

**MOVIMENTO E PERDAS POR LIXIVIAÇÃO DE NITROGÊNIO
CO(¹⁵NH₂)₂ - EM UM ALFISOL CULTIVADO
COM MILHO (*Zea mays*, L.)**

JOSÉ CARLOS DE ARAÚJO SILVA

Orientador: KLAUS REI CHARDT

**Dissertação apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade
de São Paulo, para obtenção do título de
Mestre em Energia Nuclear na Agricultura.**

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Março - 1982

D E D I C O

ã minha mãe

e

ao meu pai (*in memoriam*)

M U I T O

ã minha mulher

e

àqueles que partilharam vontades

AGRADECIMENTOS

Dr. Klaus Reichardt

Dr. Paulo Leonel Libardi

por todos os alcances.

Secretaria da Agricultura do Maranhão

UEMA - Escola de Agronomia do Maranhão

USP - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

Agência Internacional de Energia Atômica

Centro de Energia Nuclear na Agricultura

Comissão Nacional de Energia Nuclear

CAPES - Ministério da Educação e Cultura

Fundação CARGILL

pelas oportunidades e amparo financeiro-material

Í N D I C E

	<u>Página</u>
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Alguns aspectos do nitrogênio no ambiente	3
2.2. Lixiviação - Um sumidouro do N no solo	5
2.3. Relações balanço hídrico - perdas de N no solo	7
2.4. O traçador nitrogênio-15	12
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1. Parcela experimental	15
3.1.1. Características do solo utilizado	16
3.1.2. Instrumental de campo	16
3.1.3. O instrumental no campo	19
3.1.4. Plano experimental	21
3.1.5. Implantação e condução da cultura	22
3.2. Medidas, amostragens e determinações	24
3.2.1. Componentes do balanço hídrico	24
3.2.2. Amostragem e análise da solução do solo	28
3.2.3. Cálculo de perdas de $N-NO_3^-$ por lixiviação	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1. Balanço hídrico	31
4.2. Variação da concentração de $N-NO_3^-$ no perfil do solo	34
4.3. Perdas de nitrogênio por lixiviação	40
5. CONCLUSÕES	45
6. SUGESTÕES	46
7. LITERATURA CITADA	48
APÊNDICE	60

MOVIMENTO E PERDAS POR LIXIVIAÇÃO DE NITROGÊNIO - $\text{CO}(\text{}^{15}\text{NH}_2)_2$ -
EM UM ALFISOL CULTIVADO COM MILHO (*Zea mays*, L.)

José Carlos de Araújo Silva

Klaus Reichardt
Orientador

RESUMO

Em um Paleudalf óxico (Terra Roxa Estruturada) do campus da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, Piracicaba, São Paulo, estudaram-se as perdas de nitrogênio por lixiviação através da dinâmica da água no solo durante o ciclo de uma cultura de milho (*Zea mays*, L.), híbrido CARGILL 111-X, no período de outubro de 1979 a fevereiro de 1980. O balanço hídrico completo da cultura (população de 50000 plantas.ha⁻¹) foi estimado utilizando-se tensiômetros com manômetro de Hg e curvas de retenção de água. As variações da concentração de N-NO_3^- , temporal e nas profundidades 60, 90 e 120 cm (esta última considerada limite do alcance do sistema radicular) foram acompanhadas pela análise da solução do solo, obtida através de extratores com cápsula porosa de cerâmica. A fertilização consistiu de uréia (45% N), superfosfato simples (20% P_2O_5) e cloreto de potássio (60% K_2O), aplicados respectivamente nas doses de 100, 80 e 60 kg.ha⁻¹.

A uréia foi enriquecida em 5,86 ($\pm 0,176$)% de átomos de ^{15}N . Durante os 152 dias do ciclo da cultura (com produção média de $6,840 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), a área recebeu 620,90 mm de água, via chuvas, evapotranspirou 461,40 mm (média de $3 \text{ mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) e perdeu 194,80 mm, via drenagem profunda (cerca de 30% das saídas de água), sob condições de temperatura entre 19,8 e 26°C . As perdas de N-NO_3^- por lixiviação (na profundidade de 120 cm) foram estimadas em $32,40 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, com 34% provenientes do fertilizante. A utilização de tensiômetros e extractores permitiu o estudo do estado de energia da água e sua relação com a concentração de N-NO_3^- no perfil do solo com o tempo, mostrando a versatilidade desses instrumentos. Algumas sugestões quanto ao seu uso são apresentadas, além de apêndice contendo a metodologia usada na determinação dos coeficientes de transmissão da água do solo.

MOVEMENT AND LEACHING LOSSES OF N-CO($^{15}\text{NH}_2$) $_2$ FERTILIZER
IN AN ALFISOL UNDER A CORN CROP (*Zea mays*, L.)

José Carlos de Araújo Silva

Klaus Reichardt

Adviser

SUMMARY

In an oxic Paleudalf (Terra Roxa Estruturada) at "Luiz de Queiroz" campus, University of São Paulo, Piracicaba, Brazil, the nitrogen leaching losses were studied in a corn crop (*Zea mays*, L.) during one whole growing cycle (from 1979 October to 1980 February), through the study of soil water dynamics. The complete crop water balance was established using Hg manometer tensiometers. The variations of the NO_3^- -N concentration with the time and soil depth (60, 90 and 120 cm) were followed by ceramic porous cup samplers. The crop was fertilized with urea (45% N), superphosphate (20% P_2O_5) and potassium chloride (60% K_2O) rates of 100, 80 and 60 $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ respectively and the urea was labelled with 5.86 (± 0.176) atoms % ^{15}N excess. During the 5 months of the crop cycle, the area received 620.90 mm of water by rainfall and evapotranspired 461.40 mm (average 3 $\text{mm}\cdot\text{day}^{-1}$) and lost 194.80 mm by internal drainage (about 30% on the water output) under temperature

conditions between 19.8 and 26°C. The crop yield was about 6,840 kg.ha⁻¹ and the estimation of nitrate-N losses below the root zone by leaching (120 cm depth) was 32.40 kg.ha⁻¹, of which 34% were from fertilizer. The utilization of tensiometers and soil solution samplers allowed studies of the soil water energy status and temporal relationship with NO₃⁻-N concentration in the soil profile, showing the versatility of these instruments. Some suggestions about the use of both are presented, and in an appendix methodology used to determine the soil water conduction coefficients is presented.

1. INTRODUÇÃO

Grande parte da extensa bibliografia existente sobre o nitrogênio em agricultura tem se justificado ou pela dificuldade na compreensão do seu comportamento no solo, ou pela sua essencialidade aos vegetais. Algumas das razões mais conhecidas, motivos das preocupações dos pesquisadores, residem, entre outros, nos seguintes fatos:

- o nitrogênio está presente em, praticamente, todos os processos vitais dentro do metabolismo vegetal; além disso, é exigido sempre em maior proporção em relação aos demais nutrientes, à exceção de carbono, hidrogênio e oxigênio;
- mais de 90% do nitrogênio do solo está na forma orgânica, geralmente proteica, considerada não assimilável pelas plantas;
- sua presença no solo é extremamente variável, dependente dos diversos fatores intrínsecos ou extrínsecos ao solo.

Nos últimos anos, os estudos sobre o nitrogênio não têm se limitado apenas à sua função de nutriente, mas também ao seu caráter poluidor das águas subterrâneas, uma vez que é bastante móvel em solo úmido, quando em formas minerais, especialmente a aniônica.

Adicionalmente, o emprego de técnicas nucleares tem se mostrado uma ferramenta útil na pesquisa agrícola. O uso do isótopo ^{15}N como traçador é considerado o meio mais eficaz de detecção, discriminação e avaliação dos caminhos seguidos pelo nitrogênio no sistema solo-planta-atmosfera.

A esse respeito, amplos programas estão em execução em quase todos os países, coordenados pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), com sede em Viena, Áustria. No Brasil, as atividades que envolvem essas técnicas são controladas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e, nos últimos doze anos, um volume expressivo de trabalhos já foi concluído, desenvolvido principalmente pelo Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), da Universidade de São Paulo (USP) e pelo Departamento de Energia Nuclear (DEN), da Universidade Federal de Pernambuco (UFPe). Alguns desses estudos são, particularmente, ligados ao comportamento do fertilizante nitrogenado em solos cultivados com cereais.

No presente trabalho, procurou-se estudar o movimento e as prováveis perdas de N-uréia fertilizante, por lixiviação, para camadas mais profundas de um Alfisol, através da dinâmica da água durante o ciclo de uma cultura de milho, destacando-se a metodologia de campo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Alguns Aspectos do Nitrogênio no Ambiente

O nitrogênio é um dos elementos mais largamente distribuídos na natureza. A maior quantidade está presente na crosta terrestre ligada a rochas e sedimentos (MENGEL e KIRKBY, 1978). Isso vem de encontro à crença comum de que a atmosfera é o maior reservatório do elemento. Esta vem em segundo lugar (DELWICHE, 1970), ou seja: $3,8 \cdot 10^{15}$ t de N_2 na atmosfera e $18 \cdot 10^{15}$ t de N na outra fonte.

O solo conta apenas com uma fração mínima do N litosférico e deste, somente uma pequena proporção é inorgânica, prontamente disponível para as plantas, principalmente nas formas iônicas NO_3^- e NH_4^+ . Uma vez que sua principal ocorrência no solo é nas formas orgânicas, as transformações destas formas para inorgânicas e vice-versa são de grande importância. Os processos que identificam estas duas transformações são denominados genericamente de mineralização e imobilização. Pela mineralização, os compostos orgânicos são transformados em formas minerais, em-

quanto que, pela imobilização, o sentido inverso do processo se efetiva. O envolvimento biológico destes processos é bem discutido, e bons exemplos são TISDALE e NELSON (1975), MENGEL e KIRKBY (1978), RUSSEL (1977) ou SAN-CHEZ (1976) que dá enfoque aos solos dos trópicos.

MALAVOLTA (1980) estima entre 1000 e 1500 kg de N total por hectare de solo até a profundidade de 30 cm, sendo que a fração mineral (geralmente NO_3^- e um pouco de NH_4^+) corresponde a apenas cerca de 25 kg. Em certas condições a última cifra pode tender a zero, enquanto que em outras poderá crescer bastante. Assim, VERDADE (1951), estudando a variação natural do teor de nitratos na Terra Roxa Estruturada, encontrou como valores limites (na profundidade de 20 cm) 10 e 420 kg. Luminosidade, temperatura, chuvas, material incorporado ao solo e a população microbiana residente são alguns dos fatores condicionantes da grande flutuação nas taxas instantânea e acumulada das formas minerais do elemento no perfil do solo.

Entre os elementos minerais essenciais para a vida da planta, há mais átomos de N na matéria seca (cerca de 3 vezes) do que de qualquer outro elemento que se considere. Pesek, citado por MALAVOLTA (1981), diz que os átomos de N podem aparecer em número maior do que o dos demais juntos (exceto C, H e O).

O uso de fertilizantes químicos é um dos meios imediatistas de aumentar a produção das culturas e os nitrogenados são, de longe, os mais largamente empregados. O melhor uso das fontes nitrogenadas é o objetivo fundamental das pesquisas sobre nitrogênio. BARTHOLOMEW (1971) a esse respeito cita que um dos primeiros problemas enfrentados é o de maior

interesse é a eficiência na utilização do nitrogênio disponível do solo pelas plantas. Vários trabalhos visando esse aspecto têm sido realizados em diferentes partes do mundo, num programa de fertilizantes nitrogenados orientado pela IAEA (1970), que comprovam esse fato.

A habilidade do milho, em particular, para utilizar o N flutua entre 30 e 60%. Resultados como os de BROADBENT e CARLTON (1978), em trabalho consecutivo de três anos sob condição de irrigação, confirmam isso. Os autores concluíram que doses maiores aumentam a produção, em detrimento da eficiência de utilização do fertilizante. Com relação às diferentes fontes, épocas e métodos de aplicação, HERA (1979) obteve máxima eficiência de uso (48,3%) com uréia aplicada em cobertura, antes da floração. Segundo CHO *et alii* (1967), a eficiência do uso pela planta também aumenta com a idade, resultado também encontrado aqui entre nós (CALVACHE *et alii*, 1981). Estes últimos autores fizeram seus estudos nos híbridos CARGILL 111-X e CARGILL-511 em TRE (Paleudalf óxico) em São Paulo, usando 100 kg N-uréia/ha, com 2/3 aplicados 42 dias após a germinação. A máxima eficiência se deu na floração (60 a 75 dias após a germinação) e o total, em torno de 30%. IVANKO (1972), numa revisão sobre o tema, mostra que a eficiência do milho, em condições de campo, nunca excede a 60%, variando entre 30 e 40% em condições menos adequadas, sendo fatores influentes tanto edáficos (tipo e teor de argila, acidez e teor de N solúvel), como climatológicos (temperatura, chuvas).

2.2. Lixiviação - Um Sumidouro do N no Solo

As perdas de fertilizantes nitrogenados aplicados aos so-

los são agrupadas por THENABADU (1979) em quatro categorias: perdas gasosas, por lixiviação, por escoamento superficial e por imobilização que pode ser considerada um fenômeno temporário de não disponibilidade devido à atividade microbiológica. Outros processos como fixação pelas argilas e húmus podem estar presentes e são considerados fenômenos de não disponibilidade temporária. Esse autor afirma ainda que as perdas gasosas e por lixiviação são as mais frequentes.

A lixiviação é entendida usualmente como sendo a remoção do nitrogênio disponível dos limites da zona radicular pela água. Esse termo é assim tratado por BARTHOLOMEW (1971) em revisão sobre o uso de ^{15}N na relação solo-planta, onde discute a necessidade de ser claramente estabelecida a diferenciação entre lixiviação e o que ele chama de "movimento limitado do N no solo" que pode ser descendente ou ascendente. Importa, contudo, para o conceito de perda por lixiviação, que o movimento "líquido" do elemento seja para baixo.

Até recentemente, a principal razão para medição da concentração de NO_3^- na solução do solo abaixo do sistema radicular era avaliar a perda de N pela cultura e estimar a redução na produção ou a necessidade de N-fertilizante a ser adicionado para compensar estas perdas. Nos últimos anos, porém, com as elevadas concentrações de NO_3^- encontradas nos aquíferos, a ênfase no estudo de lixiviação tem sido ampliada em vista da poluição desses corpos de água.

Já se dispõe de grande volume de informações acerca do comportamento do N- NO_3^- no sistema solo-planta em relação ao clima e à natureza do solo e da planta. THOMAS (1970) e STEWART (1970), entre outros, revisaram estes aspectos, e em ambas as revisões mostram a importância da chuva ou da quantidade de drenagem na lixiviação do N-nitrato.

Nas áreas do Sudeste da Califórnia (EUA), as quais apresentam longos períodos de estiagem, necessitando, assim, irrigação intensiva para alcance de produções agrícolas bem sucedidas, estudos significativos de perdas de $N-NO_3^-$ por lixiviação têm sido conduzidos. PRATT e CHAPMAN (1961), que estudaram esse aspecto através de lisímetros durante 20 anos, verificaram que as perdas de $N-NO_3^-$ se efetivaram sempre que as chuvas excederam as normais da região. NELSON (1970) discute as técnicas de pesquisa e aproximações necessárias na solução de questões ligadas às perdas de nutrientes no sistema solo-planta.

2.3. Relações Balanço Hídrico-Perdas de N no Solo

O conhecimento detalhado da dinâmica da água durante o desenvolvimento de uma cultura fornece elementos essenciais ao estabelecimento ou aprimoramento de práticas de manejo agrícola. Estudos dessa natureza em condições de campo dando ênfase a fluxos de água na zona radicular são incomuns e nem sempre completos, devido à complexidade experimental. LA RUE *et alii* (1968), BLACK *et alii* (1970), CRUCIANI (1972), PEREIRA *et alii* (1974) e CASTRO (1979) são exemplos disso.

ROSE e STERN (1967) propuseram um modelo comportando uma análise completa da extração da água do solo por uma cultura, que serviu de base para REICHARDT *et alii* (1979a) estudarem a dinâmica da água em um Latossolo textura média do Sudeste brasileiro, cultivado com milho. As condições em que trabalharam permitiram mostrar a importância da drenagem profunda como componente do balanço hídrico e que é possível determinar a distribuição radicular desde que as características físicas e hídricas do

perfil sejam conhecidas. As implicações na quantificação da drenagem profunda ou fluxo de água podem ser vistas com detalhe em REICHARDT (1975).

O transporte de nutrientes por fluxo de massa, também chamado fluxo por convecção, depende estritamente do fluxo da água (REICHARDT, 1975), pois ele compreende a quantidade de nutrientes arrastados pela água por unidade de secção transversal ao fluxo por unidade de tempo. Dessa forma, conhecidos o fluxo de água e a concentração de um dado nutriente na água, o fluxo de massa do nutriente considerado é estimado pelo produto numérico de ambos. Alguns aspectos ligados à espécie iônica, dimensão vertical do sistema radicular, amostragem e análise da concentração de elementos no solo são levados em conta neste procedimento, bastante utilizado em estimativas de lixiviação de íons no solo. Baseados nestas condições, algumas suposições são feitas para o caso particular do nitrogênio, como se seguem.

O fluxo de massa deve ser o responsável único pelo movimento do $N-NO_3^-$, espécie iônica considerada "livre" nos solos onde predominam as cargas negativas de superfície. O tipo de cargas sistemas oxidicos pode ser facilmente estimado por medição do seu pH, em água e num sal neutro como KCl N. MEKARU e UEHARA (1972) definiram ΔpH como a diferença entre o pH em KCl N e em água, sendo o sinal correspondente ao da carga líquida do solo. Em caso negativo, existe carga líquida negativa (CTC) e, em caso contrário, a capacidade de troca aniônica (CTA) predomina.

Os Oxisols, Ultisols e Alfisols exibem forte correlação entre carga e pH (SANCHEZ, 1976). VanRAIJ e PEECH (1972) encontraram baixa CTA (menor de 1 meq/100 g solo) nos horizontes A e B de Oxisols e Alfisols

brasileiros. Mesmo na mais uniforme e extensa área de Oxisol do mundo, o Planalto Central do Brasil, a grande maioria dos solos tem valores de ΔpH negativos (CAMARGO e FALESI, 1975).

Assume também que as variações espacial e temporal são mínimas. O fluxo de massa deve ser predominantemente vertical e a profundidade do plano inferior da zona radicular atinge a zona não saturada do perfil (SINGH e SEKHON, 1979). Considera-se geralmente que o NO_3^- nesta zona é estável devido à insuficiência no suprimento de carbono oxidável para que a denitrificação se efetive (VIETS e HAGEMAN, 1971). STEWART *et alii* (1967) encontraram baixa população de bactérias nesta zona, o que está de acordo com os resultados de KIMBLE *et alii* (1972), os quais concluíram que a energia para a atividade de microrganismos anaeróbicos é limitada em camadas de solo abaixo de 100 cm.

PRATT *et alii* (1972) e ADRIANO *et alii* (1972 a,b) investigaram em detalhe o destino do $N-NO_3^-$ na zona não saturada do solo. Obtiveram dados de concentração de NO_3^- em relação a práticas culturais (irrigação e adubação) pela coleta de amostras de solo até a profundidade de 15,25 m em 40 locais, cultivados com citrus e hortaliças na região costeira e com plantas caducifólias e hortaliças no interior da Califórnia (EUA). Os resultados obtidos após 10 anos de estudos, apontaram os três fatores mais importantes que governaram a concentração do $N-NO_3^-$ naquela zona: a diferença entre o N adicionado ao solo e o removido pela cultura, o volume de drenagem e as características do perfil do solo que, aparentemente, controlam a denitrificação.

As formas NO_3^- e NH_4^+ provenientes de fontes nitrogenadas, em

bora sejam disponíveis às plantas, apresentarão diferenças temporais quanto à esta disponibilidade, uma vez que as diferentes características do solo influenciarão no movimento destes íons com o fluxo de água e assim na maior ou menor probabilidade de lixiviação. Estudos que levam em conta estas transformações temporais, bem como as diferenças de tempo de residência na região radicular têm sido possíveis nos últimos anos através da utilização de técnicas de simulação.

Assim, WAGENET *et alii* (1977), entre outros, estudaram as transformações de ^{15}N -uréia durante a lixiviação no solo, onde o transporte e transformação da uréia, NH_4^+ e NO_3^- no solo foram descritos matematicamente como funções da profundidade e do tempo, sujeitas à aplicação de N por alimentação contínua e pulso. Como processos de transporte, supuseram difusão e fluxo de massa, e cinética de primeira ordem como mecanismo de transformação. SAXTON *et alii* (1977) desenvolveram um modelo digital visando cálculos de ocorrência, movimento e dissipação de N - nitrato no perfil de solo. Utilizaram duas áreas, ambas cultivadas com milho e fertilizadas com N-amoniaco, em dose normal para uma e em excesso para outra. Um modelo numérico para predição do balanço de água também foi utilizado pelos autores.

Quanto à amostragem de material para análise de elementos do solo, restrições são impostas ao método convencional - via coleta de amostra de solo, ou porque cada conjunto de amostras provém de local diferente no solo (ALBERTS *et alii*, 1977), ou porque envolve completa destruição do arranjo natural do sistema poroso solo-solução do solo, quando utilizado o método de análise por agitação da amostra (REICHARDT *et alii*, 1977).

Recentemente, tem sido aplicada uma nova técnica (WAGNER, 1962 e 1965; REEVE e DOERING, 1965; HELLIOTT *et alii*, 1972), pela qual a solução do solo é diretamente extraída aplicando-se vácuo a uma cápsula porosa em contato com a matriz do solo. Ressalte-se, porém, que esta possibilidade fora prevista no início do século por BRIGGS e McCALL (1904) e testada por KRONE *et alii* (1951). Uma vez instalado, este sistema de relativo baixo custo, longa durabilidade e fácil manuseio, fornece "in situ" o extrato de solução do solo para análise do íon no perfil.

Ao lado dessas conveniências, desvantagens também são apontadas. HANSEN e HARRIS (1975) realizaram testes de laboratório e campo, verificando a representatividade de amostras para nitrato e fosfato do solo através desses extratores. Para o caso de nitrato, a variabilidade nas amostras foi fortemente influenciada pela taxa de absorção de amostrador, entupimento nos poros da cápsula de cerâmica, câmara de vácuo nos amostradores e tipo de sistema de vácuo. Estes autores sugerem alguns procedimentos que podem ajudar na minimização dos erros advindos dessas várias fontes. Dentre eles, citam-se: seleção de amostradores com mesma condutividade, períodos curtos de amostragens, comprimento uniforme dos amostradores ou igual volume de câmara de vácuo e uso de mesmo vácuo inicial para todos os extratores, quando for o caso.

ALBERTS *et alii* (1977), que compararam as técnicas de amostragens de solo e de solução do solo através de cápsulas porosas de cerâmica na determinação de $N-NO_3$ em um Hapludoll típico, concluíram que a opção para o emprego de uma ou da outra técnica depende dos objetivos do trabalho, uma vez que houve equivalência na variação dos resultados obtidos durante os três anos de estudo.

Com relação à análise do N-NO_3^- , em amostras de solo e solução, os métodos descritos por BREMNER (1965a,b) são os de uso mais comuns. Um método alternativo recente na determinação de N-NO_3^- em solução, utilizando eletrodos específicos, foi desenvolvido por RUZICKA *et alii* (1977). Denominado sistema de injeção em fluxo, trata-se de um método automático, que utiliza pequeno volume de amostra (0,3 a 0,4 ml) e de alta sensibilidade (da ordem de grandeza de 10^{-2} a 10^{-4} M de NO_3^-), advindo daí sua conveniência em estudos de solução do solo (REICHARDT *et alii*, 1977), os quais estudaram sua aplicabilidade.

2.4. O Traçador Nitrogênio-15

Nos últimos anos, o comportamento dos elementos de importância nos sistemas biológicos tem sido investigado com maior segurança, a partir dos seus isótopos radioativos: ^3H , ^{14}C , ^{32}P , ^{35}S , ^{36}Cl , ^{42}K , ^{45}Ca , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{65}Zn , entre outros. Para os do nitrogênio, isto se tornou impraticável, dado às meias-vidas curtas dos seus radioisótopos ^{12}N , ^{13}N , ^{16}N e ^{17}N , ou seja, cerca de 0,01 s, 10 min, 7 e 4 s, respectivamente. A descoberta do isótopo estável (ou pesado) ^{15}N por Naude em 1929, abriu caminho para estudos de problemas biológicos utilizando este elemento como traçador.

Até 1955 houve pouco uso do potencial do ^{15}N como traçador em solo-planta-atmosfera. As primeiras investigações feitas, entre 1940 e início da década de 50, foram conduzidas sob condições controladas de laboratório e casa de vegetação, com atenção voltada à denitrificação (WIJLER e DELWICHE, 1954), fixação simbiótica e não simbiótica do N (BURRIS *et alii*, 1943), mineralização e imobilização (HILTBOLD *et alii*, 1951). Entretanto,

o primeiro experimento de campo referindo-se ao uso do N marcado foi o de BARTHOLOMEW *et alii* (1950). Seus resultados foram altamente variáveis (OLSON, 1979) devido ao reduzido tamanho da parcela, por necessidade óbvia da do o alto custo do isótopo na época. Com a declinação do custo de produção do ^{15}N nos inícios de 1960, número substancial de ensaios surgiu, particularmente os projetos de pesquisa de âmbito internacional (IAEA, 1970) e os de cooperação, como os do Tennessee Valley Authority-TVA e estações experimentais dos EEUU (HAUCK e KILMER, 1975).

Atualmente, a literatura sobre o uso de ^{15}N em estudos ecológicos é bastante volumosa, envolvendo as áreas de mineralização e imobilização de N, absorção e utilização de N-fertilizante pelas culturas, fixação simbiótica e não simbiótica de N, nitrificação da matéria orgânica, denitrificação, balanço completo de N, bem como seu metabolismo. Sumários dessas investigações são disponíveis, a exemplo de HAUCK e BYSTROM (1970), BARTHOLOMEW (1971), HAUCK e BREMNER (1976), OLSON (1979), além de outras publicações da IAEA.

Em princípio, um isótopo estável pode ser usado como traçador tão bem quanto um radisótopo, embora, na prática, as vantagens de não apresentar riscos por radiação e de ter a meia-vida praticamente infinita, não superem a grande sensibilidade de detecção oferecida pelo isótopo radiativo (IAEA, 1970).

O nitrogênio natural consiste de dois isótopos estáveis, ^{14}N e ^{15}N , e a identificação dos átomos traçadores é feita por diferença de massa. Ao invés da atividade específica de uma amostra, no caso de radisótopos, o termo abundância % é usado para isótopos estáveis. Desde que o ambi

ente natural possui abundância em torno de 0,37 %, a quantidade de ^{15}N na a mostra é convenientemente expressa como % de átomos de ^{15}N em excesso sobre a abundância natural (VOSE, 1980). Essa expressão traduz, comercialmente, o ^{15}N enriquecido.

Os caminhos seguidos pelo fertilizante nitrogenado, marcado ou enriquecido em ^{15}N , podem ser detectados e medidos em todas as suas etapas, isto porque assume-se que o comportamento do ^{15}N em processos químicos ou biológicos é praticamente idêntico ao do ^{14}N . Existem, na verdade, efeitos isotópicos mensuráveis em sistemas biológicos, causados pela diferença de massa entre ^{15}N e ^{14}N com discriminação quanto ao primeiro. Entretanto, a magnitude desses efeitos é muito pequena e significativa apenas quando são feitas medidas na região de variação isotópica natural de N (HAUCK e BREMNER, 1976), afetando a terceira casa decimal de átomos % ^{15}N . Segundo os mesmos autores, no caso do N, as trocas isotópicas, pelo menos virtualmente presentes no sistema solo-planta são desprezíveis, embora não se possa dizer o mesmo para outros núclídeos.

A discriminação entre ^{14}N e ^{15}N é física, princípio em que se baseiam os analisadores-espectrômetros de massa. O erro analítico desses instrumentos é cerca de 0,01% de átomos em excesso de ^{15}N , sensibilidade que decresce com o aumento da diluição. VOSE (1980) discute o comprometimento dos resultados com relação ao nível de enriquecimento do material nestas circunstâncias e admite que em trabalhos de campo, com ^{15}N -fertilizantes acima de 1% de átomos em excesso, resultam medidas confiáveis, através desses analisadores. O trabalho de BROESHART (1974) sustenta a mesma opinião.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em uma área junto ao Posto Agrometeorológico da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), Piracicaba, no período de agosto de 1979 a fevereiro de 1980, e constou de uma etapa inicial de determinação de alguns parâmetros hídricos do solo, seguida da implantação e condução do experimento envolvendo uma cultura de milho.

3.1. Parcela Experimental

Utilizou-se uma área plana, com dimensões de 8m x 10m, cujas coordenadas geográficas são:

latitude: $22^{\circ}42'30''$ S

longitude: $47^{\circ}38'00''$ W

altitude: 576 m,

enquanto que as normais meteorológicas (CERVellini *et alii*, 1973; VILLA NOVA *et alii*, 1973) são:

precipitação: 1247,1 mm
umidade relativa: 69,0%
temperatura média: 20,8°C
velocidade de ventos: 2,5 m.seg⁻¹
insolação: 7,0 horas.dia⁻¹

3.1.1. Características do Solo Utilizado

A unidade foi identificada pela Comissão de Solos do SNPEA (BRASIL, 1960) como Terra Roxa Estruturada e agrupada na série "Luiz de Queiroz" por RANZANI *et alii* (1966). Pelo sistema americano de classificação (E.U.A., 1975) é identificada como um Paleudalf óxico, com lençol freático situado a vários metros de profundidade. A caulinita é o mineral de argila predominante na fração menor que 0,002 mm (MARCOS, 1971). Representa cerca de 1,1% do Estado (6,1% do município de Piracicaba) e é utilizada intensivamente com cultivos de cereais e cana-de-açúcar. Algumas características físicas e químicas encontram-se nas Tabelas 1 e 2.

3.1.2. Instrumental de Campo

Utilizaram-se tensiômetros com manômetro de mercúrio para medições de potencial matricial da água no solo e amostradores de solução do solo com cápsula porosa de cerâmica para determinação da concentração de N-NO₃⁻ no perfil do solo.

Os tensiômetros foram construídos com tubo de plástico PVC rígido, com diâmetros(ϕ) de 21 mm externo e 15 mm interno e comprimento variável com a profundidade de interesse, tubo de nylon flexível com diâ

TABELA 1 - Algumas características físicas do perfil do solo em estudo.

Profundidade (cm)	Análise Mecânica (mm) (%) ^{1/}										Densidade		Porosidade		Classe Textural
	Areia Grossa (2-1)	Areia Grossa (1-0,5)	Areia MÉDIA (0,5-0,25)	Areia Fina (0,25-0,10)	Areia M. Fina (0,10-0,05)	Limo (0,05- 0,002)	Argila < 0,002	Argila Disp. H ₂ O		(g. cm ⁻³)	dg	dp	Total, α ^{3/} (%)		
0 - 15	0,1	1,6	5,9	15,3	7,8	27,9	41,4	25,6	1,32	2,81	53,02	argila			
15 - 30	0,1	1,2	5,9	14,8	6,8	24,5	46,7	29,7	1,30	2,84	54,22	argila			
30 - 45	0,1	1,0	4,0	10,9	5,2	20,1	58,7	9,2	1,27	2,86	55,59	argila			
45 - 60	0,1	0,8	4,1	10,2	4,8	19,5	60,5	1,9	1,21	2,90	58,27	argila			
60 - 75	0,1	0,9	3,7	10,6	5,9	18,3	60,5	3,2	1,25	2,89	56,88	argila			
75 - 90	0,2	1,0	3,7	10,7	6,6	21,6	56,3	1,5	1,27	2,87	55,75	argila			
90 - 105	0,2	1,0	4,1	11,3	7,1	21,2	55,1	2,2	1,27	2,85	55,44	argila			
105 - 120	0,2	1,1	4,5	11,8	6,4	23,5	52,5	1,8	1,28	2,85	55,09	argila			

^{1/}Laboratório do Depto. de Solos, Geologia e Fertilizantes-ESALQ/USP (método da pipeta, dispersante Calgon).

^{2/}Densidade global ou aparente (dg), pelo método do cilindro volumétrico; densidade das partículas ou real (dp) pelo método do álcool (EMBRAPA, 1979).

^{3/}Calculada a partir de dg e dp, ou α=(1-dg/dp) 100, como indica REICHARDT (1975).

TABELA 2 - Algumas características químicas do perfil do solo em estudo.

Prof. (cm)	pH		%				Rel. C/N	meq/100 g TFSA					V (%)	
	(H ₂ O)	(KCl)	ΔpH	C. Org.	N-Total	PO ₄ ³⁻		K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	H ⁺ +Al ³⁺		CTC
0-30	5,70	4,90	-0,80	0,73	0,11	0,13	6,64	0,47	0,04	4,10	0,92	6,40	11,92	46,39
30-60	6,00	5,30	-0,70	0,57	0,08	0,06	7,12	0,31	0,02	3,48	0,99	4,40	9,20	52,17
60-90	6,00	5,40	-0,60	0,46	0,06	0,06	7,67	0,31	0,03	3,74	0,88	3,90	8,86	55,98
90-120	6,10	5,50	-0,50	0,40	0,05	0,04	8,00	0,28	0,02	2,96	0,80	4,00	8,06	50,37

Resumo da metodologia usada nas análises: o pH em água, na relação 1:25 e solução normal de KCl para o pH em KCl; o carbono orgânico, de acordo com Walkley-Black, descrito por JACKSON (1976); o nitrogênio total, pelo método Semi-micro-Kjeldahl, descrito por BREMNER (1965a); o fósforo, o potássio, o sódio, o cálcio, o magnésio e o alumínio+hidrogênio, pela metodologia descrita em EMBRAPA (1979); CTC com acetato de cálcio N, pH 7,0.

metro interno de 2 mm e comprimento também variável, cápsula porosa de cerâmica, com 6 cm de comprimento e diâmetros equivalentes ao do PVC, rolha de borracha e cuba plástica com mercúrio. Estes materiais, mais frascos de vidro para coleta de amostras, constituíram os extratores de solução do solo.

No caso do tensiômetro, numa das extremidades do tubo PVC é colada uma cápsula e a rolha é ajustada na outra, onde a cerca de 10 cm abaixo é conectada uma das extremidades do tubo de nylon, enquanto a outra é imersa na cuba de mercúrio. Para o extrator de solução, a disposição da cápsula e do tubo de nylon no corpo do tubo PVC é idêntica àquela do tensiômetro, sendo que uma das extremidades do tubo de nylon (cortada em bisel) alonga-se até tocar o fundo da cápsula, enquanto que a extremidade externa conecta-se a um frasco coletor através de uma rolha de borracha. Uma fonte de vácuo conecta-se ao extrator através de um tubo de nylon ajustado à rolha de vedação da parte superior do tubo PVC. A Figura 1 mostra, em corte longitudinal (esquemático) a disposição de ambas as unidades instaladas no campo.

3.1.3. O Instrumental no Campo

Na parcela experimental delimitou-se uma área de dimensões 5m x 5m, na qual instalaram-se duas baterias de nove tensiômetros cada uma, nas profundidades de 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120 e 135 cm. Para isso, utilizou-se trado de rosca simples, de diâmetro pouco inferior ao do tubo PVC, e procurou-se obter bom ajuste entre o corpo do tensiômetro e o solo, a fim

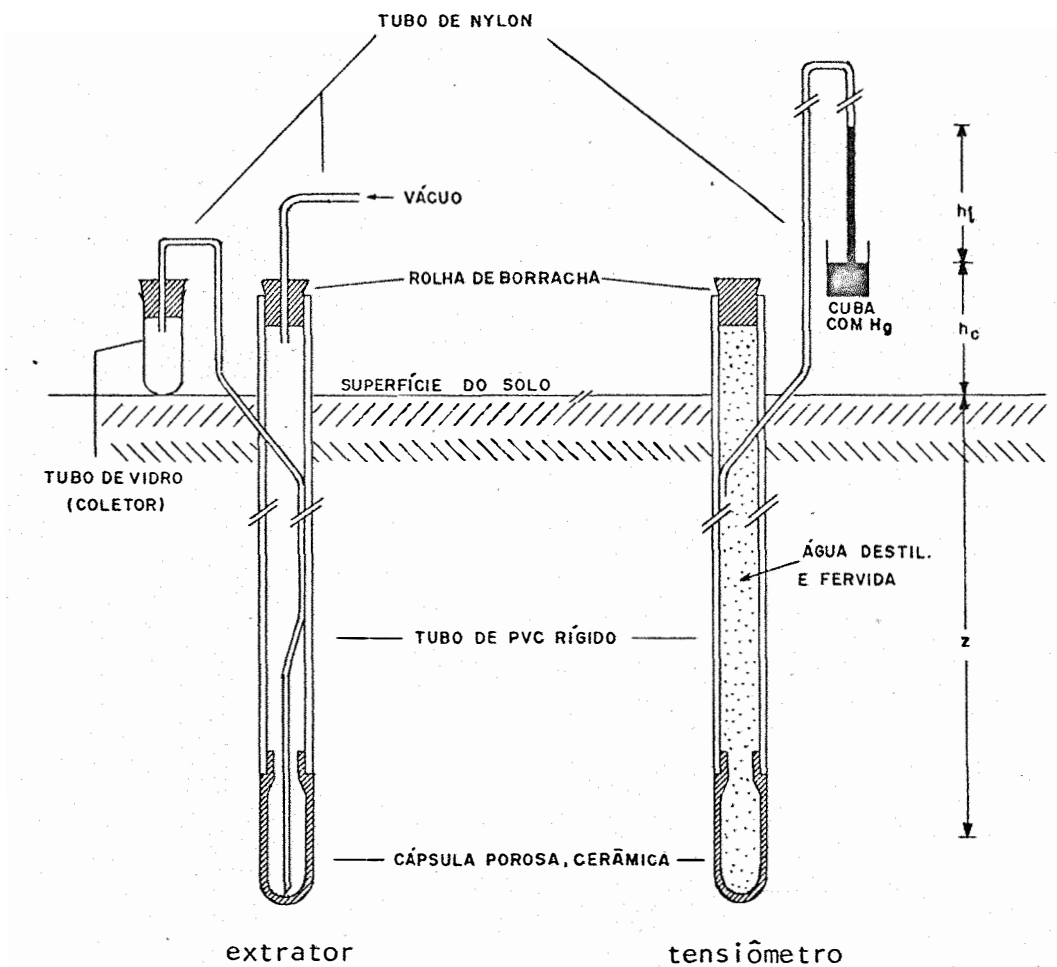


FIGURA 1 - Corte longitudinal, esquemático, de um extrator de solução do solo e de um tensiômetro com manômetro de mercúrio, utilizados no experimento.

de garantir o contato cápsula-matriz do solo e evitar fluxo preferencial de água através das paredes do tubo PVC (igual procedimento adotou-se com relação aos extratores. Em cada bateria, os manômetros foram imersos em uma única cuba de mercúrio e o conjunto fixado numa haste de madeira (detalhe não mostrado na Figura 1), facilitando, dessa forma, a leitura dos tensiômetros.

A área com os tensiômetros instalados (25 m²) foi utilizada, inicialmente, para determinação dos coeficientes de transmissão de água no perfil do solo, ou seja, a condutividade hidráulica K_0 e a condutividade capilar $K(\theta)$ - também chamada condutividade hidráulica simplesmente. São usados para o cálculo de fluxo de água (adiante) e a descrição da metodologia usada para ambos, bem como os resultados obtidos, estão reunidos no final do presente trabalho, em Apêndice.

Encerrada esta etapa inicial, conservaram-se os tensiômetros para utilização posterior nos cálculos de balanço de água na cultura, e instalaram-se, a seguir, nove extratores de solução do solo na área da parcela (80 m²) previamente preparada mecanicamente (aração e gradagem). A disposição dos extratores obedeceu ao arranjo experimental a seguir.

3.1.4. Plano Experimental

Para o estudo do balanço hídrico, foi estabelecida a cultura de milho, com espaçamento de 1 m entre as linhas de plantio e 0,20 m entre as plantas, recebendo uma adubação NPK (item 3.1.5).

Três sub-parcelas de dimensões 3m x 3m foram selecionadas

para o estudo do movimento do nitrogênio original do solo e do fertilizante em três profundidades no perfil do solo. Para isso, a fonte nitrogenada foi enriquecida em átomos de ^{15}N e os extratores instalados nas profundidades de 60, 90 e 120 cm, sendo a última considerada no plano limite de alcance do sistema radicular da planta para o solo em estudo. Assumiu-se como perdas por lixiviação as frações de N que ultrapassaram, em profundidade, esse limite.

A amostragem da solução foi facilitada pela adoção de um sistema de distribuição de vácuo, utilizando-se tubos de nylon e PVC, alimentada por uma única fonte de vácuo. A Figura 2 pretende dar uma dimensão do instrumental no campo.

3.1.5. Implantação e Condução da Cultura

Para a cultura de milho, utilizaram-se sementes da variedade CARGILL 111-X, híbrido duplo, de características tropicais, sendo plantas altas e ciclo vegetativo considerado tardio (em torno de 150 dias), de procedência da Fundação CARGILL, SP.

A operação de semeadura e a adubação foram feitas em 28 / 09 / 79. Na adubação, empregou-se uréia, superfosfato simples e cloreto de potássio, nas dosagens 100, 80 e 60 $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivamente, de N, P_2O_5 e K_2O , de acordo com a análise de fertilidade do solo. O total das doses de P e K e 1/3 de N aplicou-se nos sulcos de plantio (em torno de 7 cm de profundidade) e os 2/3 restantes de N, aplicados em cobertura, aos 42 dias após a germinação das plantas (dag). Nas três sub-parcelas o adubo nitrogenado foi enriquecido em 5,86 ($\pm 0,176$) % de átomos de ^{15}N , material

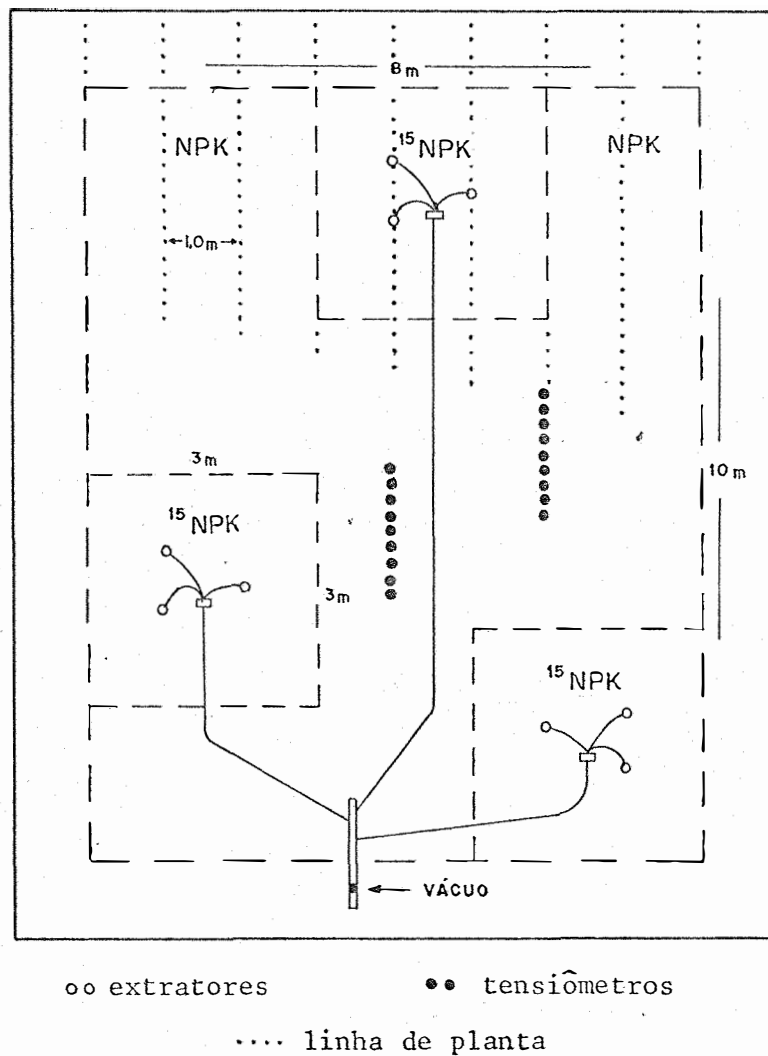


FIGURA 2 - Disposição dos instrumentos na parcela (bateria de tensiômetros) e sub-parcelas com ^{15}N (conjunto de extratores nas linhas de plantio).

fornecido pela IAEA. Em seguida, procedeu-se à sementeira, com cerca de 20 sementes por metro linear colocadas um pouco acima do sulco de fertilização. A germinação ocorreu uniformemente após 6 dias do plantio. Decorridos 15 dias, efetuou-se o desbaste, resultando uma população equivalente a 50000 plantas.ha⁻¹.

Limpezas seletivas da área foram feitas sistematicamente, bem como aplicações de inseticida à base de aldrin, por prevenção aos frequentes ataques de lagartas na área. A colheita deu-se aos 150 dias (29/02/80).

3.2. Medidas, Amostragens e Determinações

Neste item, descreve-se as técnicas de medição de tensiômetros e cálculos dos componentes do balanço de água, a técnica de amostragem de solução do solo, métodos analíticos dos isótopos ¹⁴N e ¹⁵N e cálculos de perdas de N total e proveniente do fertilizante por drenagem profunda, utilizados no presente trabalho.

3.2.1. Componentes do Balanço Hídrico

O balanço de água em um volume de solo de profundidade $0 < z < L$, durante o intervalo de tempo $t_2 - t_1$, pode ser descrito como

$$\int_{t_1}^{t_2} (p + i - q_e + q_L - r) dt - \Delta A_L = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

onde p e i são as taxas de suprimento de água em $z=0$ (precipitação e irrigação, respectivamente), q_e a taxa de evapotranspiração, q_L o fluxo de água na profundidade $z=L$ (considerado positivo quando ascendente), r é a taxa de escoamento superficial (em $z = 0$) e ΔA_L a variação de armazenamento de água no período $t_2 - t_1$, de $z=0$ até $z=L$. Trata-se, portanto, de um caso particular da aplicação da lei da conservação das massas.

Da integração da equação (1) com relação ao tempo resulta a expressão mais comumente utilizada em estudos de balanço hídrico:

$$(p + i - q_e \pm q_L - r) \left[t \right]_{t_1}^{t_2} = \Delta A_L \dots\dots\dots (2)$$

As taxas p e i são medidas em pluviômetros e medidores de vazão. Uma vez calculados q_L , r e ΔA_L , pode-se, variando L , estudar a retirada de água por uma cultura através de q_e ou, simplesmente, E (evapotranspiração atual) para camadas arbitrárias, pelo rearranjo da equação (2). Procedeu-se, desse modo, como segue. Os dados de precipitação (mm.dia^{-1}), foram fornecidos pelo Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP. Não houve suplementação de água (irrigação) para a cultura. As perdas por escoamento superficial foram desprezadas; para isso, levou-se em conta a condição de terreno plano e a alta capacidade de infiltração do solo (quantificada em Apêndice).

A quantidade de água A , armazenada até uma camada de profundidade L do solo, em dado tempo t , pode ser calculada pela equação:

$$A(L) = \int_0^L \theta dz \dots\dots\dots (3)$$

sendo z a coordenada vertical de posição (cm) e θ a umidade volumétrica do solo ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$).

Considerou-se o volume de solo até a profundidade $L=120$ cm. Assim, o componente ΔA_L foi obtido a partir da solução numérica da equação (3), a qual é praticamente igual ao produto da umidade média do perfil ($\bar{\theta}$ de 0 a L) pela profundidade L (cm). Nestas condições, ΔA (em mm), no período $t_2 - t_1$ foi obtido através da expressão:

$$\Delta A = 10 (\bar{\theta}_2 - \bar{\theta}_1) \cdot L \dots\dots\dots (4)$$

Os valores de θ em função da profundidade e tempo foram obtidos a partir de curvas de retenção de água ($\log \psi_m$ - potencial matricial versus θ) elaboradas por CASTRO (1979), com amostras de solo de estrutura não deformada, retiradas de uma trincheira ao lado da área em estudo. Consideraram-se intervalos $t_2 - t_1$ iguais, de 7 dias.

Os dados diários medidos da altura da coluna de mercúrio dos tensiômetros (h_1) juntamente com as distâncias da superfície do solo ao nível superior do Hg na cuba (h_c) e à metade do comprimento da cápsula (z), Figura 1, foram utilizados na equação

$$\psi_m = -12,6 h_1 + h_c + z \dots\dots\dots (5)$$

para o cálculo do potencial matricial da água do solo, o qual permite, a-

creescentando o potencial gravitacional (distância z), calcular o potencial hidráulico da água do solo. Tomou-se a média dos dois tensiômetros por profundidade para o cálculo diário de ψ_m .

Na estimativa do balanço hídrico, a maior dificuldade reside na quantificação de q_L , por depender do conhecimento das propriedades hídricas do perfil. A equação diferencial geral que descreve o movimento da água no solo pode ser derivada combinando-se a equação de Darcy com a equação da continuidade (RICHARDS, 1931; LIBARDI, 1978). Para fluxo vertical não saturado e profundidade L, a equação de Darcy pode ser escrita como:

$$q_L = -K(\theta) \partial\psi/\partial z \dots\dots\dots (6)$$

sendo $K(\theta)$ a condutividade capilar, ψ o potencial hidráulico da água e $\partial\psi/\partial z$ o gradiente hidráulico. Esta equação permite, conhecidos $K(\theta)$ e $\partial\psi/\partial z$, determinar q_L a várias profundidades.

Assim, os fluxos diários de água a 120 cm de profundidade, considerados drenagem profunda, D (mm.dia^{-1}), foram obtidos pelo produto de $K(\theta_{120})$ pelo gradiente $\partial\psi/\partial z$ na mesma profundidade (equação 6). O primeiro termo foi calculado pela inclusão dos valores diários de θ na expressão $K_{120} = \exp(-16,64 + 44,03\theta_{120})$, definida através do procedimento de HILLEL *et alii* (1972), descrito em Apêndice, enquanto que os gradientes foram expressos pelas tangentes às curvas obtidas a partir de gráficos de ψ versus z em $z=L$. Para isso, utilizaram-se um ponto acima e outro abaixo do considerado, ou seja, 105 e 135 cm, refletindo deste modo a melhor tendência da curva. Desta forma, a evapotranspiração atual, E (mm.dia^{-1}) tornou-se a incôgnita para o balanço hídrico da cultura, calculada a par-

tir da equação (2).

3.2.2. Amostragem e Análise da Solução do Solo

As amostras de solução do solo foram obtidas aplicando-se vácuo ao sistema de extratores (através de uma bomba destinada a esse fim) equivalente a -0,75 atm. Nestas condições, a solução, dependendo do estado de umidade do solo em contato com a cápsula porosa, se move para o interior da cápsula em resposta ao gradiente de tensão, parede da cápsula - matriz do solo. Desconectada a fonte de vácuo, o extrato acumulado na cápsula desloca-se para o frasco coletor através do capilar de nylon por diferença de pressão.

O sistema era acionado semanalmente, em 2 ou 3 dias alternados, durante duas horas/dia. Os extratos das repetições por profundidade, amostrados durante a semana, constituíram a amostragem da etapa ou período, nas profundidades 60, 90 e 120 cm do solo.

A concentração do nitrogênio nas amostras de solução do solo foi determinada pelo método descrito em BREMNER (1965a), pelo qual o nitrogênio é convertido a amônia ($N-NH_3$) por liga de Devarda e destilado sob óxido de magnésio, sendo este recebido em ácido sulfúrico, seguido de titulação com soda.

Nessa solução podem ainda ser determinados os átomos de ^{15}N presentes na amostra, ou seja, o destilado final (após a titulação sódica) é evaporado até volume aproximado de 2 ml e transformado, a seguir, em N_2 , por oxidação com hipobromito de lítio, para análise da discriminação isotópica ($^{15}N - ^{14}N$), como descrito por BREMNER (1965b). Para

isso, foi utilizado o espectrômetro de massa Atlas-Variant, modelo CH-4, pertencente ao CENA. A percentagem de átomos de ^{15}N foi calculada pela expressão:

$$\text{Átomos \% } ^{15}\text{N} = \left[\frac{\text{Átomos } ^{15}\text{N}}{\text{Átomos } ^{14}\text{N} + \text{Átomos } ^{15}\text{N}} \right] \times 100 \dots (7)$$

O cálculo percentual do excesso de átomos de ^{15}N é obtido, subtraindo da percentagem de ^{15}N obtida na amostra, equação (7), o valor da abundância natural do isótopo no meio, que no caso da solução do solo foi de 0,369 ($\pm 0,01$) % de átomos de ^{15}N

Em amostras do fertilizante marcado, $\text{CO}(^{15}\text{NH}_2)_2$, a determinação da percentagem de átomos de ^{15}N foi feita através da técnica desenvolvida por RITTENBERG (1946) modificada (IAEA, 1976), encontrando-se o valor de 5,86% ($\pm 0,176$) em excesso. A abundância natural foi praticamente igual àquela encontrada nas amostras de solução do solo.

3.2.3. Cálculo de Perdas de N-NO_3^- por Lixiviação

Assumindo que todo o nitrogênio que se move a uma determinada profundidade no solo seja transportado apenas por fluxo de massa, sua perda por percolação profunda pode ser estimada pela equação

$$q_{(\text{NO}_3^-)} = q_L \times \left[\text{NO}_3^- \right]_L \dots \dots \dots (8)$$

ou seja, o fluxo de N-NO_3^- na profundidade L resulta do produto do fluxo de água em L pela concentração do N-NO_3^- na solução do solo obtida na mesma profundidade e tempo considerado.

Desta perda de nitrogênio, pelo emprego do traçador ^{15}N , pode ser avaliada a fração proveniente do fertilizante (% NPF), através da expressão:

$$\% \text{ NPF} = (\% \text{ át. } ^{15}\text{N} \text{ excesso na amostra} / \% \text{ át. } ^{15}\text{N} \text{ excesso no fertil.}) \times 100 \quad (9)$$

Ela permite, de igual forma, a avaliação da % NPF absorvida por uma planta, bastando para isso substituir o numerador por % átomos ^{15}N em excesso na planta (ou partes desta). Os detalhes desses cálculos são encontrados nos itens 4.2 e 4.3, adiante.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Balanço Hídrico

O balanço hídrico foi estimado durante o período de desenvolvimento da cultura do milho (01/10/79 a 29/02/80), com profundidade de 120 cm para o volume de controle e a intervalos iguais de 7 dias. Os valores de todos os seus componentes, medidos e estimados, estão reunidos na Tabela 3.

Esses valores indicam que a área, durante os 152 dias, recebeu 620,90 mm de água via chuvas, evapotranspirou 461,45 mm (média de 3,0 mm.dia⁻¹) e perdeu para a zona abaixo do sistema radicular (120 cm) 194,82 mm de água, sob variações de temperatura entre 19,8 e 26,0°C (média de 23,8°C, considerada normal para a estação do ano).

Para JANSEN (1967), os erros incidentes nas estimativas de evapotranspiração podem atingir até mais de 15% quando se tomam intervalos maiores que 5 dias. Entretanto, esses erros devem ser diminuídos quando ela é inferida a partir da drenagem profunda (D) calculada pelo somatório dos

TABELA 3 - Valores dos componentes do balanço hídrico (precipitação p, drenagem profunda D, variação do armazenamento ΔA e evapotranspiração atual E), % das perdas por drenagem profunda e temperatura média T, para intervalos de 7 dias, durante o ciclo da cultura.

----- Período -----	Intervalo (dias)	P (mm)	D (mm)	ΔA (mm)	E		D ₂ / (%)	T ₃ / (°C)
					(mm)	(mm.dia ⁻¹) ^{1/}		
1979	outubro							
	01-07	56,00	-26,11	+11,51	18,38	2,62	58,69	24,50
	08-14	29,00	-24,25	-16,84	21,59	3,08	52,90	22,90
	15-21	0	-10,37	-15,72	5,35	0,76	69,97	21,10
	22-28	7,60	-9,61	-12,90	10,89	1,55	46,88	24,80
	novembro							
	29-04	28,40	-9,38	-13,20	32,22	4,60	22,55	24,50
	05-11	41,20	-6,42	+16,60	18,18	2,60	26,10	23,40
12-18	12,50	-8,44	-15,60	19,66	2,81	30,03	23,30	
19-25	29,50	-3,22	-13,20	39,48	5,64	7,54	24,40	
dezembro								
26-01	0	-0,36	-8,30	7,94	1,13	4,34	19,80	
02-08	19,40	0	-11,80	31,20	4,46	-	25,70	
09-15	31,20	0	-5,50	36,70	5,24	-	26,00	
16-22	28,40	0	-10,60	39,00	5,57	-	23,20	
23-29	11,30	0	-8,00	19,30	2,76	-	23,10	
1980								
janeiro								
30-05	20,60	0	-8,20	28,11	4,11	-	22,70	
06-12	30,20	0	+10,70	19,50	2,78	-	24,20	
13-19	15,70	-1,19	+4,40	10,11	1,44	10,53	23,60	
20-26	96,50	-24,83	+29,70	41,97	5,99	37,17	24,80	
fevereiro								
27-02	1,40	-8,57	-14,40	6,97	0,99	55,14	24,80	
03-09	2,70	-3,08	-10,20	9,82	1,40	23,87	25,70	
10-16	50,10	-16,18	+20,40	13,52	1,93	54,48	24,80	
17-23	75,60	-25,06	+29,60	20,94	2,99	54,47	22,80	
24-29	33,60	-17,75	+5,23	10,62	1,77	62,57	23,90	
total		620,90	-194,82	461,45				

^{1/} média do ciclo: 3,0 mm.dia⁻¹; ^{2/} refere-se à % D em relação às saídas de água (média do ciclo, 29,68%); ^{3/} média do ciclo: 23,8°C.

fluxos diários, resultando o valor do intervalo. Quando, porém, os valores de $K(\theta)$ e de $\partial\psi/\partial z$ resultam de médias de intervalos de tempo considerados longos, LIBARDI (1979) lembra que os dados de fluxo obtidos a partir da equação de Darcy, nestas condições, tornam-se pouco confiáveis pois desconhecem-se como θ e ψ relacionam-se com z .

A capacidade de infiltração do solo pela média estimada em $30,13 \text{ mm.hora}^{-1}$ (ARAÚJO SILVA *et alii*, 1980), parece garantir perdas insignificantes de água por escoamento superficial para taxas de precipitação até $21,12 \text{ mm.h}^{-1}$ (máxima do período, em 17/02/80). Desprezaram-se também os fluxos ascendentes a 120 cm de profundidade, pois as ocorrências foram mínimas e não ultrapassaram $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ mm.dia}^{-1}$.

O perfil estrutural do solo e a frequência de distribuição das chuvas garantiram armazenamento de água suficiente nos períodos de máxima exigência consuntiva do milho - formação da espiga até formação do grão (Henckell, citado em MAGALHÃES e SILVA, 1978), o que compreende a metade final do estágio vegetativo até a maturação do grão para HANWAY (1963). Neste período (45 a 100 dag), a umidade predominante na camada de 30 a 90 cm de profundidade foi superior a $0,280 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, sujeitas a ψ_m , em média, abaixo de $-1,0 \text{ atm}$, para períodos relativamente curtos.

A evapotranspiração média do período de consumo máximo de água pela planta (dezembro e primeira quinzena de janeiro), foi calculada em $4,15 \text{ mm.dia}^{-1}$, muito próxima daquela encontrada por CASTRO (1979), $4,72 \text{ mm.dia}^{-1}$, em condições semelhantes de clima e mesmo solo, cultura e período relacionado. Variando apenas o solo para um Oxisol textura média, REICHARDT *et alii* (1979a) estimaram $4,12 \text{ mm.dia}^{-1}$.

O sinal negativo que acompanha o componente drenagem profunda indica apenas fluxo descendente. Observa-se que os elevados valores de D foram obtidos quando os de armazenagem eram também altos, chegando a ser nulos quando os valores deste último eram mínimos. As chuvas e as exigências da planta em água parecem ser os principais responsáveis por essa dependência. Para os primeiros e últimos períodos do balanço, prevaleceu o fator chuva; já aqueles com fluxos de água nulos (apesar de chuvas), coincidiram com as extrações elevadas de água pela planta, o que está coerente com as maiores taxas de evapotranspiração. A redistribuição de água no perfil também assume importância nesse aspecto.

A percentagem de drenagem profunda, que aparece na Tabela 3, diz respeito à sua participação nas saídas de água. Representou cerca de 30% destas, chegando a ser superior em certos períodos. A coerência destes resultados com os de CASTRO (1979) e de REICHARDT *et alii* (1979a) apenas reforça a recomendação de que esse componente deve ser levado em conta nos balanços hídricos, especialmente nos trópicos. Uma dimensão temporal de alguns destes componentes dentro dos estádios da cultura (HANWAY, 1963) está contida na Figura 4.

4.2. Variação da Concentração de $N-NO_3$ no Perfil do Solo

A Tabela 4 reúne os dados de $N-NO_3^-$, das percentagens de átomos de ^{15}N em excesso e do N-fertilizante aplicado ao solo e de volumes de solução, representando oito etapas de amostragens nas profundidades 60, 90 e 120 cm. Os extratos das duas primeiras etapas resultaram de três coletas semanais e de apenas duas para as seis etapas seguintes. Os valores percen

tuais dos átomos de ^{15}N em excesso foram obtidos a partir da equação (7), enquanto que os de NPF pela expressão (9).

O estado de energia da água no perfil não permitiu acompanhar o comportamento do nitrato em solução por longos períodos após a aplicação dos 2/3 do N-fertilizante em cobertura (42 dag). Pelos volumes de extrato amostrados, observou-se que de uma maneira geral, houve estreita dependência da concentração de NO_3^- , numa relação inversa com o volume de solução extraído (adiante discutido).

A redução percentual em átomos de ^{15}N , refletida na diminuição da porcentagem de NPF, a partir da quarta etapa de amostragem, pode ser assumida, em grande parte, como extração via planta, para a qual, a eficiência na utilização do elemento foi cerca de 30% e absorvido até aos 75 dag (CALVACHE *et alii*, 1981). A quantidade inicial de N aplicado, as chuvas intensas e a possível atividade microbiana (imobilização ou perdas gasosas do N-fertilizante) podem ter contribuído também para essa diminuição.

O estado energético da água e sua redistribuição no perfil do solo são importantes fontes de variação do seu tempo de residência e, provavelmente, do N-nitrato no solo. Para tentar evidenciar esse aspecto, selecionaram-se os volumes de solução do solo extraídos das três repetições por profundidade e umidades correspondentes em 60, 90 e 120 cm, durante o primeiro mês de operação. Os dados assim obtidos estão reunidos na Tabela 5. Os extratos foram obtidos com operação sistemática dos extratores (duas horas para tempo de sucção equivalente a 0,75 atm) e os dados de θ , a partir de médias de 2 tensiômetros por profundidade, como descritos nos itens 3.2.1 e 3.2.2. Os dados indicam que os volumes médios de extrato de solução va-

TABELA 4 - Variações na concentração de $N-NO_3^-$ e percentagens do NPF na solução do solo (3 profundidades) e correspondentes volumes de solução coletados, em 8 etapas de amostragens.

Etapa de Amostragens	Profundidade (cm)	$N-NO_3^-$ Total (ppm)	^{15}N (átomos %)	NPF (%)	Vol. Solução (cm^3)
primeira (8 a 12/10/79, 4, 6 e 8 dag)	60	4,41	0,431	1,13	100
	90	5,36	0,400	0,56	60
	120	35,00	2,790	44,09	28
segunda (15 a 19/10/79, 11, 13 e 15 dag)	60	5,13	0,483	2,08	96,8
	90	4,12	0,420	0,93	64,6
	120	18,72	2,823	44,69	40
terceira (22 a 24/10/79, 18 e 20 dag)	60	5,92	0,539	3,09	78
	90	4,82	0,689	5,83	61
	120	19,67	2,842	45,04	42
quarta (29 a 31/10/79, 25 e 27 dag)	60	11,77	0,521	2,77	69
	90	9,19	0,661	5,32	64
	120	27,19	2,096	31,45	43
quinta (6 a 8/11/79, 31 e 33 dag)	60	15,93	0,462	1,69	29
	90	16,92	0,523	2,80	36
	120	24,20	1,331	17,52	29,5
sexta (12 a 14/11/79, 39 e 41 dag)	60	28,80	0,418	0,89	17,5
	90	20,86	0,472	1,87	24,5
	120	26,35	0,803	7,90	17
sétima (19 a 21/01/80, 110 e 112 dag)	60	2,58	0,501	2,40	122
	90	2,93	0,565	3,57	43
	120	4,52	0,717	6,34	31
oitava (18 a 20/01/80, 142 e 144 dag)	60	1,85	0,548	3,26	102
	90	2,90	0,528	2,89	58
	120	3,37	0,737	6,70	41,5

riaram com a profundidade e o tempo, mostrando certa dependência com os valores de umidade do perfil do solo que se encontrava, no período, em processo dominante de secamento, com uma redistribuição de água de certo modo uniforme, como pode ser visto na Figura 3. O formato das curvas nesta figura parece descrever um fenômeno causado pela característica textural do perfil. Este solo apresenta um horizonte B textural (iluvial) localizado provavelmente na camada entre 45 e 75 cm de profundidade, que deve ter influenciado a distribuição de água no perfil (ver % argila, dp e porosidade, Tabela 1).

Em vista da dependência do volume de extrato-umidade atual do solo, parece razoável admitir que o efeito de diluição do íon, ou o efeito do volume de câmara de vácuo do extrator são os maiores responsáveis pelas altas concentrações do NO_3^- , sempre na profundidade de 120 cm do solo.

KINJO e PRATT (1971) encontraram a máxima adsorção do íon nitrato neste mesmo Alfisol (na camada entre 55 e 110 cm de profundidade) em torno de 2,6 e.mg/100 g de solo e constante de afinidade 7,1, valores considerados baixos comparados aos dos Andosols (acima de 7,0 e 19,0, respectivamente) estudados por eles. Sobre esse aspecto, os autores acima citam ainda que, sendo a adsorção de NO_3^- dependente da concentração da solução do solo, pode ser esperado que a quantidade adsorvida pelos solos em equilíbrio com a solução do solo diminuirá quando esta é dissolvida pelas chuvas ou irrigação. Van RAIJ e CAMARGO (1974) estudaram a lixiviação de nitrato através de colunas com amostras de solo dos horizontes A e B de três Oxisols e de um Alfisol. Os valores das posições dos picos de eluição de NO_3^- (dados em termos de volume de poros preenchidos com solução do solo) foram 1,05 e 0,95 para os horizontes A e B, respectivamente do Alfisol, menores cerca de

TABELA 5 - Volume de solução, por extração e parcela, dentro de cada profundidade e correspondentes dados de umidade do solo, no primeiro mês de operação.

Amostragem (data)	Parcela	Profundidade 60 cm			Profundidade 90 cm			Profundidade 120 cm		
		Volume (cm ³)	θ (cm ³ .cm ⁻³)	ψ (atm)	Volume (cm ³)	θ (cm ³ .cm ⁻³)	ψ (atm)	Volume (cm ³)	θ (cm ³ .cm ⁻³)	ψ (atm)
10/10/79 (6 dag)	1	12,25			6,8			3,6		
	2	13,0			4,1			6,3		
	3	12,7			14,9			8,8		
	Média	12,7	0,385	-0,092	8,6	0,356	-0,155	6,2	0,367	-0,210
17/10/79 (13 dag)	1	8,4			5,0			3,6		
	2	9,5			5,1			6,1		
	3	9,1			10,0			3,4		
	Média	9,0	0,383	-0,096	6,7	0,335	-0,175	4,4	0,340	-0,255
24/10/79 (20 dag)	1	7,0			4,0			4,0		
	2	7,0			5,5			6,2		
	3	8,1			9,1			3,8		
	Média	7,4	0,367	-0,115	6,2	0,327	-0,192	4,6	0,334	-0,273
31/10/79 (27 dag)	1	7,3			4,1			5,5		
	2	7,0			6,2			7,0		
	3	7,6			9,8			4,5		
	Média	7,3	0,350	-0,142	6,7	0,317	-0,218	5,6	0,329	-0,285

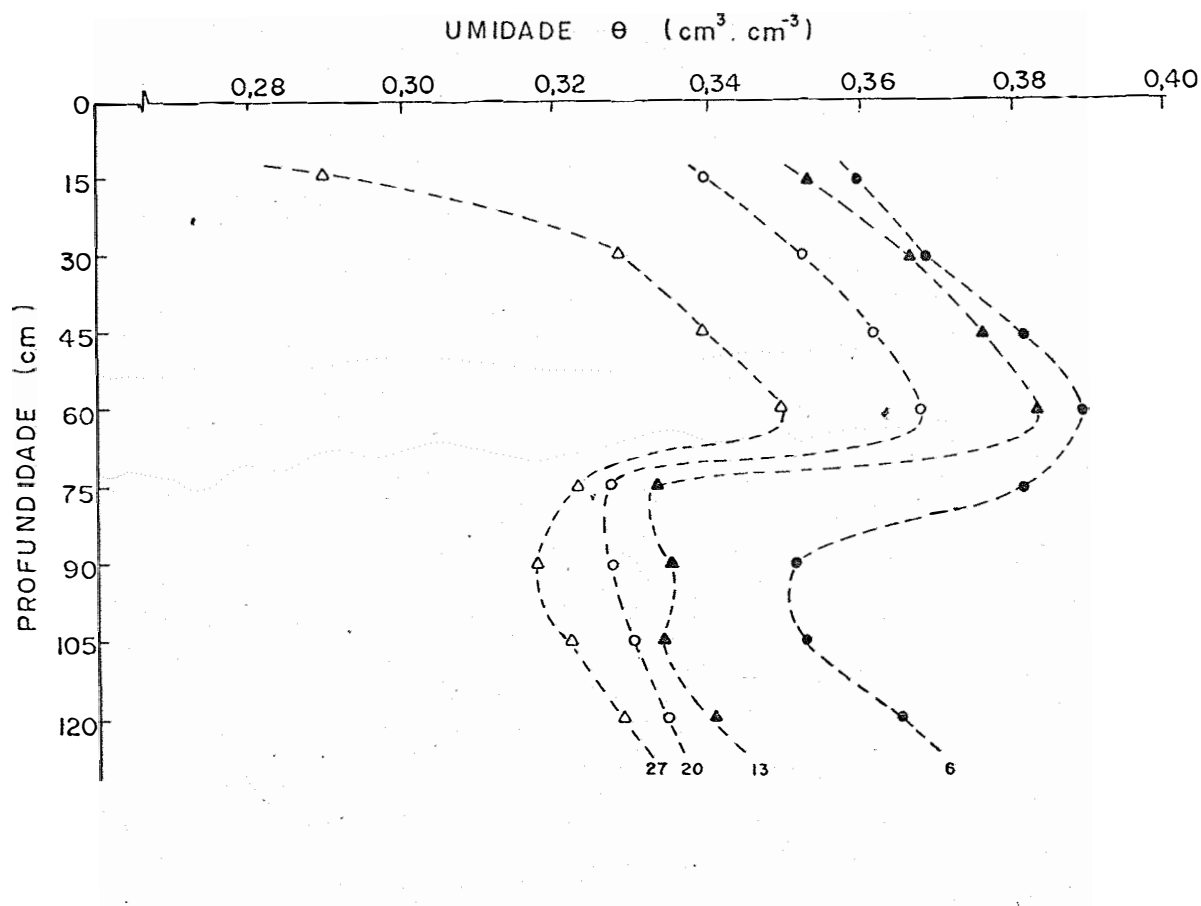


FIGURA 3 - Perfis de umidade do solo correspondentes aos 6, 13, 20 e 27 dias após a germinação das plantas.

uma vez e meia dos valores encontrados nos Oxisols. As posições dos referidos picos podem ser explicadas pelas cargas positivas e negativas de superfície dos solos, com indicação do efeito dessas últimas na repulsão do íon NO_3^- , caso do Alfisol.

Quanto ao efeito do volume de câmara de vácuo do extrator, como se referem HANSEN e HARRIS (1975) associando eficiência desses aparelhos em estudos de NO_3^- a volumes iguais e reduzido de câmara de vácuo, uma das fontes de erros pode estar ligada a gradiente de pressão parcial, solução do solo - câmara de vácuo, causando evaporação de certo volume do extrato e consequente aumento na sua concentração em NO_3^- . Outra causa poderia ser simplesmente uma resistência ao fluxo em função de uma maior ou menor distância da fonte de vácuo à cápsula porosa (maior volume de câmara de vácuo).

4.3. Perdas de Nitrogênio por Lixiviação

O fluxo de massa do nitrato foi obtida através do produto do valor do fluxo de água pela correspondente concentração do íon em solução, como indica a equação (8). Neste produto, em que a drenagem profunda (ou q_L) é dada em mm (de fácil transformação para litro/unidade de área), a vazão de N é normalmente expressa em $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, dentro de determinados períodos, uma vez que o outro termo do produto, $[\text{NO}_3^-]$ é dado em $\text{mg} \cdot \text{litro}^{-1}$ (ppm), ou em $\text{moles} \cdot \text{litro}^{-1}$, como muitos autores preferem.

Quantificou-se, em seguida, a participação do N-fertilizante (também em $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, por período) a partir dos valores percentuais de NPF,

Tabela 4, para a profundidade de 120 cm.

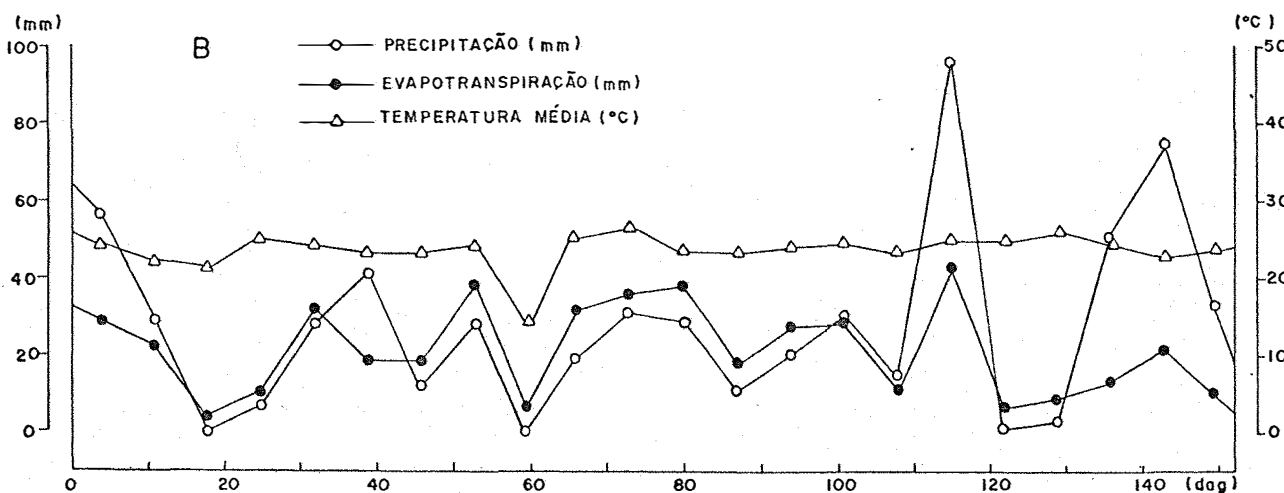
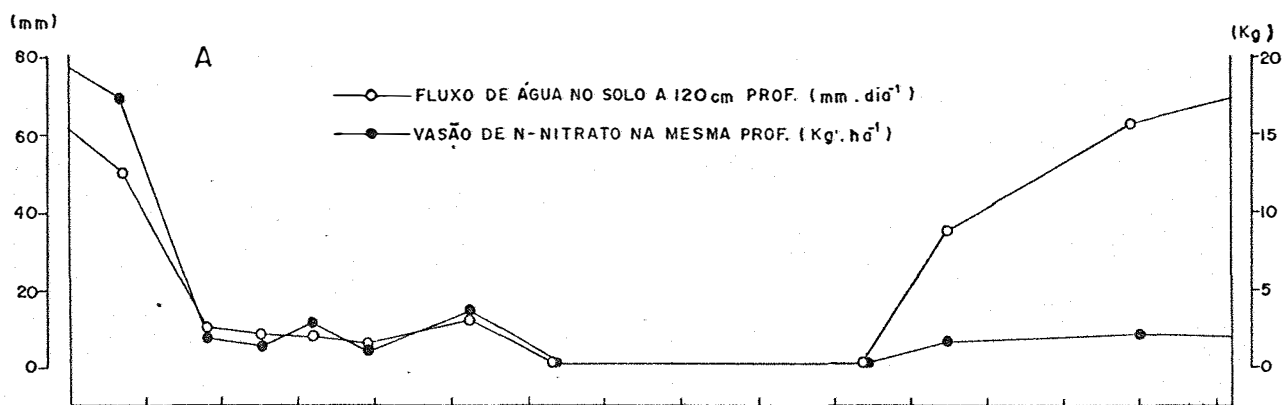
As estimativas para a vazão de N-NO_3^- total e do N-fertilizante durante o ciclo da cultura estão reunidas na Tabela 6. Para obter esses valores, considerando o procedimento usado, assume-se, em adição ao transporte unicamente via fluxo de massa, que a concentração do N-NO_3^- na solução do solo permanece constante, em torno da média (aqui considerada o valor obtido em cada etapa de coletas, Tabela 4), durante os períodos considerados na Tabela 6.

Para os 152 dias, no ciclo da cultivar CARGILL 111-X, com a produção média de $6,840 \text{ kg.ha}^{-1}$, as perdas de N para camadas abaixo do sistema radicular foram estimadas em $32,40 \text{ kg.ha}^{-1}$, com uma contribuição de 34,0% ($11,0 \text{ kg.ha}^{-1}$) do fertilizante.

Mais de 50% das perdas por lixiviação do fertilizante ocorreu logo nos primeiros 16 dias após sua aplicação. Este fato pode ser atribuído, em adição aos aspectos discutidos no item anterior, à alta umidade inicial do solo, ou seja, 434 mm até 120 cm (no início do balanço hídrico), cerca de 70% da capacidade máxima de armazenamento de água (média da porosidade total, 55,5%, Tabela 1), associado às chuvas do período, 85 mm, entre 01 e 14/10/79. A Figura 4 mostra os fluxos de água e de N-NO_3^- em correspondência com o balanço hídrico, dentro dos estádios de desenvolvimento da cultura. Observa-se que, a partir dos 100 dag, os aumentos de fluxo de água não são mais acompanhados pelos de N-NO_3^- , visto na parte A da figura. As altas e frequentes precipitações (parte B da figura) justificam os fluxos crescentes de água, uma vez que a exigência em água pelas plantas era mínima (final do ciclo), enquanto que as fontes de N no perfil (a natural, pouco efe-

TABELA 6 - Vazão de $N-NO_3^-$, total e do N proveniente do fertilizante, na profundidade de 120 cm do solo, durante os 5 meses do ciclo da cultura.

Ano	Período (dias)	Precip.(P) (mm)	Dren. Prof.(D) (mm)	N- NO_3^- Total (ppm)	N- NO_3^- Total (Kg. ha $^{-1}$)	N-fertilizante	
						(kg. ha $^{-1}$)	(%)
1979	01-14/10	85,00	50,36	35,00	17,63	7,73	44,09
	15-21/10	0	10,37	18,72	1,94	0,87	44,69
	22-28/10	7,60	9,61	19,67	1,89	0,85	45,04
	29/10 -04/11	28,40	9,38	27,19	2,55	0,80	31,45
	05-11/11	41,20	6,42	24,20	1,55	0,27	17,52
1980	12/11-01/12	42,00	12,02	26,35	3,17	0,25	7,90
	02/12-12/01	141,10	0	0	0	0	0
	13/01-02/02	113,60	34,59	4,52	1,56	0,10	6,34
	03-29/02	162,00	62,07	3,37	2,09	0,14	6,70
	Total		620,90	194,82	159,02	32,38	11,01



OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO	JANEIRO	FEVEREIRO
ESTABELECIMENTO	VEGETATIVO	FLORAÇÃO	FORMAÇÃO DO GRÃO	MATURAÇÃO

FIGURA 4 - Fluxos de água e de N-nitrato total abaixo do sistema radicular do milho C 111-X (A) em correspondência com o balanço hídrico (B), estimados durante os vários estádios de desenvolvimento da cultura.

tiva, e a do adubo, não renovada) forneciam baixas quantidades lixiviáveis.

Existe uma dificuldade em confrontar esses resultados com a bibliografia existente, uma vez que as condições de campo refletem quase sempre um caso particular. Entre nós, os trabalhos desenvolvidos nesta linha e conhecidos são os de LIBARDI e REICHARDT (1978), MEIRELLES *et alii* (1980) e REICHARDT *et alii* (1979b). Os primeiros autores, em trabalho pioneiro no Brasil com balanço completo do N-fertilizante no sistema solo-planta-atmosfera, estimaram a lixiviação, para 48 mm de água percolada na profundidade de 105 cm e entradas de 661,4 mm de água na área, em $6,72 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de N-uréia enriquecida em 1,552 ($\pm 0,05$) % de átomos de ^{15}N . Utilizaram o mesmo solo do presente trabalho, cultivado com feijão, onde os dois níveis de adubação (40 e $120 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$) não alteraram a estimativa.

Em iguais condições de solo e cultura (feijão) e com $100 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de N, $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, a estimativa de MEIRELLES *et alii* (1980) para todo o ano de 1977, com 210,2 mm de água drenada a 120 cm do perfil, foi de $15 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de N, com 9% proveniente do adubo.

Para REICHARDT *et alii* (1979b), que estudaram essa dinâmica utilizando um Latossolo Vermelho-Amarelo fase arenosa cultivado com milho (C 111-X), a lixiviação a 127,5 cm de profundidade foi em torno de $9,2 \text{ kg N} \cdot \text{ha}^{-1}$, com 4,8% proveniente dos $80 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de N, $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ enriquecido em 1,201% de átomos de ^{15}N aplicados. A cultura recebeu 718,3 mm de água e a drenagem profunda somou 312,9 mm no período (novembro/77 a março/78).

5. CONCLUSÕES

Durante o ciclo da cultura do milho, cerca de 30% (194,80 mm) das saídas de água foi atribuída à drenagem profunda (a 120 cm), confirmando a recomendação da literatura pertinente de que ela não deve ser negligenciada ou assumida a partir de critérios pouco confiáveis, nos balanços hídricos.

Encontrou-se uma dependência razoável entre volume de extra-umidade atual do solo pelo emprego de tensiômetros com manômetro de mercúrio e extratores de solução do solo com cápsula porosa de cerâmica. Discutiram-se alguns aspectos quanto ao uso desses extratores em estudos dessa natureza e algumas sugestões são apresentadas.

As perdas de N-nitrato para zonas abaixo do sistema radicular da cultivar CARGILL 111-X foram estimadas em 32,40 kg por hectare. Pela discriminação das fontes de N, a partir da técnica do traçador estável ^{15}N , o fertilizante uréia contribuiu com 34% do total lixiviado. Esta estimativa é elevada e deve ser tomada em consideração quando se faz estudo sobre a partição de adubo nitrogenado nos trópicos, pois situações edáficas similares são esperadas com frequência nessas áreas.

6. SUGESTÕES

Uma vez que o presente trabalho versou sobre uma metodologia, julgou-se necessário acrescentar aqui algumas sugestões quanto à realização de trabalhos futuros, sugestões estas baseadas em observações e dificuldades sentidas no decorrer deste. Elas são as seguintes:

1. utilização conjunta de tensiômetros e sonda de nêutrons (quando possível), pois acredita-se que, embora a última perca em sensibilidade de medidas para a primeira, apresenta, entre outras, uma grande vantagem. O tensiômetro fornece leituras do potencial da água no solo até certo limite (0,8 atm). Com a sonda, embora menos precisa, poder-se-ia continuar as leituras de umidade do solo além do ponto de desativação dos tensiômetros, que podem se constituir em dados importantes sobre o movimento ascendente de água no solo e sua consequente contribuição à evapotranspiração;

2. utilização de extratores de solução com volumes de câmara de vácuo iguais e reduzido (HANSEN e HARRIS, 1975) e de cápsulas porosas com permeabilidade previamente testadas, de tal forma que sejam unifor

mes, a fim de que elas não sejam fator limitante à extração de solução do solo;

3. o intervalo entre uma extração de solução e outra não deve ser constante, mas variáveis, de acordo com a precipitação, ou seja, tornar mais frequentes as extrações quanto mais frequente ou intensa a precipitação, de tal sorte a aumentar o controle sobre a concentração do íon a diferentes profundidades;

4. face a prováveis perdas iniciais significativas de N por lixiviação, esta técnica poderia ajudar nas decisões de parcelamento do fertilizante nitrogenado, ou seja, associar as características físico-hídricas regionais às exigências temporais das culturas neste nutriente.

7. LITERATURA CITADA

- ADRIANO, D.C.; F.H. TAKATORI; P.F. PRATT e O.A. LORENZ, 1972a. Soil nitrogen balance in selected row-crop sites in Southern California. *J. Environ. Qual.*, Maryland, 1: 279-282.
- ADRIANO, D.C.; P.F. PRATT e F.H. TAKATORI, 1972b. Nitrate in unsaturated zone of an alluvial soil in relation to fertilizer nitrogen rate and irrigation level. *J. Environ. Qual.*, Maryland, 1: 418-422.
- ALBERTS, E.E.; R.E. BURWELL e G.E. SCHUMAN, 1977. Soil nitrate-nitrogen determined by coring and solution extraction techniques. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 41: 90-92.
- ARAÚJO SILVA, J.C.; P.L. LIBARDI; K. REICHARDT e A.M. CALVACHE U., 1980. Determinação da condutividade hidráulica saturada da Terra Roxa Estruturada (Paleustalf Óxico). In: Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, 7^o, Aracaju, *Anais*. Sergipe, CNPq ed., p. 761-770.
- BARTHOLOMEW, W.V., 1971. ^{15}N in research on availability and crop use of nitrogen. In: IAEA. *Nitrogen in soil-plant studies*. Vienna, p. 1-20.

- BARTHOLOMEW, W.V.; L.B. NELSON e C.H. WERKMAN, 1950. The use of the nitrogen isotope ^{15}N in field studies with oats. *Agron. J.*, Madison, 42: 100-103.
- BLACK, T.A.; W.R. GARDNER e C.B. TANNER, 1970. Water storage and drainage under a row crop on a sandy soil. *Agron. J.*, Madison, 62: 48-51.
- BOERSMA, L., 1965. Field measurement of hydraulic conductivity above a water table. In: BLACK, C.A. *et alii*. *Methods of soil analysis*. Am. Soc. Agron., Madison, p. 234-252.
- BRASIL - Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas. Comissão de Solos, 1960. *Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de São Paulo*. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura. 634 p. (Boletim nº 12).
- BREMNER, J.M., 1965a. Total nitrogen. In: BLACK, C.A. *et alii*. *Methods of soil analysis*. Part 2. Madison, Am. Soc. Agron., 83: 1149-1178.
- BREMNER, J.M., 1965b. Isotope-ratio analysis of nitrogen in nitrogen-15 tracer investigations. In: BLACK, C.A. *et alii*, eds. *Methods of soil analysis*. Part 2. Madison, Am. Soc. Agron. Cap. 86: 1256-1286.
- BRIGGS, L.J. e A.G. McCALL, 1904. An artificial root for inducing capillary movement of soil moisture. *Science*, Washington, 20: 566-569.
- BROADBENT, F.E. e A.B. CARLTON, 1978. Field trials with isotopically labelled nitrogen fertilizer. In: NIELSEN, D.R. e J.G. MAC DONALD, eds. *Nitrogen in the environment*. New York, Academic Press. p. 1-41.
- BROESHART, H., 1974. Quantitative measurement of fertilizer uptake by crops. *Neth. J. Agric. Sci.*, Wageningen, 22: 245-254.

- BURRIS, R.H.; J.F. EPPLING; H.R. WAHLIN e P.W. WILSON, 1943. Detection of nitrogen fixation with isotopic nitrogen. *J. Biol. Chem.*, Baltimore, 48: 349-357.
- CALVACHE U., A.M.; P.L. LIBARDI; K. REICHARDT; R.L. VICTÓRIA e J.C. ARAÚJO SILVA, 1981. Absorção e redistribuição do nitrogênio proveniente do fertilizante (^{15}N -urêia) e do solo, pela planta de milho (*Zea mays*, L.). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. (No prelo).
- CAMARGO, M.N. e I.C. FALESI, 1975. Soils of the Central Plateau on Transamazonian Highway of Brazil. In: BORNEMISZA, E. e A. ALVARADO, eds. *Soil management in tropical America*. Raleigh. North Carolina State University. p. 25-44.
- CASTRO, P.T., 1979. Evapotranspiração atual e potencial de uma cultura de milho (*Zea mays*, L.). Piracicaba, ESALQ/USP, 61 p. (Dissertação de Mestrado).
- CERVELLINI, A.; E. SALATI; E.S.B. FERRAZ; N.A. VILLA NOVA; K. REICHARDT; A. DECICO; J.C. OMETTO e M.J. PEDRO JUNIOR, 1973. Análise dos dados meteorológicos de Piracicaba (SP). Piracicaba, ESALQ. 26 p. (Boletim Técnico-Científico, nº 36).
- CHO, C.M.; G. PROKSCH e A.C. CALDWELL, 1967. The effect of placement on the utilization of nitrogen by maize as determined by ^{15}N -labelled ammonium sulphate. In: IAEA. *Isotopes in plant nutrition and physiology*. Vienna, p. 47-53.
- CRUCIANI, D.E., 1972. Balanço hídrico em solo cultivado com cana-de-açúcar. Piracicaba. CENA, 32 p. (Boletim Científico, nº 6).

- DARCY, H., 1856. *Les fontaines publique de la Ville de Dijon*. Paris, Victor Dalmon.
- DELWICHE, C.C., 1970. The nitrogen cycle. *Scient. Am.*, New York, 233: 136-146.
- EMBRAPA - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1979. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro. Parte 1, Método 1.11.2; Parte 2, Métodos 2.1.1.-2.1.8.
- E.U.A. - USDA, 1975. Soil Taxonomy. *A basic system of soil classification to making an interpreting soil surveys*. Washington. 754 p. (Agriculture Handbook nº 436).
- FERRAZ, E.S.B., 1968. Determinação da evapotranspiração real pela moderação de nêutrons. Piracicaba, ESALQ/USP. 48 p. (Tese de Doutorado).
- HANSEN, E.A. e A.R. HARRIS, 1975. Validity of soil-water samples collected with porous ceramic cups. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, 39: 528-536.
- HANWAY, J.J., 1963. Growth stages of corn. *Agron. J.*, Madison, 55: 487-492.
- HAUCK, R.D. e M. BYSTROM, 1970. ¹⁵N-A selected bibliography for agricultural scientists. Ames, Iowa State University Press. 206 p.
- HAUCK, R.D. e M.J. BREMNER, 1976. Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research. *Adv. Agron.*, New York, 28: 219-266.
- HAUCK, R.D. e V.J. KILMER, 1975. Cooperative research between the Tennessee Valley Authority and Land-Grant Universities on nitrogen fertilizer use and water quality. In: INT. CONF. STABLE ISOTOPES, 2º, Oak Brook, Illinois.

- HELLIOTT, L.F.; T.M. McCALLA; L.N. MIELKE e T.A. TRAVIS, 1972. Ammonium, nitrate and total nitrogen in the soil water of feedlot and field soil profiles. *Appl. Microbiol.*, Maryland, 28: 810-813.
- HERA, C., 1979. Some aspects of nitrogen fertilization using ^{15}N . In: IAEA. *Isotopes and radiation in research on soil-plant relationships*. Vienna. p. 107-123.
- HILLEL, D.; V.D. KRENTOS e Y. STYLIANOV, 1972. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. *Soil Sci.*, Baltimore, 114: 395-400.
- HILTBOLD, A.E.; V.W. BARTHOLOMEW e C.H. WERKMAN, 1951. The use of tracer techniques in the simultaneous measurement of mineralization and immobilization of nitrogen in soil. *Soil Sci. Am. Proc.*, Madison, 15: 166-173.
- IAEA, 1970. Fertilizer management practices of maize: results of experiments with isotopes. Vienna. 78 p. (Technical Report Series, nº 121).
- IAEA, 1976. Tracer manual on crops and soils. Vienna. 277 p. (Technical Reports Series, nº 171).
- IVANKO, S., 1972. Recent progress in the use of ^{15}N in research on nitrogen balance studies in soil-plant relationship. In: IAEA. *Isotope and radiation in soil-plant relationships including forestry*. Vienna, p. 483-497.
- JACKSON, M.L., 1976. Analisis quimico de suelos. 3. ed. Barcelona, Omega. 662 p.

- JANSEN, M.E., 1967. Evaluating irrigation efficiency. *J. Irrig. Drain.*, New York, 95: 83-98.
- KIMBLE, J.M.; R.J. BARLETT; J.L. McINTOSH e K.E. VARNEY, 1972. Fate on nitrate from manure and inorganic nitrogen in a clay soil cropped to continuous corn. *J. Environ. Qual.*, Maryland, 1: 413-415.
- KINJO, T. e P.F. PRATT, 1971. Nitrate adsorption: I. In some acid soils of Mexico and South America. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, 35(5): 722-725.
- KLUTE, A., 1972. The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils. *Soil Sci.*, Baltimore, 113: 264-276.
- KRONE, R.B.; H.F. LUDWIG e J.F. THOMAS, 1951. Porous tube device for sampling soil solutions during water-spreading operations. *Soil Sci.*, Baltimore, 73(3): 211-219.
- LaRUE, M.E.; D.R. NIELSEN e R.M. HAGAN, 1968. Soil water below a ryegrass root zone. *Agron. J.*, Madison, 60: 625-629.
- LIBARDI, P.L., 1978. Condutividade hidráulica do solo em condições de campo. Piracicaba, ESALQ/USP, 113 p. (Tese de Doutorado).
- LIBARDI, P.L., 1979. Cálculo da evapotranspiração de uma cultura através do balanço hídrico: Curso de Climatologia Agrícola para Professores de Escolas de Agronomia do Brasil. MEC/ESALQ-USP, Piracicaba. 8 p. (Apostila mimeografada).
- LIBARDI, P.L. e K. REICHARDT, 1978. Destino de uréia aplicada a um solo tropical. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 2: 40-44.

- MAGALHÃES, A.C. e W.J. SILVA, 1978. Determinantes genético-fisiológicos da produtividade do milho. In: PATERNIANI, G., ed. *Melhoramento e produção de milho no Brasil*. Campinas, CARGILL. 650 p.
- MALAVOLTA, E., 1980. *Elementos de nutrição mineral de plantas*. São Paulo, Ceres. 253 p.
- MALAVOLTA, E., 1981. *Manual de química agrícola: adubos e adubação*. 3a. edição. São Paulo, Ceres. 607 p.
- MARCOS, Z.Z., 1971. Morphologic and physical properties of fine-textured Oxisols, State of São Paulo. Columbus, Ohio State University. 272 p. (Ph.D. thesis).
- MEIRELLES, N.M.F.; P.L. LIBARDI e K. REICHARDT, 1980. Absorção e lixiviação de nitrogênio em cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.). *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 4: 83-88.
- MEKARU, T. e C. UEHARA, 1972. Anion adsorption in ferruginous tropical soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, 36: 296-300.
- MENGEL, K. e E.A. KIRKBY, 1978. *Principles of plant nutrition*. Bern, International Potash Institute. 593 p.
- NELSON, L.B., 1970. Research needed to resolve the plant nutrient-water quality issue. In: ENGELSTAD, O.P., ed. *Nutrient mobility in soils: accumulation and losses*. Madison, *Soil Sci. Soc. Am.*, p. 75-81 (Special publ., nº 4).
- NIELSEN, D.R.; J.W. BIGGAR e K.T. ERH, 1973. Spatial variability of field

- measured soil-water properties. *Hilgardia*, Berkeley, 42(7): 215-259.
- OLSON, R.A., 1979. Isotopes studies on soil and fertilizer nitrogen. In: IAEA. *Isotopes and radiation in research on soil-plant relationships*. Vienna. p. 3-32.
- PEREIRA, A.R.; E.S.B. FERRAZ; K. REICHARDT e P.L. LIBARDI, 1974. Estimativa da evapotranspiração e da drenagem profunda em cafezais cultivados em solos podzolizados Lins e Marília. Piracicaba, CENA. 28 p. (Boletim Científico, nº 14).
- PRATT, P.F. e H.D. CHÁPMAN, 1961. Gains and losses of mineral elements in an irrigated soil during a 20-year lysimeter investigation. *Hilgardia*, Berkeley, 30(16): 445-467.
- PRATT, P.F.; W.W. JONES e V.E. HUNSAKER, 1972. Nitrate in deep soil profiles in relation to fertilizer rates and leaching volume. *J. Environ. Qual.*, Maryland, 1: 97-101.
- RANZANI, G.; O. FREIRE e T. KINJO, 1966. *Carta de solos do município de Piracicaba*. Piracicaba, ESALQ/USP. 85 p.
- REEVE, R.C. e E.J. DOERING, 1965. Sampling the soil solution for salinity appraisal. *Soil Sci.*, Baltimore, 99(5): 339-344.
- REICHARDT, K., 1975. *Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera*. 3a. ed. Piracicaba, CENA/CARGILL. 286 p.
- REICHARDT, K.; F. GROHMANN e P.L. LIBARDI, 1976. Spatial variability of physical properties of a tropical soil: II. soil water retention curves

and hydraulic conductivity. Piracicaba, CENA. 24 p. (Boletim Técnico, nº 5).

REICHARDT, K.; P.L. LIBARDI; L.C.U. SAUNDERS e A. CADIMA Z., 1979a. Dinâmica da água em solo cultivado com milho. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 1(3): 1-5.

REICHARDT, K.; P.L. LIBARDI; R.L. VICTÓRIA e G.P. VIEGAS, 1979b. Dinâmica do nitrogênio num solo cultivado com milho. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 3: 17-20.

REICHARDT, K.; P.L. LIBARDI; N.M.F. MEIRELLES; F.F. FERREYRA H.; E.A.G. ZAGATTO e E. MATSUI, 1977. Extração e análise de nitratos em solução do solo. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 1: 130-132.

RICHARDS, L.A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous media. *Physics*, Minneapolis, 1: 318-333.

RITTENBERG, D., 1946. The preparation of gass sample for mass-spectrometric analysis. In: WILSON, D.W., ed. *Preparation and measure of isotopic tracers*. Ann Arbor, p. 31.

ROSE, C.W. e W.R. STERN, 1967. Determination of withdrawal of water from soil by crop roots as a function of depth and time. *Aust. J. Soil Res.*, Melbourne, 5: 11-19.

RUSSEL, E.W., 1977. *Soil condition and plant growth*. 10th ed. London, Longman. 849 p.

RUZICKA, J.; E.H. HANSEN e E.A.G. ZAGATTO, 1977. Flow injection analysis. Part VII. Use of ion-selective electrodes for rapid analysis of soil

extracts and blood serum. Determination of potassium, sodium and nitrate. *Anal. Chim. Act.*, Amsterdam, 88: 1-16.

SANCHEZ, P.A., 1976. *Properties and management of soils in the tropics*. New York, John Wiley. 618 p.

SAXTON, K.E.; G.E. SCHUMAN e R.E. BURWELL, 1977. Modeling nitrate movement and dissipation in fertilized soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, 41: 265-271.

STEWART, B.A., 1970. A look at agricultural practices in relation to nitrate accumulations. In: ENGELSTAD, O.P., ed. *Nutrient mobility in soils: accumulation and losses*. *Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, p. 47-60 (Special Publ., nº 4).

STEWART, B.A.; F.G. VIETS; G.L. HUTCHINSON; W.D. KEMPER; F.E. CLACK; M.L. FAIRBOURN e F. STRAUCH, 1967. Distribution of nitrates and other water pollutants under fields, and corrals in the middle South Platte valley of Colorado. Forth Collins, U.S. Department of Agriculture. 206 p.

SINGH, B. e G.S. SEKHON, 1979. Nitrate pollution of groundwater from farm use of nitrogen fertilizers - a review. *Agric. Environm.*, Amsterdam, 4(3): 207-225.

THENABADU, M.W., 1979. Isotope studies on loss of nitrogenous fertilizers from soils: a review. In: IAEA. *Isotopes and radiation in research on soil-plant relationships*. Vienna, p. 125-135.

THOMAS, G.W., 1970. Soil and climatic factors which affect nutrient mobility. In: ENGELSTAD, O.P., ed. *Nutrient mobility in soils:*

accumulation and losses. *Soil Sci. Soc. Am.*, Madison, p. 1-20
(Special Publ., nº 4).

TISDALE, S. e W. NELSON, 1975. *Soil fertility and fertilizers*. 2a. ed.
New York, Collier McMillan. 694 p.

Van RAIJ. B. e M. PEECH, 1972. Electrochemical properties of some Oxisols
and Alfisols of the tropics. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Madison, 36:
587-593.

Van RAIJ. B. e O.A. CAMARGO, 1974. Nitrate elution from soil columns of
three Oxisols and one Alfisol. *Trans. 10th Congr. Int. Soil Sci. Soc.*,
Moscou, 2: 384-391.

VERDADE, F.C., 1951. Estudo da variabilidade dos nitratos num solo tipo
Terra Roxa Estruturada. *Bragantia*, Campinas, 11: 269-276.

VIETS, F.G. e R.H. HAGEMAN, 1971. Factors affecting the accumulation of
nitrate in soil, water and plants. Washington, USDA. 63 p.
(Agriculture Handbook, nº 413).

VILLA NOVA, N.A.; R. VENCOVSKI; J.C. OMETTO e A. DECICO, 1973. Contribuição
para o estudo do vento em Piracicaba (SP). In: Semana de Estudo de
Meteorologia Agrícola do Paraná, 2a., *Anais*. Curitiba.

VOSE, P.B., 1980. *Introduction to nuclear techniques in agronomy and plant
biology*. New York, Pergamon, 291 p.

WAGENET, R.J.; J.W. BIGGAR e D.R. NIELSEN, 1977. Tracing the transformations
of urea fertilizer during leaching. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison,
41: 896-902.

WAGNER, G.H., 1962. Use of porous ceramic cups to sample soil water within the profile. *Soil Sci.*, Baltimore, 94: 379-386.

WAGNER, G.H., 1965. Changes in nitrate N in field plot profiles as measured by the porous cup technique. *Soil Sci.*, Baltimore, 100: 397-402.

WIJLER, J. e C.C. DELWICHE, 1954. Investigations on the denitrifying process in soil. *Plant and Soil*, Hague, 5: 155-169.

APÊNDICE

DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA K_0 E CAPILAR $K(\theta)$

1. Metodologia

HILLEL *et alii* (1972) propõem um roteiro simples e completo no "método do perfil instantâneo" (KLUTE, 1972) para conhecer-se a dependência $K=K(\theta)$, que pode ser entendido a partir de um rearranjo da equação (6), ou seja,

$$K(\theta) = -q / (\partial\psi/\partial z) \dots\dots\dots (10)$$

O termo q pode ser obtido pelo uso da expressão :

$$q = \Sigma (\partial\theta/\partial t) dz \dots\dots\dots (11)$$

onde q é o fluxo de água através de cada incremento de profundidade (dz) e $\partial\theta/\partial t$ é calculado a partir do gráfico de θ versus t . Esta variação de umidade com o tempo de drenagem para cada camada pode ser obtida através de dois métodos, um direto e outro indireto. O primeiro faz uso da sonda de nêutrons (que pode ser visto em FERRAZ, 1968); isto é, para cada tempo t tem-se θ , a partir da curva de calibração da sonda para cada solo. O método indireto lança mão das chamadas curvas características ou curvas de retenção de água, que relacionam o potencial matricial com a umidade do solo.

O gradiente $\partial\psi/\partial z$, denominador da equação (10), é obtido a partir de gráficos de ψ versus z para cada tempo. Tomando-se as tangentes

às curvas $\psi = \psi(z)$ obtêm-se o gradiente. De igual modo, para $\partial\theta/\partial t$, em $\theta = \theta(t)$. A condutividade $K(\theta)$ é obtida, então, conforme indica a equação 10.

O procedimento segue, através da construção de curvas de $K(\theta)$ versus θ , buscando as melhores para as diferentes camadas do solo. Nos experimentos conduzidos pelos autores da proposta, observaram que K relacionou-se com θ exponencialmente, isto é:

$$K = a \cdot \exp(b \theta) \dots\dots\dots (12)$$

onde a e b são constantes, características do solo.

Para aplicação do método em questão, delimitou-se a área de dimensões 5m x 5m contendo as duas baterias de tensiômetros (item 3.1.3, texto) através de diques de terra com cerca de 30 cm de altura. O ensaio durou 15 dias, iniciado em 07/08/79.

A infiltração foi mantida por meio de uma fonte contínua de água, conservando-se uma lâmina de água em torno de 10 cm na superfície até que se estabelecesse fluxo constante no perfil do solo, atingindo a profundidade de 135 cm, o qual foi alcançado após 7h30 do início da operação. Esta confirmação é obtida por meio das alturas das colunas de mercúrio dos tensiômetros. Estas passam a incógnitas na equação (5), quando ψ_m é igualado a zero - condições de saturação da camada correspondente (ou simplesmente observando-se não haver mais alteração nas colunas de Hg).

Estabelecida a lâmina de água, iniciou-se as medidas da taxa de infiltração por meio de cilindros de plástico PVC (30 cm de ϕ e altura 40 cm), pressionando-os na superfície do solo e medindo a taxa de decrés

cimo da altura da lâmina de água em seu interior, por meio de uma régua. Terminada esta operação - repetida em vários locais da parcela, buscando-se uma boa média de dados para o cálculo de K_0 , cobriu-se a parcela com lona plástica para evitar qualquer fluxo através da superfície (evaporação ou infiltração por chuva).

As leituras de tensiômetros foram feitas a intervalos de horas no início, logo após a cobertura e diárias, a partir de 24 horas, durante 15 dias - período em que, praticamente, cessou a redistribuição da água no perfil, na profundidade de 135 cm.

2. Resultados

2.1. Condutividade Hidráulica K_0

Decorrido um tempo longo de infiltração, uma vez que uma camada espessa de solo se encontra saturada, o gradiente do potencial hidráulico da água ψ passa a ser unitário. Isto ocorre porque ψ_m se anula, passando o ψ a ser igual ao gravitacional. Nestas condições, o fluxo q (taxa de infiltração) passa a ser igual a K_0 , e sua medição é feita através do abaixamento do nível de água no cilindro, Δh em intervalos de tempo, Δt . Assim:

$$q = \Delta h / \Delta t \dots\dots\dots(13)$$

BOERSMA (1965) sugere que q seja medido até que se verifique que valores consecutivos não difiram significativamente, sendo K_0 o valor médio destes últimos dados de q . Para o cálculo de K_0 , procurou-se uma

equação analítica (por regressão) que descrevesse a variação de q com t. A que melhor se ajustou aos dados foi

$$K_o = a - b \ln t \dots\dots\dots (14)$$

sendo a e b parâmetros de regressão.

Os dados obtidos permitiram ainda o estudo de sua variabilidade espacial, baseado na hipótese de que os valores de K_o seguem uma distribuição de frequência log-normal, o que já foi verificado em várias situações (REICHARDT *et alii*, 1976). A comprovação deste comportamento foi obtida, de acordo com NIELSEN *et alii* (1973):

$$f = (1/K_o \sigma \sqrt{2\pi}) \exp - \left[(\ln K_o - m) / 2\sigma^2 \right] \dots\dots\dots (15)$$

onde f = frequência; m = média de $\ln K_o$ e σ = desvio padrão de $\ln K_o$. Tem-se ainda: moda = $\exp (m - \sigma^2)$; mediana = $\exp (m)$ e média = $\exp (m + 0,5\sigma^2)$.

REICHARDT *et alii* (1976) e os autores citados acima, foram as fontes de referência utilizadas por ARAÚJO SILVA *et alii* (1979), os quais desenvolveram o presente ensaio. Os valores obtidos para K_o foram 2,083, 2,664 e 3,013 cm.hora⁻¹, respectivamente para moda, mediana e média.

2.2. Condutividade Capilar K(θ)

As medidas de ψ e cálculos de θ , a partir das leituras de tensiômetros no momento da cobertura da parcela com plástico, foram atribuídas ao tempo t=0 (início da redistribuição de água no perfil), não menciona

do no roteiro de HILLEL *et alii* (1972).

Quando são prevenidas quaisquer perdas de água através da superfície, a variação de armazenamento em relação ao tempo, ou seja, $\partial A/\partial t$, é o próprio fluxo de água, pela própria equação da continuidade. É o que comumente se utiliza nestes estudos e substitui a equação (11). Estas condições de contorno e a associação da equação de Darcy com a da continuidade (referida no item 3.2.1, texto) estão detalhadas em LIBARDI (1978).

Nas Tabelas 7 e 8 encontram-se as variações de armazenamento $\partial A/\partial t$ e de potencial hidráulico $\partial \psi/\partial z$, obtidas a partir das tangentes às curvas $A=A(t)$ e $\psi=\psi(z)$, respectivamente.

Os valores resultantes do quociente entre os dados das Tabelas 7 e 8 representam $K(\theta)$, conforme indica a equação (10) e podem ser vistos na Tabela 9, com os correspondentes valores de umidade. Observou-se que a equação que relaciona a dependência entre K e θ tem a mesma forma da obtida por HILLEL *et alii* (1972). Assim, utilizou-se os dados da Tabela 9 na equação (12), resultando a Tabela 10 com os valores obtidos pela regressão linear, os quais indicam que a expressão de K utilizada no texto para os cálculos de fluxo de água a 120 cm de profundidade do solo, tem a forma:

$$\ln K_{120} = -16,64 + 44,03 \theta_{120}$$

ou

$$K_{120} = \exp (-16,64 + 44,03 \theta_{120})$$

para qualquer umidade volumétrica (θ).

TABELA 7 - Fluxos de água ($q_z = \partial A / \partial t$), em cm.dia^{-1} , nas profundidades e tempos considerados.

Tempo (dias)	Profundidade (cm)								
	15	30	45	60	75	90	105	120	135
0,25	0,375	0,700	1,400	2,400	2,790	3,980	4,870	6,250	7,380
0,50	0,150	0,490	0,640	0,796	1,158	2,150	2,570	3,010	3,330
0,75	0,097	0,273	0,346	0,470	0,704	2,067	1,770	2,049	2,300
1,00	0,072	0,180	0,280	0,340	0,492	1,210	1,086	1,370	1,600
1,50	0,044	0,112	0,127	0,185	0,282	0,386	0,589	0,720	0,943
2,00	0,022	0,051	0,067	0,092	0,193	0,263	0,366	0,570	0,600
3,00	0,006	0,019	0,031	0,050	0,122	0,217	0,186	0,250	0,356
5,00	0,002	0,009	0,023	0,038	0,116	0,119	0,115	0,167	0,192
10,00	0,002	0,006	0,011	0,037	0,106	0,100	0,066	0,145	0,176
15,00	0,001	0,004	0,009	0,036	0,096	0,080	0,053	0,121	0,170

TABELA 8 - Gradientes ($\partial\psi/\partial z$) para as profundidades e tempos considerados.

Tempo (dias)	Profundidade (cm)								
	15	30	45	60	75	90	105	120	135
0	0,83	0,63	0,77	2,02	1,15	1,17	1,71	1,12	0,88
0,25	0,98	0,90	0,97	2,10	1,83	1,63	1,88	0,97	1,33
0,50	0,74	0,83	1,08	1,88	2,40	1,70	1,82	1,30	0,90
0,75	0,62	0,80	1,02	1,72	1,97	1,58	1,80	1,05	1,42
1,00	0,65	0,83	1,05	1,70	1,83	1,95	2,02	1,17	0,90
1,50	0,76	0,83	1,00	1,48	2,38	2,38	2,00	1,18	0,82
2,00	0,70	0,87	1,00	1,60	2,58	2,23	2,37	1,18	0,73
3,00	0,60	0,87	0,99	1,85	2,83	2,15	2,80	0,87	0,43
5,00	0,62	0,93	0,80	1,72	2,75	2,65	2,53	1,10	0,75
10,00	0,64	0,90	1,02	1,51	3,20	3,12	2,37	1,02	0,53
15,00	0,68	0,97	0,92	1,72	3,17	3,47	3,20	0,76	0,53

TABELA 9 - Condutividade capilar (cm.dia^{-1}) e correspondente unidade ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), nas profundidades (cm) e tempos considerados.

Tempo (dias)	15		30		45		60		75		90		105		120		135	
	K	Ø	K	Ø	K	Ø	K	Ø	K	Ø	K	Ø	K	Ø	K	Ø	K	Ø
0	87,200	0,378	114,780	0,405	93,910	0,410	35,800	0,410	41,800	0,417	61,800	0,425	42,280	0,440	64,560	0,482	82,170	0,428
0,25	0,383	0,371	0,778	0,379	1,449	0,395	1,143	0,400	1,520	0,383	2,440	0,386	2,590	0,384	6,410	0,414	5,549	0,396
0,50	0,203	0,365	0,590	0,373	0,592	0,387	0,423	0,395	0,480	0,365	1,270	0,369	1,412	0,370	2,308	0,390	3,700	0,385
0,75	0,156	0,363	0,340	0,369	0,339	0,385	0,273	0,392	0,380	0,356	1,310	0,365	0,983	0,364	1,942	0,380	1,620	0,380
1,00	0,112	0,362	0,217	0,368	0,267	0,383	0,200	0,391	0,270	0,352	0,620	0,360	0,538	0,360	1,175	0,375	1,777	0,377
1,50	0,058	0,360	0,135	0,366	0,127	0,382	0,125	0,391	0,120	0,350	0,160	0,354	0,294	0,354	0,612	0,365	1,145	0,374
2,00	0,031	0,359	0,059	0,366	0,067	0,380	0,057	0,390	0,075	0,346	0,118	0,350	0,154	0,350	0,481	0,363	0,822	0,369
3,00	0,010	0,358	0,022	0,365	0,031	0,379	0,027	0,390	0,043	0,344	0,101	0,345	0,066	0,345	0,288	0,356	0,828	0,365
5,00	0,003	0,356	0,009	0,365	0,029	0,376	0,022	0,388	0,042	0,342	0,045	0,337	0,045	0,340	0,152	0,350	0,256	0,361
10,00	0,002	0,354	0,007	0,361	0,011	0,371	0,025	0,380	0,033	0,334	0,032	0,326	0,028	0,330	0,142	0,340	0,332	0,354
15,00	0,002	0,350	0,004	0,358	0,009	0,366	0,021	0,375	0,030	0,328	0,024	0,320	0,017	0,322	0,150	0,332	0,321	0,352

TABELA 10 - Dados obtidos pela regressão linear, a partir da equação (12), aplicados aos resultados da Tabela 9.

Profundidade (cm)	a	b	r^2
15	-139,30	377,52	0,925
30	- 81,71	215,05	0,892
45	- 85,85	219,58	0,968
60	- 88,01	220,35	0,820
75	- 31,55	84,29	0,967
90	- 29,12	78,45	0,968
105	- 26,36	70,18	0,941
120	- 16,64	44,03	0,961
135	- 27,93	75,31	0,973