N a aplicar seria:

$$N_{\text{fert}} = 66/0,7 = 94 \text{ kg N/ha.} \quad [3]$$

Porém, se a soja antecedeu o trigo e produziu 3 t grãos/ha, a quantidade de N a aplicar pode ser diminuída por causa do N deixado pela soja. Segundo Stevenson (1986, p.195), na região do Corn Belt dos Estados Unidos, geralmente se considera um crédito de 25 a 45 kg N/ha quando a soja antecede o milho. Já Halvorson (1989, p.350), com base nos dados de Barber (1984, p.182), considera um crédito de 1 kg N/60 kg de grãos de soja. Supondo, pois, uma produção de 3 t de soja/ha e usando a estimativa de crédito de Halvorson, a dose de N a aplicar seria igual a $94 - 50 = 44 \text{ kg N/ha}$. A propósito, para solos da área experimental do CNPT com 3 a 3,5 % de MO, os rendimentos das melhores cultivares de trigo durante os últimos 8 anos (1988 a 1995) tem sido de aproximadamente 3 t/ha com a aplicação de cerca de 40 kg N/ha. Desta forma, a dose de N a aplicar pode, em princípio, ser inferida com base na estimativa teórica da necessidade da cultura.

b) Modelo solo-planta

Uma forma um pouco mais elaborada de estimar a necessidade de N é considerar a quantidade de N mineralizável (incubação em laboratório) que o solo apresenta e a demanda total de N da planta (Stevenson, 1986, p.195). Neste caso, a Equação [2] passa a ter a seguinte forma:

$$N_{\text{fert}} = \frac{N_{\text{planta}} - (N_{\text{MO}} + N_{\text{solo}})}{E_f}, \quad [4]$$

onde N_{planta} é a quantidade N removido pela cultura (grãos + palha), N_{MO} é a quantidade de N mineralizado no processo de incubação e N_{solo} é a quantidade de N-NO_3^- e N-NH_4^+ presente no solo antes da semeadura. Um aspecto importante a considerar na Equação [4] é

que se supõe que a eficiência de utilização pela planta do N mineralizável (N_{MO}), o N solúvel no solo (N_{solo}) e o N do fertilizante (E_{fert}) são absorvidos pela planta com a mesma eficiência.

c) Modelo solo-planta-sistema de cultivo

Para exemplificar este modelo utilizar-se-á a cultura do trigo. Considerando a necessidade de N para o desenvolvimento da planta e a formação dos grãos, a planta de trigo necessita absorver de 33 a 50 kg N/ha para produzir 1 t de grãos/ha. Para uma situação média, pode-se supor uma necessidade de 40 kg N/t de grãos. O teor de N varia de 2,0 a 2,8 % no grão e de 0,4 a 0,8 % na palha, na colheita (Tabela 2). Para lavouras que apresentam rendimentos elevados, a exigência de N por t de grãos pode ser maior devido a redução da eficiência de uso do N pela planta (Halvorson et al., 1989, p.349).

Variações na recomendação geral de N são necessárias nas seguintes situações: a) quando uma mineralização intensa é esperada; b) quando há uma grande quantidade de resteva; c) quando a cultura anterior foi uma leguminosa; d) quando foi aplicado fertilizante orgânico; e) quando o sistema de plantio direto é iniciado, ou f) quando é realizado um pastejo. Assim, se a cultura anterior for uma leguminosa, a quantidade de N poderia ser reduzida. No caso da soja (Halvorson et al., 1989, p.350), tem sido considerado que esta contribui com 1 kg de N para cada 60 kg de soja colhida. Na aplicação de fertilizantes orgânicos, pode-se considerar que 50 % do N se tornará disponível no primeiro cultivo e 20 a 25 % no segundo cultivo (Comissão..., 1995). De outra parte, 10 a 20 kg N/ha deveriam ser acrescentados ao solo para facilitar a decomposição de uma t de matéria seca (MS) de palha de milho (Halvorson et al., 1989, p.350). Porém, como em geral o fertilizante nitrogenado aplicado na semeadura é colocado na linha de semeadura e não superficialmente, a palha mantida na superfície terá pouco ou nenhum efeito na imobilização do N aplicado nesta ocasião. Já o fertilizante aplicado em cobertura, no sistema plantio direto, sofrerá imobilização temporária caso haja uma quantidade grande de resteva na superfície do solo.

No caso da realização de um pastejo (Halvorson et al., 1989, p.351), os cálculos podem ser realizados assumindo um ganho de 1 kg de peso animal/10 kg de matéria seca consumida e um teor de N na matéria seca da planta de trigo de 3 %, até antes do início do estágio de alongamento. Desta forma, um ganho de peso de 100 kg/ha implicaria num consumo de 1000 kg de MS/ha, ou seja, uma retirada do sistema de 30 kg N/ha. Em síntese, para cada 3 kg de ganho de peso/ha deveria ser acrescentado 1 kg N/ha.

Desta forma, a necessidade teórica de N para a cultura do trigo, para diferentes situações, poderia ser estimada com base nas suposições acima, através dos seguintes fatores:

- A. N total necessário = rendimento esperado (t/ha) x necessidade de N (40 kg N/ha por t de grãos). **Exemplo:** 3 t/ha x 40 kg N/ha = 120 kg N/ha. [5]
- B. Acrescentar N para compensar a decomposição de palha (10 a 20 kg N/t de palha). **Exemplo:** 4 t de palha de milho/ha x 10 kg N/ha = 40 kg N/ha. Porém, o N contido nos resíduos que ficarão no campo pode ser considerado como reciclável e para a maioria dos casos constitui N suficiente para suprir a resteva da cultura seguinte. Este critério é válido se a sucessão de culturas é mais ou menos a mesma ao longo do tempo e se os rendimentos são estáveis. Quando isto não acontece a quantidade imobilizada de N poderia ser acrescentada como valor positivo na Equação [12], e a quantidade liberada para a cultura acrescentada à quantidade mineralizada pela matéria orgânica (Eq. [9]). [6]
- C. Acrescentar as perdas potenciais de N devido a lixiviação de N-NO_3^- e N-NH_4^+ , causadas pelo excesso de precipitação, pois em muitas regiões do Rio Grande do Sul, por exemplo, ocorre uma precipitação de 900 mm durante o período de desenvolvimento do trigo. Medições de lixiviação de N realizadas em lisímetros de drenagem no CNPT indicam que as perdas totais de N-NO_3^- e de N-NH_4^+ podem chegar a 22 kg N/ha em 101 dias durante o desenvolvimento do trigo, com uma precipitação de 911 mm (Wiethölter, 1992, p.96). Ressalta-se que a medição de lixiviação em lisímetro de drenagem tende a superestimar este processo. De outra parte, as perdas de N por escoamento superficial podem chegar a cerca de 20 kg N/ha, especialmente se a precipitação pluviométrica for intensa logo após a aplicação de N em cobertura (Wiethölter & Ciprandi, 1990). Legg & Meisinger (1982, p.515) referem perdas por escoamento de 16 kg N/ha para um solo descoberto e 34 kg N/ha para um solo relvado, durante uma chuva simulada de 128 mm. No entanto, as perdas de N orgânico foram bem maiores no solo descoberto. Desta forma, uma perda média por lixiviação e escoamento superficial de cerca de 20 kg/ha é provavelmente razoável considerar para anos com precipitação pluviométrica média ou elevada. [7]
- D. Acrescentar o N para compensar o pastejo (1 kg N/3 kg de ganho de peso animal). **Exemplo:** 90 kg de ganho de peso/ha correspondem a 30 kg N/ha. [8]
- E. Subtrair a quantidade de N da matéria orgânica (MO) da camada arável potencialmente mineralizável, considerando que 5 % da matéria orgânica é constituído de N e de 1 a 3 % deste N mineraliza por ano (Stevenson, 1986, p.193). Assim, um solo com 3 % de matéria orgânica conterà 3000 kg N/ha e mineralizará 2 % deste N (Anghinoni, 1986, p.9), liberando 60 kg N/ha ano, ou seja, 30 kg N/ha safra. Desta forma, basta multiplicar a % de matéria orgânica por 10 para obter o total mineralizável por safra. **Exemplo:** matéria orgânica = 3 %, correspondendo a 30 kg N/ha. [9]

Na região de Passo Fundo num solo com 3 a 4 % de matéria orgânica e quando o trigo é cultivado após a soja o potencial de rendimento de trigo é de aproximadamente 2.500

kg/ha, sem aplicação de N, ou seja, o solo é capaz de suprir cerca de 100 kg N/ha, sendo este N resultante da mineralização da matéria orgânica e dos restos culturais da soja.

F. Subtrair a quantidade de N mineral ($N-NO_3^-$ e $N-NH_4^+$) disponível no solo por ocasião da semeadura, multiplicando mg N/L de solo por 2 para obter kg N/ha. Salienta-se, no entanto, que nas nossas condições de clima úmido os métodos de determinação de N destas formas químicas ainda não foram calibrados e não são, por isso, parâmetros seguros. Além disso, as raízes não terão chance de receber todo o N contido no solo, tanto pelo processo de fluxo de massa como de difusão. **Exemplo:** soma de $N-NO_3^-$ e $N-NH_4^+$ igual a 10 mg/L de solo na camada de 0 a 20 cm. Assim, o N mineral inicialmente disponível seria igual a 20 kg/ha. Considerando a camada de 20 a 40 cm também, uma quantidade maior de N certamente estaria disponível. Mas, levando em conta que durante o desenvolvimento do trigo a tendência é haver uma precipitação muito maior que a evapotranspiração, é provável que o NO_3^- e o NH_4^+ desta camada não venham ter muita influência, a não ser em anos de menor precipitação, nos quais o N de camadas mais profundas poderá ser absorvido pela planta. Pelas diferenças entre as culturas de milho e de soja com relação ao teor de N remanescente nos resíduos culturais (Tabela 4), é provável que os teores de $N-NO_3^-$ e $N-NH_4^+$ do solo também sejam diferentes em função da espécie cultivada. [10]

G. Subtrair a quantidade de N incorporada pela soja (1 kg de N por 60 kg de grãos). **Exemplo:** 3000 kg soja/ha correspondem a 50 kg N/ha (Barber, 1984, p.183). [11]

Assim, para regiões úmidas, a quantidade de N requerida poderia ser estimada pela seguinte equação:

$$N = A_{\text{Ntotal}} + B_{\text{rest}} + C_{\text{lix}} + D_{\text{pastejo}} - E_{\text{MO/rest}} - F_{\text{solo}} - G_{\text{soja}}. \quad [12]$$

Se o trigo fosse cultivado após a **soja** e se não houvesse pastejo, assim como não ocorresse nenhum outro fator capaz de afetar o desenvolvimento das plantas, como, por exemplo, incidência de doenças, de pragas, de invasoras, excesso de chuva, déficit hídrico, etc, a necessidade de N para a produção de 3 t grãos/ha seria a seguinte:

$$N = 120 + 0 + 20 + 0 - 30 - 20 - 50 = 40 \text{ kg/ha}. \quad [13]$$

Se o **milho** fosse a cultura anterior (4 t MS/ha) e houvesse uma imobilização líquida de 15 kg N/ha pelos resíduos culturais, e se não houvesse pastejo, a Equação [13] apresentaria os seguintes valores, se o critério de reciclagem de N da palha de uma cultura para outra, apresentado na Equação [6], fosse empregado:

$$N = 120 + 0 + 20 + 0 - 30 - 20 - 0 = 90 \text{ kg N/ha}. \quad [14]$$

Ainda deve ser considerado que a eficiência agrônômica do fertilizante nitrogenado aplicado varia de 50 a 70 %. Desta forma, as doses obtidas nas Equações [13] e [14] deverão ser aumentadas proporcionalmente. No entanto, os valores incluídos nas Equações [13] e [14] não compreendem todo o processo, pois não foram incluídos os seguintes fatores que acrescentam N ao sistema: a decomposição da resteva, a fixação biológica de N pelos microorganismos livres, o N provindo das chuvas e, uma eventual taxa de mineralização da matéria orgânica maior que a considerada, especialmente nas regiões mais quentes. Desta forma, as quantidades estimadas pelas Equações [13] e [14] provavelmente não necessitam ser corrigidas pelo fator de eficiência agrônômica do fertilizante. De qualquer maneira, é importante sob os aspectos econômicos e ambientais que as aplicações de N sejam realizadas proporcionalmente às exigências das culturas.

c) Modelo para regiões com restrição de água

Para regiões de baixa precipitação ao ponto de a disponibilidade de água limitar o teto de rendimento de trigo (norte do Paraná, Mato Grosso do Sul etc), poder-se-ia teorizar o problema da definição da necessidade de N empregando o enfoque apresentado por Smith (1977), utilizando a seguinte lógica:

$$\text{Rendimento potencial} = (\text{rendimento/unidade de água}) \times (\text{precipitação esperada} + \text{água disponível} - \text{água necessária para desenvolver a cultura}). \quad [15]$$

$$\text{Rendimento} = 75 \text{ kg grãos/cm de água} \times (\text{precipitação, cm} + \text{água no solo, cm} - 10 \text{ cm de água}). \quad [16]$$

Dez cm de água são necessários para um crescimento mínimo da cultura. Disponibilidade maior de água permitirá um desenvolvimento satisfatório da cultura. A precipitação é a quantidade de chuva esperada durante o período de crescimento da cultura. A disponibilidade de água no solo é igual a quantidade total de água na camada de solo ao alcance das raízes.

Assim, uma precipitação equivalente a 30 cm e uma disponibilidade de água no solo de 20 cm permitiria a obtenção de 3000 kg grãos/ha.

A necessidade de N pode, então, ser estimada considerando uma demanda de 40 kg N para produzir uma t de grãos (vide Equação [5]).

$$\text{Necessidade de N, kg/ha} = \text{Rendimento, t/ha} \times 40 \text{ kg N/t grãos}. \quad [17]$$

Disponibilidade de N: poderia ser estimada pelo balanço dos valores obtidos nas Equações [6] a [11]. [18]

Dose de N a aplicar = necessidade de N da planta - disponibilidade de N. [19]

d) O sistema atual de recomendação de N

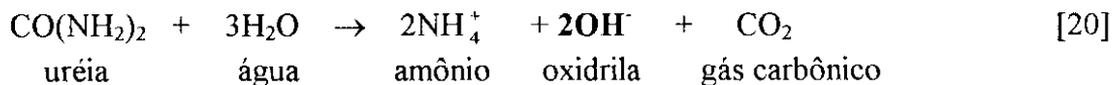
Nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina utiliza-se o teor de matéria orgânica do solo como referência para estabelecer a necessidade de aplicação de N (Comissão..., 1995). Para as culturas do trigo (Mielniczuk, 1982) e do triticale (Wiethölter, 1993) em solos com acidez corrigida há uma relação satisfatória entre o teor de matéria orgânica do solo e a resposta das culturas a N. Para outras culturas a relação não é tão evidente (Anghinoni, 1986, Raij, 1991, p.171-174), principalmente porque o teor de MO não evidencia em que estágio de transformação se encontram os compostos nitrogenados.

4) Efeito de fertilizantes nitrogenados no pH do solo

Uma das preocupações no sistema plantio direto é a acidificação do solo e as dificuldades de correção da acidez, pois, uma vez iniciado o sistema é conveniente não arar mais o solo. No entanto, para solos que foram iniciados no sistema plantio direto com um índice de acidez satisfatório para o desenvolvimento das culturas, as necessidades de calagem são menores que esperadas, mesmo em situações de altos rendimentos (Sá, 1993, p.51-58; Ruedell, 1995, p.90-93). Este fato provavelmente ocorre por causa das reduzidas perdas de solo. No entanto, independente do pH do solo, a aplicação de fertilizantes nitrogenados gerará acidez que deverá ser compensada com o tempo. O mesmo fato ocorre na decomposição da matéria orgânica do solo ou de resíduos culturais que envolvem a transformação de NH_4^+ em NO_3^- (Phillips & Phillips, 1984, p.105; Raij, 1991, p.140). Assim, na transformação de NH_4^+ para NO_3^- de qualquer fertilizante ocorre a formação de 2H^+ . Em consequência, dependendo da dose de N aplicada, o pH do solo tende a diminuir, mesmo que em muitos casos isto não seja perceptível na análise do solo, bem como esta redução poderá estar sendo compensada por algum insumo que possa ter efeito alcalino, bem como imobilização de Al por compostos orgânicos. O efeito de acidificação do solo será restrito ao volume de solo onde ocorrerem as reações do fertilizante com o solo e, como isto geralmente ocorre somente nos primeiros cm de solo quando a aplicação é superficial, a compensação desta acidez pode ser obtida com aplicações superficiais de calcário.

A título de exemplo, utilizar-se-á a uréia como fonte de N para demonstrar a correspondência de acidez gerada em equivalência de CaCO_3 .

A primeira reação da uréia ao ser aplicada no solo é a hidrólise enzimática, promovida pela urease (Clothier & Sauer, 1988). Esta enzima é muito comum no solo e também existe nos resíduos das culturas. Assim,



$$\frac{0,3571 \text{ mg H}^+}{100 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ mmol}_e \text{ H}^+}{\text{mg H}^+} = 0,3571 \text{ mmol}_e \text{ H}^+ / 100 \text{ g} = 0,3571 \text{ me H}^+ / 100 \text{ g}.$$

Reconhecendo a igualdade, 1 me/100 g = 1000 kg CaCO₃/ha, tem-se que 0,3571 mmol_e H⁺/100 g de solo é igual a 357 kg CaCO₃/ha, ou seja, a aplicação de 100 kg N/ha (= 222 kg uréia com 45 % de N) geraria uma acidez que seria neutralizada por 357 kg CaCO₃ puro. Ou, 100 kg de uréia seriam equivalentes a acidez neutralizada por 161 kg de CaCO₃ puro. Em síntese,

$$1 \text{ kg N}_{\text{uréia}} = 3,6 \text{ kg CaCO}_3. \quad [25]$$

A acidez gerada por 100 kg de N provindo do sulfato de amônio é de 535 kg de CaCO₃ e do nitrato de amônio é equivalente ao da uréia, pois este tem 1 átomo de N na forma de NH₄⁺ em cada molécula de nitrato de amônio (NH₄NO₃), gerando 2H⁺ por molécula de NH₄NO₃. Os índices de acidez de outras fontes de N constam em Lopes (1989, p.58) e Tisdale et al. (1985, p.492).

Na prática nem toda a acidez gerada diretamente pelo NH₄⁺ necessita ser corrigida, pois há absorção de NH₄⁺ pelas plantas (em troca as plantas cedem H⁺), bem como sempre ocorre alguma perda de N por denitrificação e lixiviação (Phillips & Phillips, 1984, p.105; Olson & Kurtz, 1982, p.592).

A água da chuva também é uma fonte geradora de acidez do solo. Esta ao se precipitar atravessa a massa de ar contendo CO₂. Neste processo forma-se ácido carbônico (H₂CO₃). A água da chuva quando pura contém 0,012 mmol_e H⁺/L, ou seja, tem um pH igual a 4,92 (Phillips & Phillips, 1984, p.105). Considerando uma precipitação de 1000 mm, este volume de água contribuirá com 120 g H⁺/ha, o que equivale a 6 kg CaCO₃/ha. Para uma precipitação de 1800 mm/ano a acidez gerada seria equivalente a 11 kg de CaCO₃/ha. No entanto, segundo Stumm & Morgan (1981, p.172) a concentração de H₂CO₃ na água da chuva pode ser até 3 vezes maior que a utilizada nos cálculos acima.

Um outro fator que pode levar a necessidade de aplicação de calcário é a lixiviação de cátions de reação “básica”, tais como o Ca e o Mg. Em estudo conduzido em lisímetros de drenagem durante 778 dias (Wiethölter, 1992, p.96), verificou-se uma lixiviação de Ca e de Mg na Unidade de Mapeamento Passo Fundo (Latossolo Vermelho Escuro distrófico) equivalente a 810 kg de CaCO₃/ha ano, com uma precipitação + irrigação de 2257 mm (a precipitação anual média medida no CNPT entre 1961 a 1990 foi de 1788 mm). Devido a metodologia do experimento, que não permitiu a ascensão de água das camadas subsuperficiais, as quantidades de Ca e de Mg lixiviadas foram superestimadas. No entanto, os valores obtidos demonstram que em não havendo escoamento superficial de água, há

necessidade de um monitoramento da acidez do solo e a aplicação de calcário antes que um nível elevado de acidez tenha sido estabelecido.

5) Momento de aplicação de uréia

Considerando as reações da uréia especificadas nas Equações [20] a [23], pode-se inferir que os momentos ideais de aplicação de uréia em solo manejado no sistema plantio direto na palha são os seguintes: a) idealmente antes de uma chuva de baixa intensidade e de no mínimo 25 mm; b) solo úmido; c) baixa taxa de evaporação de água do solo; e d) temperatura baixa (horas menos quentes do dia). Outros aspectos a considerar foram especificados no final do item 2c. A eficiência agrônômica dos diversos fertilizantes nitrogenados geralmente é idêntica (Peruzzo et al., 1994). Porém, a uréia em geral é mais econômica por causa do menor custo da unidade de N.

6) Síntese

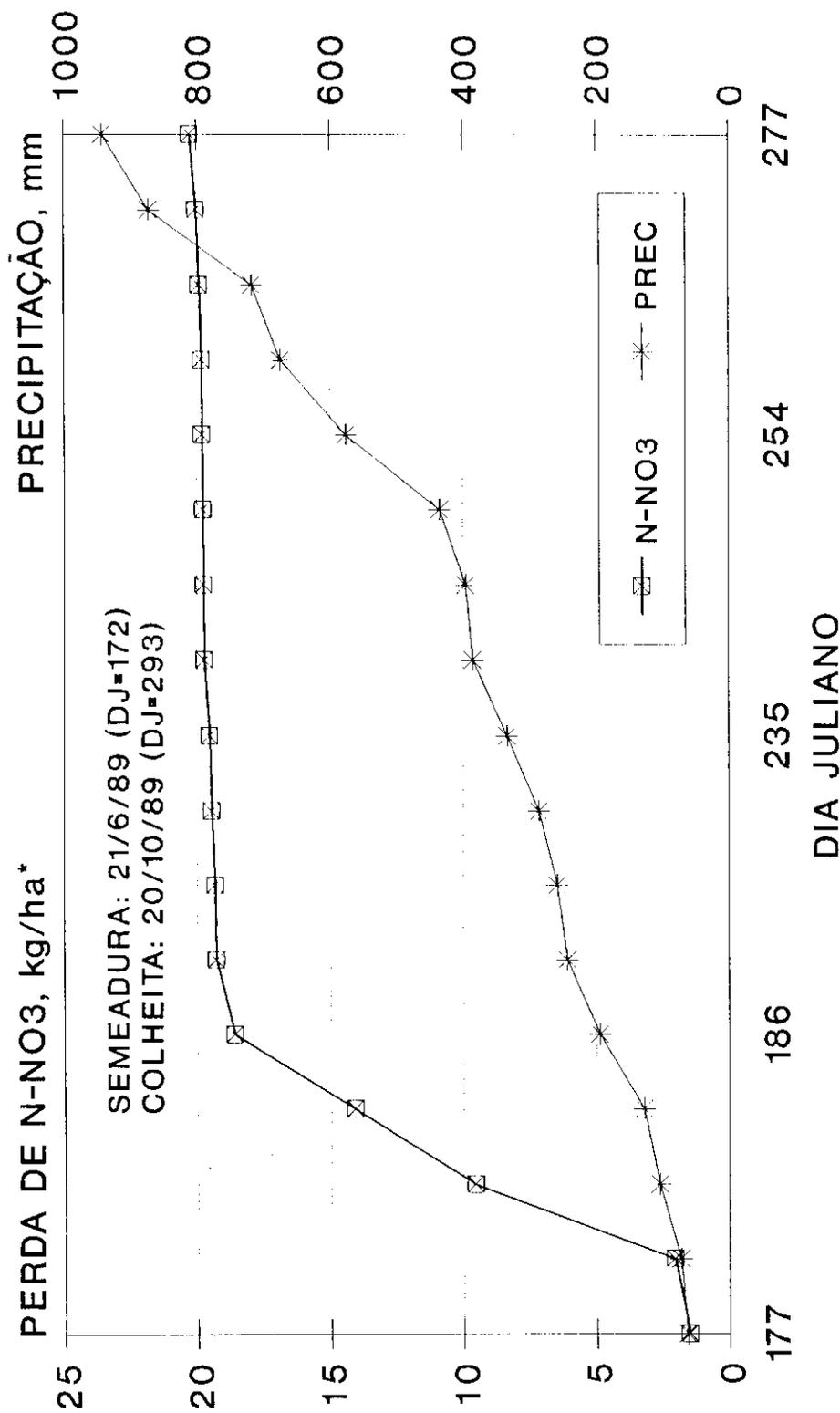
Um dos objetivos do sistema plantio direto é utilizar o solo para a produção de alimentos sem que ocorra redução da sua capacidade produtiva. Isto pode ser obtido pelo manejo dos resíduos culturais e pela aplicação de doses adequadas de fertilizantes e de corretivos, possibilitando, dessa forma, a obtenção de altas produções de palha e de grãos e uma contínua cobertura do solo. Nestas circunstâncias, pode se esperar um lento e gradual aumento do teor de matéria orgânica do solo, mas ao mesmo tempo, um acúmulo de N nesta matéria orgânica, já que o teor deste elemento nos compostos orgânicos é relativamente constante.

Tem-se verificado que as culturas de trigo e de milho podem ter seu rendimento aumentado significativamente se cultivados após leguminosas. A contribuição da soja para a cultura do trigo pode variar de 17 a 59 kg N/ha, e o rendimento de trigo obtido após a cultura da soja tem sido cerca de 300 kg/ha superior ao o obtido após a cultura do milho.

Modelos de previsão da demanda de N pelas culturas, empregando o princípio do balanço de N e envolvendo fatores de solo e da planta, podem ser utilizados para equacionar decisões de adubação nitrogenada no sistema plantio direto.

A acidificação do solo no sistema plantio direto devido a aplicação de fertilizantes nitrogenados pode ser prevista e critérios para a aplicação de uréia podem auxiliar no aumento da eficiência de aproveitamento do N aplicado.

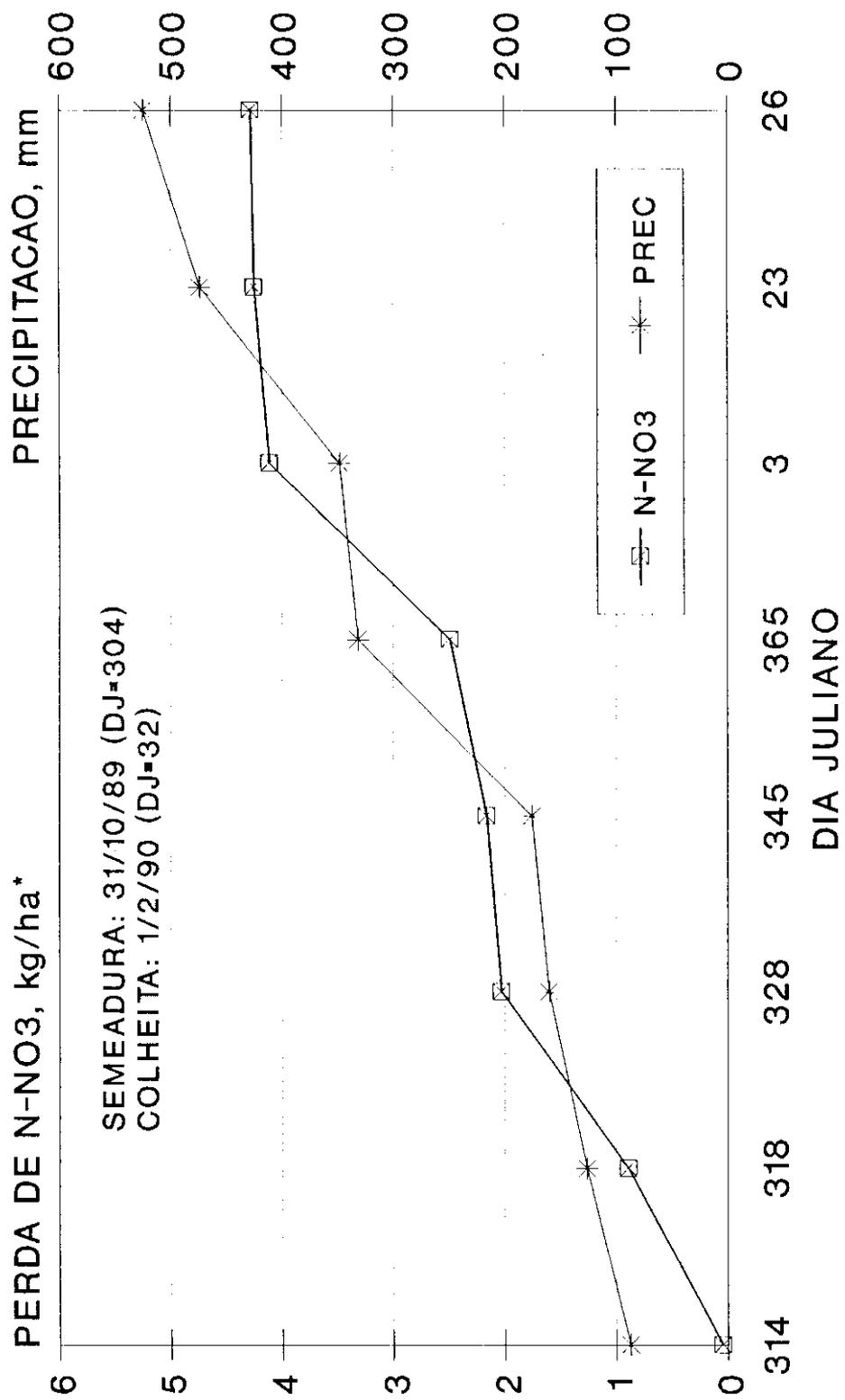
FIG. 1. PERDA ACUMULADA DE N-NO3
EM MICROPARCELAS - TRIGO/89
EMBRAPA-CNPT, PASSO FUNDO, RS



SEMEADURA: 21/6/89 (DJ=172)
COLHEITA: 20/10/89 (DJ=293)

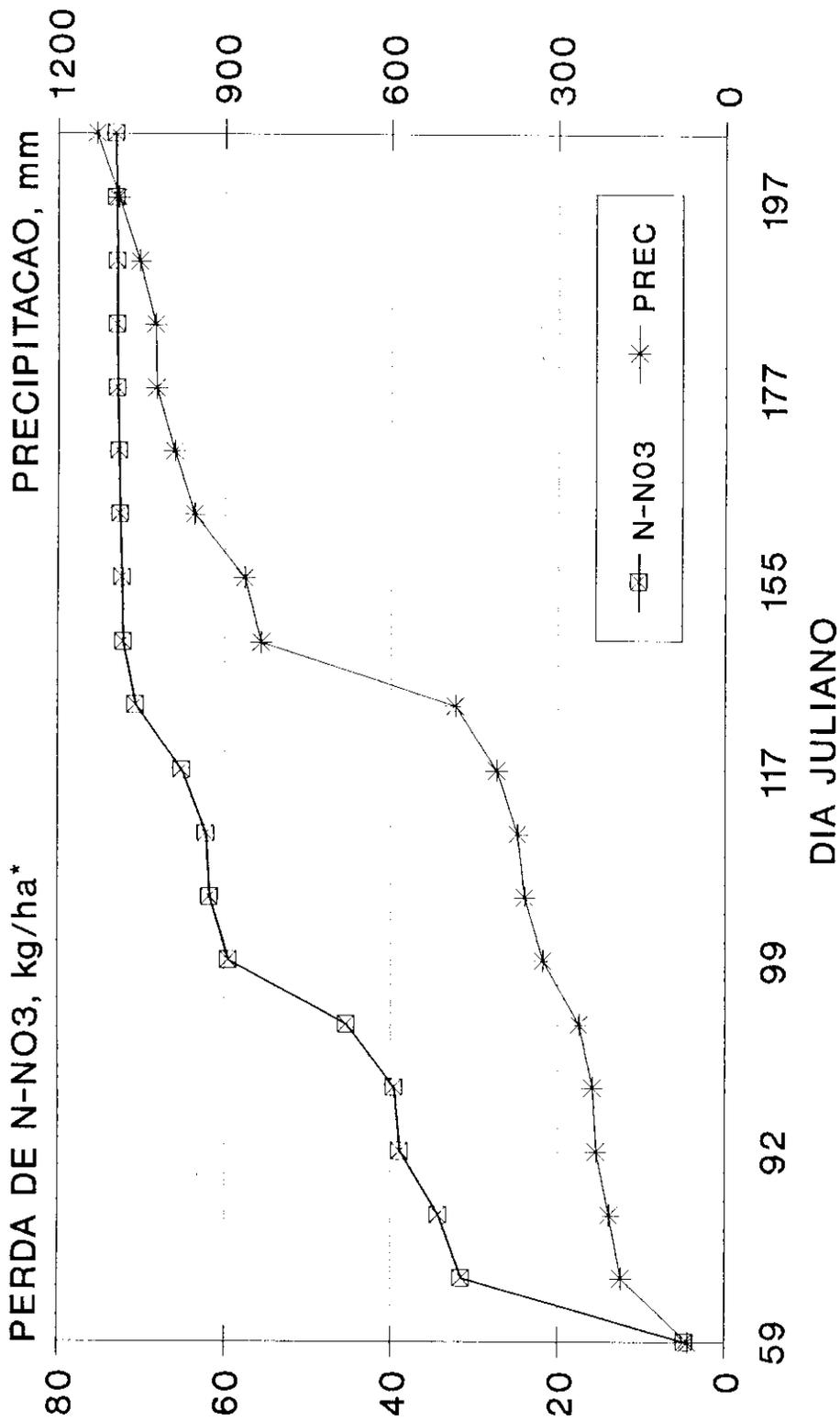
PERÍODO: 26/6/89 A 4/10/89 = 101 DIAS
*VALORES MÉDIOS OBTIDOS COM 5 DOSES DE K2O
APLICAÇÃO DE N: Em kg/ha: DJ 171, 20; DJ 204, 30;
DJ 221, 20; DJ 229, 10; DJ 237, 10; DJ 243, 10.
PRECIPITAÇÃO = 911.2 mm
IRRIGAÇÃO = 20 mm
TOTAL = 931.2 mm

FIG. 2. PERDA ACUMULADA DE N-NO3
EM MICROPARCELAS - SOJA/90
EMBRAPA-CNPT, PASSO FUNDO, RS



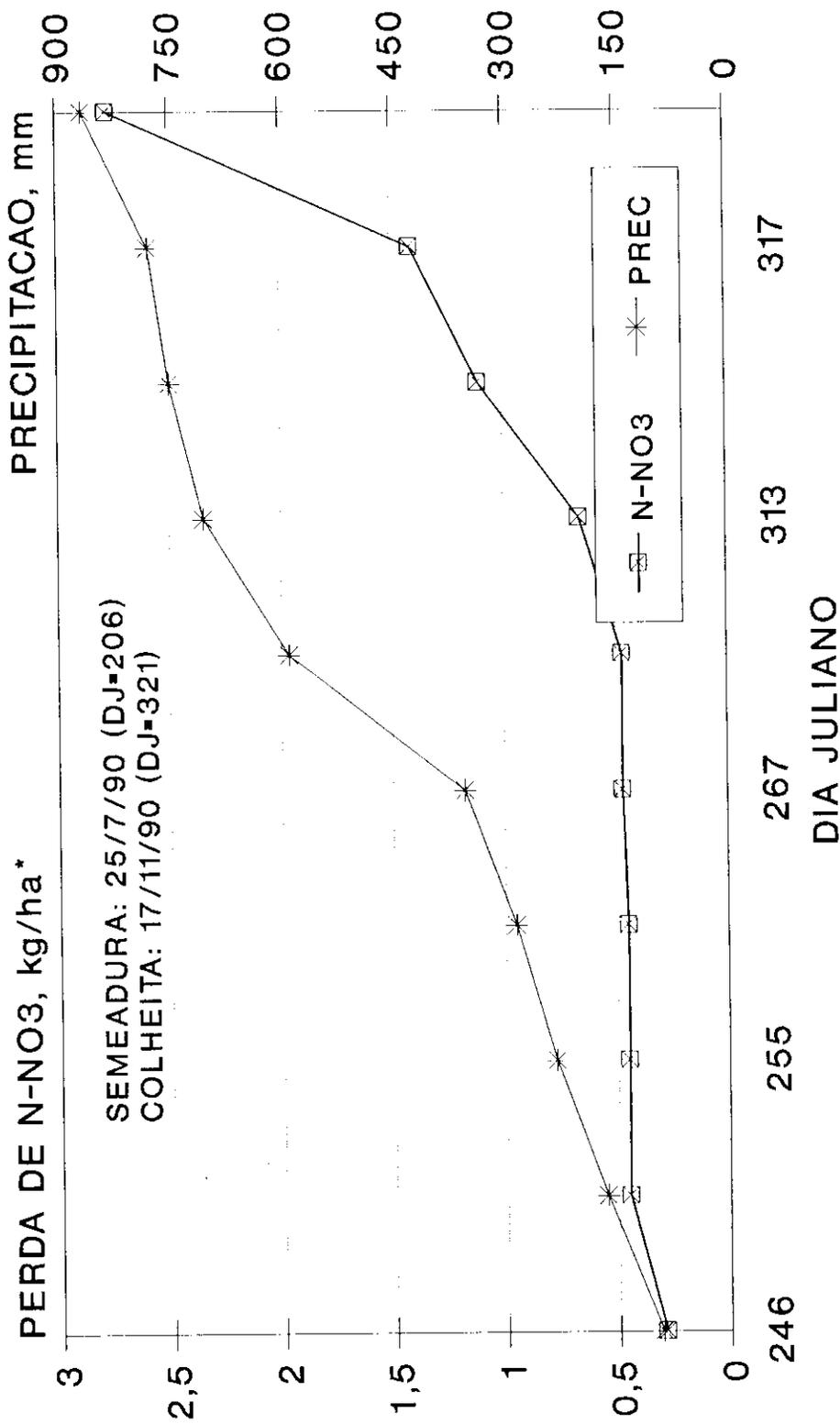
PERIODO: 5/10/89 A 26/1/90 = 114 DIAS
*VALORES MEDIOS OBTIDOS COM 5 DOSES DE K20
PRECIPITACAO = 524.6 mm
IRRIGACAO = 85 mm
TOTAL = 609.6 mm

FIG. 3. PERDA ACUMULADA DE N-NO₃
EM MICROPARCELAS - POUSIO APOS SOJA/90
EMBRAPA-CNPT, PASSO FUNDO, RS



PERIODO: 22/2/90 A 20/7/90 = 149 DIAS
*VALORES MEDIOS OBTIDOS COM 5 DOSES DE K2O
PRECIPITACAO = 1130.6 mm
IRRIGACAO = 0 mm
TOTAL = 1130.6 mm

FIG. 4. PERDA ACUMULADA DE N-NO3
EM MICROPARCELAS - AVEIA/90
EMBRAPA-CNPT, PASSO FUNDO, RS

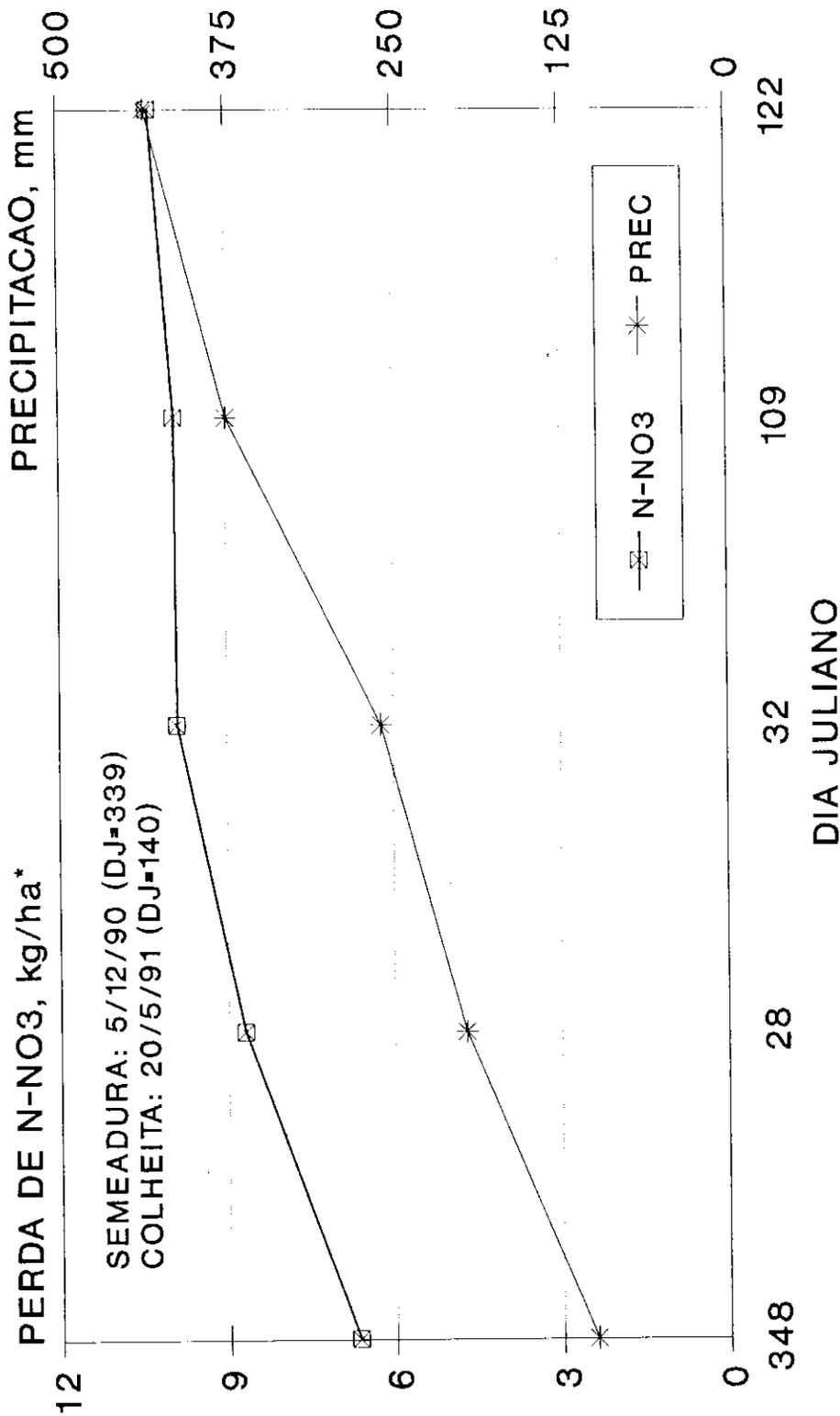


SEMEADURA: 25/7/90 (DJ=206)
COLHEITA: 17/11/90 (DJ=321)

PERIODO: 21/7/90 A 19/11/90 = 122 DIAS
*VALORES MEDIOS OBTIDOS COM 5 DOSES DE K2O
APLICACAO DE N: Em kg/ha: DJ 204, 20; DJ 248, 20;
DJ 264, 20; DJ 282, 20.

PRECIPITACAO = 864.8 mm
IRRIGACAO = 15 mm
TOTAL = 879.8 mm

FIG. 5. PERDA ACUMULADA DE N-NO3
EM MICROPARCELAS - SOJA/90/91
EMBRAPA-CNPT, PASSO FUNDO, RS

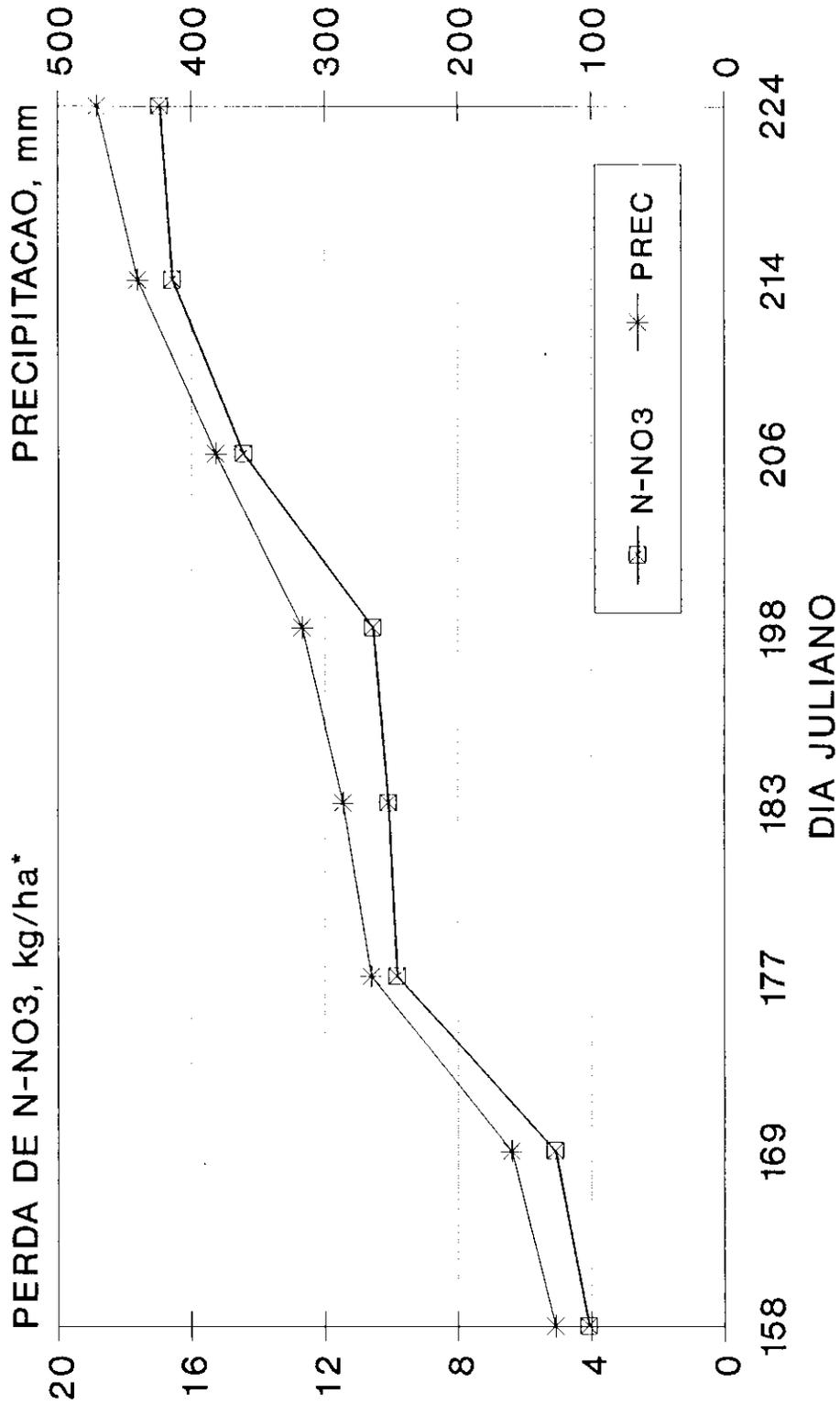


SEMEADURA: 5/12/90 (DJ=339)
COLHEITA: 20/5/91 (DJ=140)

PRECIPITACAO = 434.6 mm
IRRIGACAO = 355 mm
TOTAL = 789.6 mm

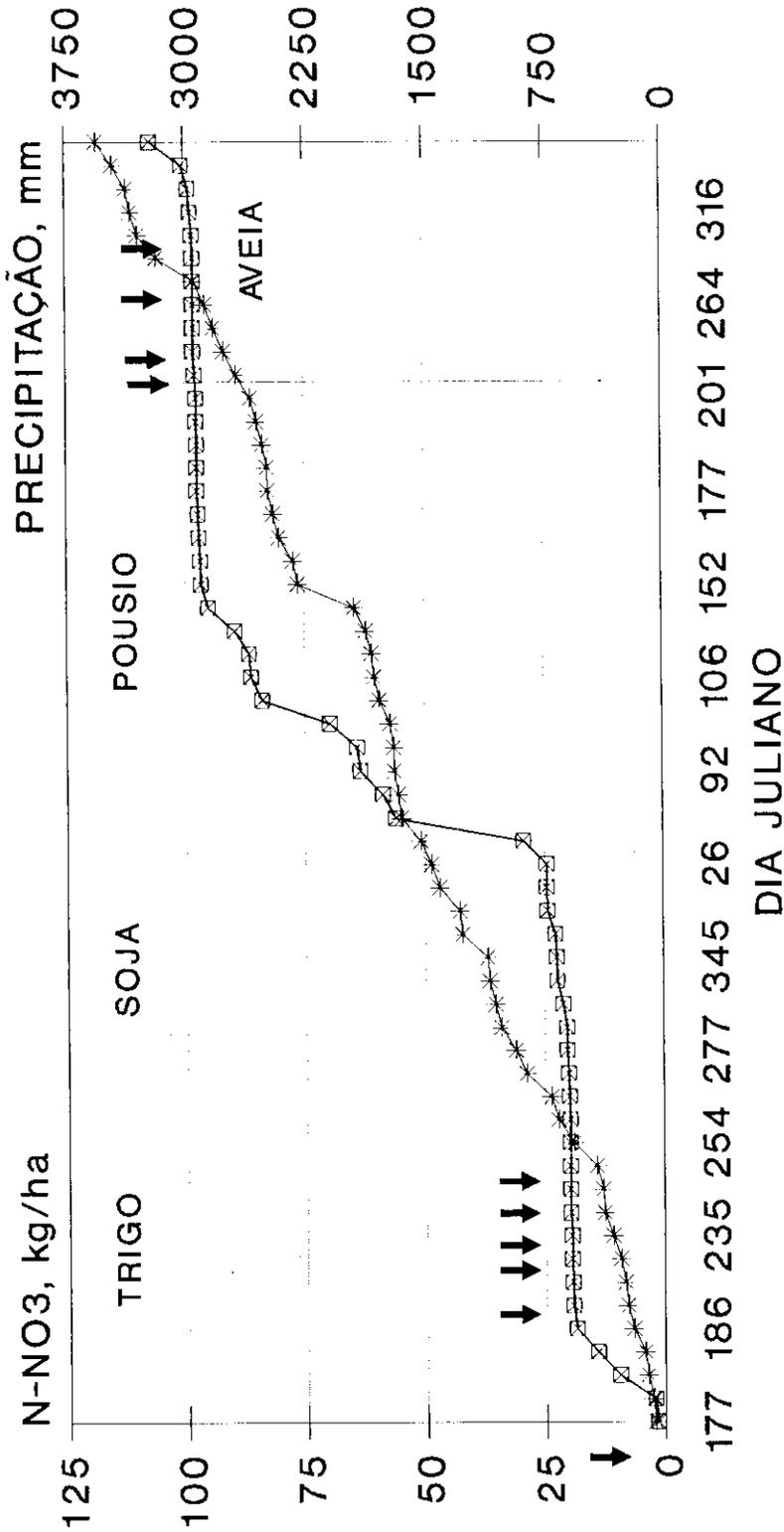
PERIODO: 20/11/90 A 2/5/91 = 164 DIAS
*VALORES MEDIOS OBTIDOS COM 5 DOSES DE K2O

FIG. 6. PERDA ACUMULADA DE N-NO3
EM MICROPARCELAS - POUSIO APOS SOJA/91
EMBRAPA-CNPT, PASSO FUNDO, RS



PERIODO: 3/5/91 A 12/8/91 = 102 DIAS
 *VALORES MEDIOS OBTIDOS COM 5 DOSES DE K20
 PRECIPITACAO = 470.7 mm
 IRRIGACAO = 0 mm
 TOTAL = 470.7 mm

FIG. 7. PERDA ACUMULADA DE N-NO3 POR LIXIVIAÇÃO EM MICROPARCELAS - 1989/90 EMBRAPA-CNPT, PASSO FUNDO, RS



N-NO3

 PREC

POUSIO 02/02/90 (DJ=33) A 24/07/90 (DJ=205)

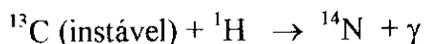
OS DADOS DE N-NO3 E PRECIPITAÇÃO REFEREM-SE AS COLETAS REALIZADAS DE 26/6/89 A 14/12/90 (537 DIAS).

↓ APLICAÇÃO DE N: Em kg/ha: TRIGO - DJ 171,20;DJ 204,30; DJ 221, 20; DJ 229, 10; DJ 237, 10; DJ 243, 10; AVEIA - DJ 204, 20; DJ 248, 20; DJ 264, 20; DJ 282,20.

ANEXO I

7. Origem do elemento químico nitrogênio

Por ocasião da formação do universo (há 4,5 bilhões de anos) supõe-se que existia somente o gás H (o elemento mais leve e mais abundante no universo), constituindo a chamada nébula solar. Em determinado momento os átomos de ^1H (1 próton e 1 elétron) sofreram uma condensação tão intensa, resultando no processo denominado big bang, formando, através de uma enorme explosão nuclear, o ^4He (massa molecular = 4, 2 prótons e 2 neutrons, o segundo mais abundante elemento no universo) e, sucessivamente, a combinação destes elementos gerou elementos cada vez mais pesados, ou seja, de maior número de massa (prótons + neutrons), como, por exemplo, os elementos estáveis ^8Be , ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O , etc. Por este processo formou-se o nosso sistema solar (Raven, 1981, p.73-74), o Sol (uma estrela próxima em contínua fusão nuclear), os planetas Terra, Marte, etc, e as demais estrelas do universo. A Terra e a Lua provavelmente se desprenderam do Sol como se fossem faíscas ou bolas de fogos de artifício (Hillyer, 1978, p.6), ou então, se formaram desde o início do big bang (Metz, 1974). A seqüência de formação de alguns elementos foi a seguinte:



Os primeiros elementos que se formaram são também os que o universo e o nosso planeta apresentam em maior quantidade. Na Tabela 12 consta a distribuição de ^{14}N no planeta Terra.

A litosfera contém cerca de 98 % do total de N da Terra e o restante encontra-se na atmosfera (ar), hidrosfera (água) e biosfera (matéria viva). Segundo Stevenson (1986, p.110) há mais N na biomassa vegetal do que na biomassa animal. No caso da atmosfera, o N molecular (N_2) constitui 78 % dos seus gases, havendo cerca de 8 t N/m² de superfície (considerando uma densidade do ar seco de 1,29 kg/m³ e na pressão de 1 atm o peso 10.340 kg ar/m² e o teor de N no ar de 78 %). A atmosfera é a fonte principal para a fixação química (fertilizantes e outros compostos químicos contendo N) e biológica de N. De acordo com a Tabela 12, o N na matéria orgânica e o retido pelas argilas do solo constitui 242 bilhões de toneladas ($2,2 \times 10^5 + 2,2 \times 10^4$ t) (na Tabela 13 consta 237,1 bilhões de t).

Tabela 12. Quantidade de N no planeta Terra (Stevenson, 1986, p.108)

Camada	N, milhões de t
Litosfera	$1,636 \times 10^{11}$
rochas ígneas	
a) crosta	$1,0 \times 10^9$
b) manto	$1,62 \times 10^{11}$
centro da terra	$1,3 \times 10^8$
sedimentos (N fóssil)	$3,5 - 5,5 \times 10^8$
carvão	$1,0 \times 10^5$
fundo dos mares	$5,4 \times 10^5$
solos:	
a) matéria orgânica	$2,2 \times 10^5$
b) NH_4^+ fixado em argilo-minerais	$2,2 \times 10^4$
Atmosfera	$3,86 \times 10^9$
Hidrosfera	$2,3 \times 10^7$
Biosfera	$2,8 \times 10^5$

8. O N nos solos

Na Tabela 13 consta a distribuição média de N no solo até 1 m de profundidade nas diferentes regiões.

Tabela 13. Estimativa da quantidade de N nos solos até 1 m de profundidade (Stevenson, 1986, p.111)

Região	Área, $\times 10^6 \text{ km}^2$	N no solo, milhões t		
		Orgânico	NH_4^+ fixado	Total
América do Norte	0,203	44.800	4.000	48.800
América do Sul	0,182	22.700	2.300	25.000
Ásia, África, Europa e Oceania	0,836	148.700	14.600	163.300
Total	1,221	216.200	20.900	237.100

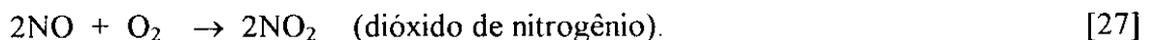
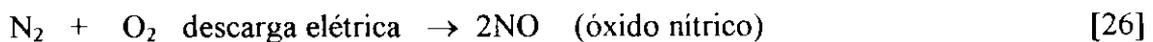
A quantidade de N das rochas ígneas é cerca de 42 vezes maior que na atmosfera ($1,0 \times 10^9 + 1,62 \times 10^{11} / 3,86 \times 10^9$) e a quantidade de N na atmosfera é 16.287 vezes maior que nos solos até 1 m de profundidade ($3,86 \times 10^9 / 2,37 \times 10^5$). Depreende-se, pois, que a atmosfera constitui um depósito importante de N e, por esta estar em íntimo contato com o

solo, a transferência para o solo do N₂ da atmosfera, através da fixação química ou biológica, pode ser realizada por um período virtualmente ilimitado.

A relação C/N da matéria orgânica dos solos é geralmente em torno de 10. Por esta razão, o teor de carbono do planeta Terra é muito maior no metro superior dos solos (1500 x 10⁹ t) do que na vegetação terrestre (800 x 10⁹ t) ou na atmosfera (700 x 10⁹ t) (Raij, 1995). Comparando o teor total de N (Tabela 13) com o de C no metro superior dos solos, verifica-se que a relação média de C/N é, aproximadamente, igual a 6,3 (1500 x 10⁹ t/237 x 10⁹ t). Porém, a relação C/N da camada superficial do solo varia de 10 a 12 e o teor de C diminui com a profundidade (Stevenson, 1986, p.45).

9) Contribuição de N pela chuva

No caso do N provindo das chuvas, as descargas elétricas (relâmpagos) promovem uma fixação química de N, combinando o N₂ com o O₂, formando NO (óxido nítrico) e NO₂ (dióxido de nitrogênio). As reações são as seguintes (Hill & Feigl, 1978, p.266):



O NO₂ reage com a água para formar ácido nítrico (HNO₃).



O HNO₃ é diluído na água da chuva, contribuindo, assim, com o suprimento de NO₃⁻ para o solo, rios e oceanos. Estima-se em cerca de 9 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ a contribuição de N por este processo. Em regiões industriais ou em locais de confinamento de animais, a precipitação pluviométrica contribuir com 30 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ (Legg & Meisinger, 1982, p.508).

PARA PENSAR:

“In science no fact is any better than the methods by which it can be known because the way any fact can be known is a nondisposable part of that fact” (Moment, 1979, p.571).

“Em ciência nenhum fato é melhor do que os métodos pelos quais pode ser conhecido porque o meio pelo qual um fato pode ser conhecido é uma parte inseparável deste fato”.

“A ciência está longe de conhecer o mundo de uma maneira perfeita e adequada; ela tem, no entanto, a pretensão legítima de descobrir para nós, em parte, a natureza e as suas leis. Da mesma forma, se não podemos, com os braços, abarcar uma montanha, podemos, ao menos, pela vista, ter nela um conhecimento parcial” (Jolivet, 1965, p.314).

10) Referências

- ALLEN, H.P. Direct drilling and reduced cultivations. Ipswich: Farming Press Limited, 1981. 219p.
- ANGHINONI, I. Adubação nitrogenada nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: SANTANA, M.B.M. (ed.). Adubação nitrogenada no Brasil. Ilhéus: CEPLAC/SBCS, 1986. p.1-18.
- ANJOS, J.T.; TEDESCO, M.J. Perdas de nitrogênio, por volatilização de amônia, proveniente da uréia aplicada em solos cultivados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 14., 1973. Santa Maria. Anais. Santa Maria: SBCS, 1974. p.232-241.
- ANJOS, J.T.; TEDESCO, M.J. Volatilização de amônia proveniente de dois fertilizantes nitrogenados aplicados em solos cultivados. Científica, Jaboticabal, v.4, n.1, p.49-55, 1976.
- BARBER, S. A. Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach. New York: John Wiley, 1984. 396p.
- BAUER, A.; BLACK, A.L. Quantification of the effect of soil organic matter content on soil productivity. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.58, n.1, p.185-193, 1994.
- BOCK, B.R.; KELLEY, K.R. Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions. Muscle Shoals: SSSA/TVA-NFERC, 1992. 127p.
- BOUWMEESTER, R.J.B.; VLEK, P.L.G.; STUMPE, J.M. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from urea-fertilized soil. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.49, n.2, p.376-381, 1985.
- BROWN, P.L.; DICKEY, D.D. Losses of wheat straw residue under simulated field conditions. Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v.34, n.1, p.118-121, 1970.
- CAMPBELL, C.A.; ZENTNER, R.P.; SELLES, F.; McCONKEY, B.G.; DYCK, F.B. Nitrogen management for spring wheat grown annually on zero-tillage: yields and nitrogen use efficiency. Agronomy Journal, Madison, v.85, n.1, p.107-114, 1993.
- CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: Büll, L.; Cantarella, H. (ed.). Cultura do milho; fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFÓS, 1993. p.147-196.
- CLOTHIER, B.E.; SAUER, T.J. Nitrogen transport during drip irrigation of urea. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.52, n.2, p.345-349, 1988.
- COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Recomendações de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. 3ª ed. Passo Fundo: SBCS-Núcleo Regional Sul/EMBRAPA-CNPT, 1995. 223p.
- COMISSÃO SUL-BRASILEIRA DE PESQUISA DE TRIGO. Recomendações da Comissão Sul-brasileira de Pesquisa de Trigo - 1996. Passo Fundo: UFRGS, 1996. 76p.
- DENARDIN, J.E. Monitoramento físico, químico e biológico de solo sob três sistemas de manejo. In: KOCHHANN, R.A. Relatório anual do subprojeto 04.0.94.344.01. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1995. 18p.
- DIJKSTRA, F. Porque utilizo o plantio direto. Basf, s.l., sd.

- DORAN, J.W.; SMITH, M.S. Organic matter management and utilization of soil and fertilizer nutrients. In: Follett, R.F. et al. Soil fertility and organic matter as critical components of production systems. Madison: SSSA/ASA, 1987. p.53-72. (SSSA Special Publication number 19).
- FERGUSON, R.B.; KISSEL, D.E.; KOELLIKER, J.K.; BASEL, W. Ammonia volatilization from surface-applied urea: effect of hydrogen ion buffering capacity. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.48, n.3, p.578-582, 1984.
- FERNANDES, J.M; KOCHHANN, R.A.; SELLES, F.; ZENTNER, R.P. Manual de manejo conservacionista do solo para os Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1991. 69p.
- HALVORSON, A.D.; ALLEY, M.M.; MURPHY, L.S. Nutrient requirements and fertilizer use. In: HEYNE, E.G. Wheat and wheat improvement. 2nd ed. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1987. p.345-383.
- HAYES, W. Minimum tillage farming. Brookfield: No-Till Farmer, 1982. 202p.
- HESSE, P.R. A textbook of soil analysis. London: John Murray, 1971. 519p.
- HILL, J.W.; FEIGL, D.M. Chemistry and life. Minneapolis: Burgess Publishing Company, 1978. 672p.
- HILLYER, V.M. A child's history of the world. Baltimore: Calvert School, 1978. 494p.
- HOFFMANN, G. Bestimmung von mineralischem (nitrat) stickstoff in bodenprofilen (N_{min} - labormethode). In: Methodenbuch band I - die untersuchung von böden. Darmstadt: VDLUFA, A6.1.4.1, p.1-14, 1991.
- JOLIVET, R. Curso de filosofia. Rio de Janeiro: Agir Editora. 7^a Ed., 1965. 445p.
- KELLER, G.D.; MENGEL, D.B. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers surface applied to no-till corn. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.50, n.4, p.1060-1063, 1986.
- KOCHHANN, R.A. Conservation tillage in Southern Brazil. In: Zentner, R.P. et al.(ed.). Conservation tillage for subtropical areas. Passo Fundo: CIDA/EMBRAPA-CNPT, 1990. p.18-27.
- LARSON, W.W.; HOLT, R.F.; CARSLON, C.W. Residues for conservation. In: Oschwald, W.R. Crop residue management systems. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1978. p.-15.
- LEGG, L.O.; MEISINGER, J.J. Soil nitrogen budget. In: Stevenson, F.J. (ed.). Nitrogen in agricultural soils. Madison, ASA/CSSA/SSSA, 1982. p.503-566.
- LOPES, A.S. Manual de fertilidade do solo. São Paulo: ANDA/POTAFÓS, 1989. 155p.
- LYNCH, J.M. Straw residues as substrates for growth and product formation by soil microorganisms. In: Grossbard, E. Straw decay and its effect on disposal and utilization. Chichester: John Wiley & Sons, 1979. p.47-56.
- METZ, W.D. Exploring the solar system (II): models of the origin. Science, v.186, p.814-818, 1974.
- MIELNICZUK, J. Adubação do trigo no Brasil. In: Osório, E.A. Trigo no Brasil. Campinas: Fundação Cargil, 1982. Vol. 2. p.291-317.
- MOMENT, G.B. Bioscience. v.29, n.10, p.571, 1979.
- MONEGAT, C. Plantas de cobertura do solo; características e manejo em pequenas propriedades. Chapecó: Ed. do autor, 1991. 2^a edição. 336p.

- MUZILLI, O. Fertilidade do solo em plantio direto. In: Fancelli, A.L. et al. (ed.).
 Atualização em plantio direto. Campinas: Fundação Cargill, 1985. p.147-160.
- NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In:
 Page, A.L. et al. Methods of soil analysis; part 2, chemical and microbiological
 properties. 2nd ed. Madison: ASA/SSSA, 1982. p.539-579.
- O'DEEN, W.A. Wheat volatilized ammonia and resulting nitrogen isotopic fractionation.
 Agronomy Journal, Madison, v.81, p.980-985, 1989.
- OLSON, R.A.; KURTZ, L.T. Crop nitrogen requirements, utilization, and fertilization. In:
 STEVENSON, F.J. Nitrogen in agricultural soils. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1982.
 Chap.15, p.567-604.
- PARKER, D.T. Decomposition in the field of buried and surface-applied cornstalk residue.
 Soil Science Society of America Proceedings, Madison, v.26, n.6, p.559-562, 1962.
- PERUZZO, G.; SIQUEIRA, O.J.F.; WIETHÖLTER, S. Eficiência agronômica de
 fertilizantes nitrogenados para a cultura do trigo. Pesquisa Agropecuária Brasileira,
 Brasília, v.29, n.7, p.1027-1034, 1994.
- PHILLIPS, R.E.; PHILLIPS, S.H. No-tillage agriculture; principles and practices. New
 York: Van Nostrand Reinhold Company, 1984. 306p.
- PHILLIPS, S.H.; YOUNG Jr., H.M. No-tillage farming. Milwaukee: Reiman Associates,
 1973. 224p.
- RAIJ, B. van. Sistema integrado de nutrição de plantas. In: Pereira, J.R.; Faria, C.M.B.
 Fertilizantes: insumo básico para agricultura e combate à fome. Petrolina: EMBRAPA-
 CPATSA/SBCS, 1995. p.116-123.
- RAVEN, P.H.; EVERT, R.F.; CURTIS, H. Biology of plantas. New York: Worth
 Publishers, 1981. 686p.
- RODRIGUES, M.B.; KIEHL, J.C. Volatilização de amônia após o emprego de uréia em
 diferentes doses e modos de aplicação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas,
 v.10, n.1, p.37-43, 1986.
- RUEDELL, J. Plantio direto na região de Cruz Alta. Cruz Alta: FUNDACEP, 1995. 134p.
- SÁ, J.C. de M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: EMBRAPA-
 CNPT; FECOTRIGO-FUNDACEP; FUNDAÇÃO ABC. Plantio direto no Brasil. Passo
 Fundo: Editora Aldeia Norte, 1993. p.37-60.
- SCHNITZER, M. Organic matter characterization. In: Page, A.L. et al. Methods of soil
 analysis; part 2, chemical and microbiological properties. 2nd ed. Madison: ASA/SSSA,
 1982. p.581-594.
- SMITH, C.M. Interpreting inorganic nitrogen soil tests: sample depth, soil water, climate,
 and crops. In: Peck, T.R.; Cope Jr., J.T.; Whitney, D.A. Soil testing: correlating and
 interpreting the analytical results. Madison: ASA/CSSA/SSSA, 1977. p.85-98.
- STEVENSON, F.J. Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. New
 York: Wiley-Interscience, 1986. 380p.
- STUMM, W.; MORGAN, J.J. Aquatic chemistry. New York: John Wiley & Sons, 1981.
 p.780.
- STUMPE, J.M.; VLEK, P.L.G.; LINDSAY, W.L. Ammonia volatilization from urea and
 urea phosphates in calcareous soils. Soil Science Society of America Journal, Madison,
 v.48, n.4, p.921-927, 1984.

- THOMAS, G.W.; FRYE, W.W. Fertilization and liming. In: Phillips, E.R.; Phillips, S.H. No-tillage agriculture; principles and practices. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1984. p.87-126.
- TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. Soil fertility and fertilizers. New York: Macmillan Publishing Company, 1985. 754p.
- TURCO, R.F.; KENNEDY, A.C.; JAWSON, M.D. Microbial indicators of soil quality. In: Doran, J.W. et al. (ed.). Defining soil quality for a sustainable environment. Madison: SSSA/ASA, 1994. p.73-90.
- VLEK, P.L.G.; CRASWELL, E.T. Effect of nitrogen source and management on ammonia volatilization losses from flooded rice-soil systems. Soil Science Society of America Journal, Madison, v.43, n.2, p.352-358, 1979.
- WELLS, K.L.; THOMPSON Jr., W.R. Current viewpoints on the use of soil nitrate tests in the South. Madison: ASA, 1992. 51p.
- WIETHÖLTER, S. Parâmetros de difusão de potássio no solo - Relatório de andamento do período de setembro de 1990 a março de 1992. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT/CNPq, 1992. 142p.
- WIETHÖLTER, S. Adubação nitrogenada em triticales com base no teor de matéria orgânica do solo. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1993. 25p.
- WIETHÖLTER, S. Avaliação da disponibilidade de nitrogênio no solo e sua relação com o desenvolvimento de cereais de inverno e de culturas associadas. In: Relatório anual do subprojeto 04.0.94.344.03. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1995. 30p.
- WIETHÖLTER, S.; CIPRANDI, M.A.O. Perdas de nutrientes por lixiviação e escoamento superficial em microparcelas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 19, 1990. Santa Maria. Resumos. Santa Maria: UFRGS/Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1990. p.109.