

**ABSORÇÃO E LIXIVIAÇÃO DE NITROGÊNIO EM  
CULTURA DE FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.)**

**NELSON MORATO FERRAZ MEIRELLES**

**Orientador : KLAUS REICHARDT**

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.

**PIRACICABA**  
Estado de São Paulo - Brasil  
Junho, 1979

À memória do meu saudoso pai,

À minha mãe,

Aos meus irmãos,

O F E R E Ç O.

À minha esposa Rachel,

Aos meus filhos

Nelson,

Patrícia,

Carolina,

D E D I C O.

## AGRADECIMENTOS

- Ao *Dr. Klaus Reichardt*, pela orientação deste trabalho;
- Ao amigo *Paulo Leonel Libardi*, pela inestimável colaboração na elaboração e revisão deste trabalho;
- Aos colegas *Fernando, Marcos e Luiz Carlos*, pela amizade, incentivo e colaboração;
- Ao *Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA)*, pelos recursos financeiros obtidos através da *Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)*, dentro do "Projeto Feijão";
- À *Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA)*, pela participação no *Grupo de Pesquisa Coordenada sobre os Resíduos Nitrogenados Agrícolas, em Particular sua Conservação como Fertilizantes e seu comportamento como Poluentes em Potencial*;
- À *Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN)* e ao *Plano de Formação e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (PLANFAP)*, do Ministério das Minas e Energia, pela Bolsa concedida;
- Ao *Instituto de Zootecnia, Nova Odessa (SP)*, pelo apoio fornecido;
- Ao *Sr. João Eduardo Pilotto*, pelos serviços datilográficos; e aos *Srs. Benedito Herculano Davanzo e Celso de Aguiar*, pelos de impressão e composição final deste trabalho.

# Í N D I C E

	<u>Página</u>
1. RESUMO . . . . .	1
2. INTRODUÇÃO . . . . .	3
3. REVISÃO DE LITERATURA . . . . .	5
4. MATERIAL E MÉTODOS . . . . .	14
4.1. Generalidades . . . . .	14
4.2. Parcela Experimental . . . . .	15
4.2.1. Unidades Extratoras de Solução do Solo.	15
4.2.2. Tensiômetros . . . . .	21
4.2.3. Tubos de Acesso para Sonda de Neutrons.	21
4.2.4. Sonda de Neutrons . . . . .	21
4.3. Implantação da Cultura e Tratos Culturais . . .	22
4.4. Lixiviação de Nitratos . . . . .	23
4.4.1. Fluxo de Água . . . . .	24
4.4.2. Concentração de Nitrato . . . . .	25
4.4.3. Estimativa da Porcentagem de Nitrato na Solução do Solo Proveniente do Ferti- lizante . . . . .	27
4.5. Eficiência de Utilização do Fertilizante Nitro- genado pela Cultura (EUFN) . . . . .	30
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO . . . . .	32
5.1. Fluxo de Água . . . . .	32
5.2. Concentração de Nitrato . . . . .	38

5.3. Fluxo de Nitrato . . . . .	39
5.4. Nitrato na Solução do Solo Proveniente do Fer tilizante . . . . .	42
5.5. Nitrogênio na Planta . . . . .	46
6. CONCLUSÕES . . . . .	54
7. SUMMARY . . . . .	56
8. LITERATURA CITADA . . . . .	58
APÊNDICE . . . . .	66

## LISTA DAS TABELAS

<u>Tabela</u>	<u>Página</u>
A - Caracterização Física do Solo . . . . .	16
B - Caracterização Química do Solo . . . . .	17
1 - Valores Mensais de Precipitação, Irrigação e Drenagem Profunda durante o ano de 1977 . . . . .	34
2 - Concentração de Nitrato na Solução do Solo de 10 Unidades Extratoras colocadas na área de 5m x 5m, a 120 cm de profundidade . . . . .	37
3 - Valores da Vazão de Nitrato e Nitrogênio por Mês, em z = 120 cm, durante o ano de 1977 . . . . .	40
4 - Dados de Átomos % de $^{15}\text{N}$ e de Porcentagem de Nitrato na Solução do Solo Proveniente do Fertilizante (PNSPF) aplicado no solo em março de 1977 .	43
5 - Valores da Vazão de Nitrato e Nitrogênio por Mês, proveniente do fertilizante (em z = 120 cm) aplicado no solo em março de 1977 . . . . .	44
6 - Dados de Matéria Seca (M.S.), Átomos % de $^{15}\text{N}$ , Nitrogênio Total na Planta (NTP), Porcentagem de Nitrogênio na Planta Proveniente do Fertilizante (PNPPF) e Eficiência de Utilização do Fertilizante Nitrogenado (EUFN) pela cultura de feijão, aos 20, 40 e 60 dias na colheita.....	47

LISTA DAS FIGURAS

<u>Figura</u>	<u>Página</u>
A - Parcela Experimental (10m x 10m), mostrando área com $^{15}\text{N}$ (5m x 5m) . . . . .	18
B - Esquema da Unidade Extratora de Solução do Solo.	20
C - Esquema do Eletrodo Seletivo de Nitrato em Fluxo Contínuo . . . . .	26
1 - Variação do fluxo de água ( $q_{\text{H}_2\text{O}}$ ), concentração de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), fluxo de nitrato ( $q_{\text{NO}_3^-}$ ) e precipitação (P) durante o período da cultura (março a junho de 1977) . . . . .	36
2 - Gráfico da Porcentagem de Nitrogênio na Planta Proveniente do Fertilizante (PNPPF), Nitrogênio Total na Planta (NTP) e Eficiência de Utilização do Fertilizante Nitrogenado (EUFN), em função do Tempo Após a Germinação (TAG). . . . .	49
3 - Gráfico da variação do Nitrogênio Total na Planta (NTP) Proveniente do Fertilizante (NTPPF) e do Solo (NTPPS), e da Testemunha, ao longo do período da cultura. TAG = Tempo Após Germinação....	51

## 1. RESUMO

Em parcela de solo Terra Roxa Estruturada (Oxic Paleustalf), localizada no campus da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, estudaram-se dois caminhos seguidos pelo nitrogênio fertilizante aplicado a uma cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.): a fração perdida com a solução do solo por percolação profunda profundidade de 120 cm e a fração absorvida pela planta.

No experimento foram utilizados sonda de nêutrons, tensiômetros, extratores de solução do solo e fertilizante nitrogenado marcado com  $^{15}\text{N}$  cuja dose de aplicação foi de 100 Kg/ha.

É apresentada metodologia para extração de solução do solo *in situ* na qual determinou-se a concentração de nitratos através de eletrodos seletivos num sistema de fluxo contínuo.



Determinações de nitrogênio total, átomos por cento de  $^{15}\text{N}$ , em amostras de solução do solo e da planta, além da quantidade de matéria seca produzida permitiram determinar a eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado pela cultura em diferentes fases de seu desenvolvimento.

Os resultados obtidos permitiram quantificar as perdas ocorridas ( $\approx 15 \text{ Kg N/ha.ano}$ , 9% dos quais provenientes do fertilizante), bem como verificar a melhor época de aplicação do fertilizante nitrogenado (1/3 da dose total no plantio e o restante dos 30 aos 45 dias após a germinação) objetivando seu máximo aproveitamento pela cultura.

## 2. INTRODUÇÃO

É amplamente reconhecido o papel de destaque do nitrogênio entre os nutrientes essenciais ao crescimento das plantas, principalmente no que diz respeito ao incremento de produção. Além disso, todos os processos vitais estão associados à presença do nitrogênio como constituinte característico, participando de inúmeros compostos de importância fisiológica dentro do metabolismo das plantas e dos animais.

Experimentos de campo, nas mais variadas condições e para diferentes tipos de solo, têm mostrado ser o nitrogênio o principal fator limitante ao crescimento vegetal.

Em nosso meio, a importância do nitrogênio se sobressai ainda mais pelas características tropicais de nossos solos, nos quais há grande mobilidade do N e alta mineralização da matéria orgânica, além do elevado custo dos fertilizantes nitrogenados devido à crise energética mundial. Sendo assim,

o uso de fertilizantes nitrogenados tornou-se limitado, exigindo um conhecimento mais profundo dos processos e interações que ocorrem no sistema solo-água-planta visando seu máximo aproveitamento pela cultura. Isto tem sido objeto de polêmicas internacionais, principalmente sobre seu efeito como poluente das águas superficiais e subterrâneas (*Agência Internacional de Energia Atômica, Vienna, Áustria, 1974*).

O presente trabalho propõe como objetivos estudar os caminhos seguidos pelo nitrogênio aplicado como fertilizante em cultura de feijão, especificamente:

- (i) a fração perdida com a solução do solo por percolação profunda a 120 cm de profundidade, verificando a contribuição relativa do fertilizante nitrogenado aplicado, e
- (ii) a fração absorvida pela planta, através da qual e do nitrogênio total na planta, determinou-se a eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado pela cultura.

### 3. REVISÃO DE LITERATURA

Quando se estuda a dinâmica de íons e moléculas no solo, de modo especial aqueles que têm grande mobilidade, verifica-se que o seu movimento se dá principalmente por fluxo de massa, isto é, através do arraste pela água.

Segundo *GETMANETS e AVRAMEKNO (1976)* o íon nitrato é considerado o mais móvel dos grupos nitrogenados no solo, constituindo a forma mais disponível às plantas, sendo pois de grande importância o estudo de seu movimento no solo. Para a quantificação deste movimento, é fundamental o conhecimento do fluxo de água no solo, bem como da concentração deste íon na solução do solo.

O fluxo de água no solo foi determinado pela primeira vez em 1856, por *DARCY* que desenvolveu uma equação para o movimento de água em colunas de areia sob condições de saturação. Esta equação estabelece simplesmente que a quanti

dade de água que passa por unidade de tempo e de área através de um meio poroso é proporcional ao gradiente hidráulico. A constante de proporcionalidade denomina-se condutividade hidráulica saturada ou permeabilidade e é uma característica intrínseca do meio quanto à transmissão de água. Em 1907, *BUCKINGHAM* estendeu esta equação para solo não saturado, condição em que mais frequentemente se encontram os solos agrícolas, recebendo o nome de Equação de Darcy-Buckingham. Entretanto, o termo Equação de Darcy se tornou generalizado e tem sido utilizado tanto para solo saturado como para solo não saturado. Matematicamente esta equação é o produto da condutividade hidráulica não saturada do solo pelo gradiente de potencial total da água no solo.

Atualmente a determinação da condutividade hidráulica do solo sob condições de campo tem sido feita através do método do perfil instantâneo (*HILLEL et alii, 1972*). Neste método é necessário que se obtenham os perfis de umidade e de potencial matricial. Os primeiros são obtidos satisfatoriamente utilizando a técnica da moderação de nêutrons, por meio de uma sonda (*BARROS FERRAZ, 1972*). Os segundos podem ser obtidos por meio de tensiômetros (*RICHARDS, 1965*) instalados a diferentes profundidades, através dos quais se obtêm também os valores de gradiente de potencial.

Uma vez de posse dos valores de condutividade hidráulica e dos valores de gradiente de potencial, pode-se

determinar fluxos de água em profundidades sob consideração.

A determinação das concentrações ou atividades de íons (nutrientes ou quaisquer substâncias na solução do solo) tem sido um problema abordado há muito tempo pelos pesquisadores interessados em ciência do solo. Mesmo assim, nenhuma solução plenamente satisfatória foi até hoje apresentada, talvez devido à própria complexidade do sistema solo - solução do solo. De acordo com *REICHARDT et alii (1977)*, o método mais comumente utilizado consta da agitação de certa quantidade de solo com uma solução extratora, em dada proporção e por certo tempo, determinando-se a concentração do íon no extrato após centrifugação e filtração. Várias críticas podem ser impostas a este procedimento, a principal delas por envolver a completa destruição do arranjo natural do sistema poroso solo-solução do solo. Recentemente tem sido utilizada uma nova técnica de extração (*REEVE e DOERING, 1965; NIELSEN e BIGGAR, 1976*), na qual a solução do solo é obtida aplicando-se vácuo a uma cápsula porosa de cerâmica colocada no solo em dada profundidade. Essa técnica também merece críticas, mas apresenta uma série de vantagens, principalmente em se tratando de estudos que envolvem o  $Cl^-$  ou  $NO_3^-$  que são íons relativamente "livres" na solução do solo.

Determinações precisas e rápidas de nitratos na solução do solo são frequentemente necessárias, principalmente em estudos de seu movimento no solo em condições de campo,

como pode ser visto nos trabalhos de *BIGGAR et alii* (1975), *REICHARDT et alii* (1977), *LIBARDI e REICHARDT* (1978), *BROADBENT e CARLTON* (1978) e inúmeros outros.

De acordo com *RUZICKA et alii* (1976), a descoberta na última década dos eletrodos seletivos de nitrato em muito tem facilitado a sua determinação. *ONKEN e SUNDERMAN* (1970) compararam dados obtidos com este eletrodo com os determinados colorimetricamente utilizando ácido fenol disulfônico, (*JACKSON, 1976*) e verificaram que os dados foram bem concordantes.

Mais recentemente, *RUZICKA et alii* (1976) desenvolveram uma técnica bastante eficiente na determinação do íon nitrato em solução de solo a qual consiste de um sistema de fluxo contínuo e onde a concentração é determinada potenciométricamente.

Conhecendo-se então o fluxo de água e a concentração de nitrato na profundidade em estudo, pode-se determinar o fluxo de massa de  $N-NO_3$  (Kg/ha.ano) de modo semelhante a *TANJI* (1977).

Segundo *GARDNER* (1965), o movimento de nitrogênio e seus compostos no solo são de grande importância na determinação de sua disponibilidade para o crescimento das plantas. O mesmo autor considera o fluxo de massa e a difusão como responsáveis pelo seu movimento no solo e mostra as situações em que cada um deles são significantes.

A descoberta do isótopo estável  $^{15}\text{N}$  por *NAUDE* em 1929, apesar de compostos enriquecidos com  $^{15}\text{N}$  terem se tornado comercialmente disponíveis apenas a partir de 1940, trouxe um grande avanço nas pesquisas sobre disponibilidade, movimento, absorção e perdas do nitrogênio do solo. Uma das primeiras aplicações em campo de fertilizantes marcados com  $^{15}\text{N}$  é atribuída a *BARTHOLOMEW et alii* (1950).

*MANGUIAT e BROADBENT* (1977) afirmam que o uso de traçadores de nitrogênio no sistema solo-água-planta permite distinguir e identificar as "fontes" e "sumidouros" de nitrogênio nesse complexo sistema biológico.

Segundo *FRIED et alii* (1975) a técnica de traçadores é atualmente o único meio disponível de medir com precisão a absorção de fertilizante por uma cultura. O emprego de isótopos radioativos como traçadores em pesquisas biológicas é comum para muitos elementos nutrientes (*EPSTEIN, 1975*). Entretanto, isto não ocorre no caso do nitrogênio devido às curtas meias-vidas de seus isótopos radioativos.

Segundo *BROADBENT e CARLTON* (1978) os traçadores estáveis possuem inúmeras vantagens em pesquisas ambientais pois não causam danos por radiação podendo ser manuseados normalmente e não havendo limitação para o tempo de dura-



ção dos experimentos.

*BREMNER (1965b)* afirma que o comportamento do  $^{15}\text{N}$  em processos físicos, químicos e biológicos é idêntico ao do  $^{14}\text{N}$ , isto é, esses processos não devem ser influenciados pelas variações na abundância relativa dos isótopos de nitrogênio. Apesar de argumentos contrários, esta afirmativa permanece válida para muitos estudos com traçadores, podendo ocorrer apenas discriminações biológicas entre  $^{14}\text{N}$  e  $^{15}\text{N}$  sob condições naturais (*HAUCK e BREMNER, 1976*).

Há inúmeros trabalhos na literatura agrônômica nos quais o isótopo mais pesado de nitrogênio,  $^{15}\text{N}$ , tem sido empregado como traçador em conjunto com espectrometria de massa (*HAUCK e BYSTROM, 1970*). Pequenas variações na relação  $^{15}\text{N}:^{14}\text{N}$  também têm sido relatadas em vários compostos de interesse biológico e agrônômico. A existência destas pequenas diferenças tornou possível estender a metodologia de traçadores a estudos utilizando variações na abundância natural de nitrogênio.

Pesquisas relativas ao movimento e distribuição do fertilizante nitrogenado aplicado ao solo, muitas vezes são prejudicadas pela dificuldade de distinguir o nitrogênio aplicado do existente no solo. Atualmente os métodos mais precisos de estudar o comportamento do nitrogênio aplicado é através do uso de fertilizantes enriquecidos em  $^{15}\text{N}$  (*BROADBENT e*

e CARLTON, 1978).

Segundo WESTERMAN *et alii* (1972), estudos sobre a determinação da eficiência de utilização de fertilizantes nitrogenados vem se tornando um dos interesses primordiais das pesquisas agronômicas. Os primeiros estudos feitos preocuparam-se principalmente com a utilização do fertilizante pela planta, sem levar em conta os outros caminhos por ele seguidos. Recentemente, sua presença em água subterrânea e em cursos d'água tem dado ênfase à necessidade de dados mais completos sobre o balanço de N no sistema solo-planta.

O uso eficiente de um fertilizante pela planta depende da dose, localização, época de aplicação, fonte de nutriente e interação entre nutrientes (NEPTUNE e MURAOKA, 1978b).

A recuperação do fertilizante nitrogenado por culturas em experimentos de campo, segundo WESTERMAN *et alii* (1972), tem sido calculada por diferença entre as parcelas testemunhas e que recebem o fertilizante nitrogenado ou por regressão linear do N absorvido pela cultura e do N aplicado. Ambos os métodos são indiretos desde que não distinguem o fertilizante nitrogenado aplicado do nitrogênio do solo.

BROADBENT e CARLTON (1978) indicam que um dos meios de se determinar a eficiência de absorção do fertilizante é através da análise dos tecidos da planta durante o seu

ciclo vegetativo, determinando-se sua composição isotópica, através da qual a fração do nitrogênio total na planta proveniente do fertilizante aplicado pode ser determinada.

A eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado por uma cultura, aumenta com a taxa de fertilizante empregado até que se atinja a máxima produção, tendendo a cair rapidamente com aplicação de doses maiores (FRIED, 1978; BROADBENT e CARLTON, 1978; WESTERMAN et alii, 1972).

Trabalhos de CHO et alii (1967) mostram que o coeficiente de utilização do nitrogênio aumenta com a idade do milho, sendo no máximo de 30 - 40%.

Em nosso meio, NEPTUNE e MURAOKA (1978a) obtiveram resultados semelhantes em estudos de aplicação de uréia enriquecida com  $^{15}\text{N}$  em feijoeiro, variando a época e a dose de aplicação do fertilizante nitrogenado.

Em experimentos de campo WESTERMAN e KURTZ (1973) estudaram o priming effect de fertilizantes nitrogenados marcados com  $^{15}\text{N}$  sobre o nitrogênio do solo. Para esses autores o priming effect significa um aumento de mineralização do N do solo provocado pela adição do fertilizante nitrogenado. A causa deste efeito ainda é assunto de controvérsia (FRIED e BROESHART, 1974 e WESTERMAN e KURTZ, 1974) porém tem sido estudado extensivamente desde há muito tempo (BINGEMAN et

*alii*, 1953; ALLISON, 1955; BARTHOLOMEW, 1957 e BARROW, 1960):.

Finalmente, percebe-se que de fato a utilização de  $^{15}\text{N}$  como traçador de fertilizante nitrogenado, juntamente com informações sobre a dinâmica da água, tem se mostrado uma excelente ferramenta para o estudo do movimento do nitrogênio possibilitando uma melhor compreensão dos inúmeros processos e interações que ocorrem, com este elemento, no sistema solo-planta.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. Generalidades

A área escolhida para desenvolver o presente trabalho localiza-se junto ao Posto Agrometeorológico da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". O local se encontra a 580 m acima do nível do mar, com coordenadas geográficas de  $22^{\circ} 42' 30''$  S de latitude e  $47^{\circ} 38' 00''$  W de longitude.

As normais meteorológicas obtidas neste local são: precipitação pluviométrica =  $1247,1 \text{ mm.ano}^{-1}$ , temperatura média do ar =  $20,8^{\circ}\text{C}$ , umidade relativa do ar = 69%, velocidade do vento =  $2,5 \text{ m.sec}^{-1}$ , horas de insolação =  $6 \text{ horas.dia}^{-1}$  (CERVELLINI *et alii*, 1973 e VILLA NOVA *et alii*, 1973).

Segundo o levantamento da carta de solos de Piracicaba (RANZANI *et alii*, 1966) o solo desta área pertence ao grande grupo Terra Roxa Estruturada, Série Luiz de Queiroz,

classificado de acordo com a 7a. aproximação como Alfisol.

As principais características físicas de um perfil típico do solo em estudo determinadas por *REICHARDT e LIBARDI, (1974)* são mostradas na Tabela A.

A caracterização química do solo nas várias profundidades de interesse é apresentada na Tabela B.

O solo apresenta perfil relativamente homogêneo tendo seu lençol freático localizado a vários metros de profundidade. Este tipo de solo cobre aproximadamente 10% do Estado de São Paulo e tem sido utilizado no cultivo de várias culturas tais como cana-de-açúcar, café, milho e feijão. Sua superfície específica é de  $80 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  na superfície e  $125 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  a 165 cm de profundidade (*REICHARDT et alii, 1976*).

#### 4.2. Parcela Experimental

A parcela experimental possui uma área de  $100 \text{ m}^2$  (10m x 10m) na qual demarcou-se uma outra área central de 5m x 5m, onde foi aplicado fertilizante nitrogenado marcado. A Figura A ilustra a localização e distribuição dos diversos instrumentais utilizados, a saber:

##### 4.2.1. Unidades Extratoras de Solução do Solo

Nessa área foram colocados ao acaso 10 unidades

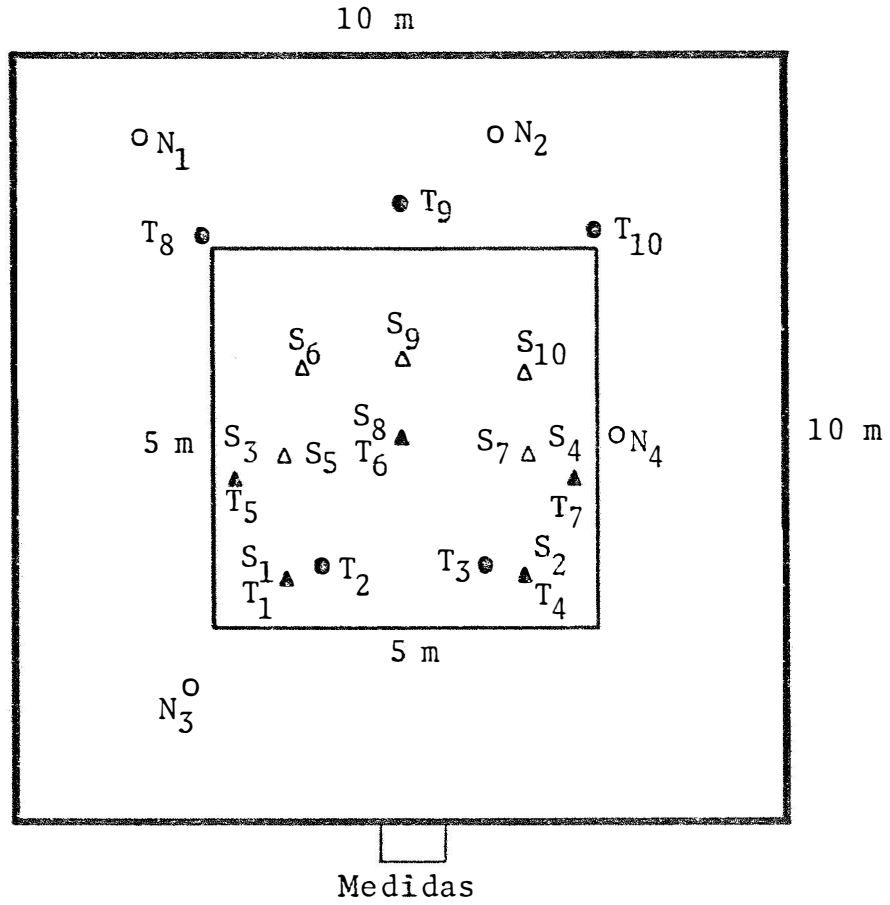
Tabela A - Caracterização Física do Solo

Profundidade (cm)	Densidade Global ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	Composição Granulométrica			Classe Textural
		% argila	% Limo	% Areia	
0 - 30	1,31	80	17	23	argila
30 - 60	1,35	63	23	14	argila
60 - 90	1,20	55	26	19	argila
90 - 120	1,18	52	26	22	argila
120 - 150	1,11	54	24	22	argila
150 - 180	1,14	49	28	23	argila

Tabela B - Caracterização Química do Solo

Profundidade (cm)	pH H <sub>2</sub> O	C Org %	N %	Trocáveis meq/100 g TFSA					V %		
				Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	S	Al <sup>3+</sup>		H <sup>+</sup>	T
0 - 15	5,6	0,76	0,08	2,80	0,64	0,16	3,60	0,0	2,30	5,90	61
15 - 45	6,2	0,61	-	2,99	0,86	0,45	4,30	-	-	-	-
45 - 75	6,4	0,60	-	2,05	0,56	0,27	2,88	-	-	-	-
75 - 105	6,5	0,46	-	2,76	0,64	0,27	3,67	-	-	-	-
105 - 135	6,4	0,37	-	2,65	0,56	0,14	3,35	-	-	-	-
135 - 165	6,4	0,28	-	2,49	0,53	0,08	3,10	-	-	-	-





- $N_i$  sonda de neutrons
- $T_i$  tensiômetros
- △  $S_i$  extratores
- ▲  $S_i+T_i$  extratores + tensiômetros

Figura A - Parcela Experimental (10m x 10m),  
mostrando área com  $^{15}\text{N}$  (5m x 5m).

extratoras de solução do solo, à profundidade de 120 cm. A unidade extratora consta essencialmente de uma cápsula porosa colada à extremidade de um tubo P.V.C. de 0,5 polegada de diâmetro e comprimento variável de acordo com a profundidade de solo na qual se deseja extrair a solução (REICHARDT *et alii*, 1977). Dentro deste tubo de P.V.C. encontram-se dois tubos de *nylon* de 3 mm de diâmetro, um deles partindo da extremidade da cápsula porosa até um recipiente coletor da solução extraída (tubo de ensaio), enquanto que o outro apenas penetra poucos centímetros no tubo de P.V.C. e é ligado a uma bomba de vácuo comum, capaz de produzir vácuo de até 750 milibares. Um esquema do sistema utilizado é mostrado na Figura B.

A solução do solo é obtida fazendo-se vácuo ao sistema todo. O vácuo obriga a solução a entrar na cápsula porosa vedando o tubo de *nylon* que está ligado ao tubo de ensaio o qual continua sob vácuo.

Desligando-se a bomba, a solução do solo dentro da cápsula fica sob pressão atmosférica, o que faz com que a solução suba até o tubo de ensaio por diferença de pressão.

O tempo de vácuo para coletar o volume de solução necessário (20 - 30 ml) para análise de íons ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ , etc.) é variável, dependendo da umidade do solo. Para solos com potenciais próximos de 0 atm, precisa-se de um tempo de vácuo de aproximadamente uma hora e para potenciais próximos de

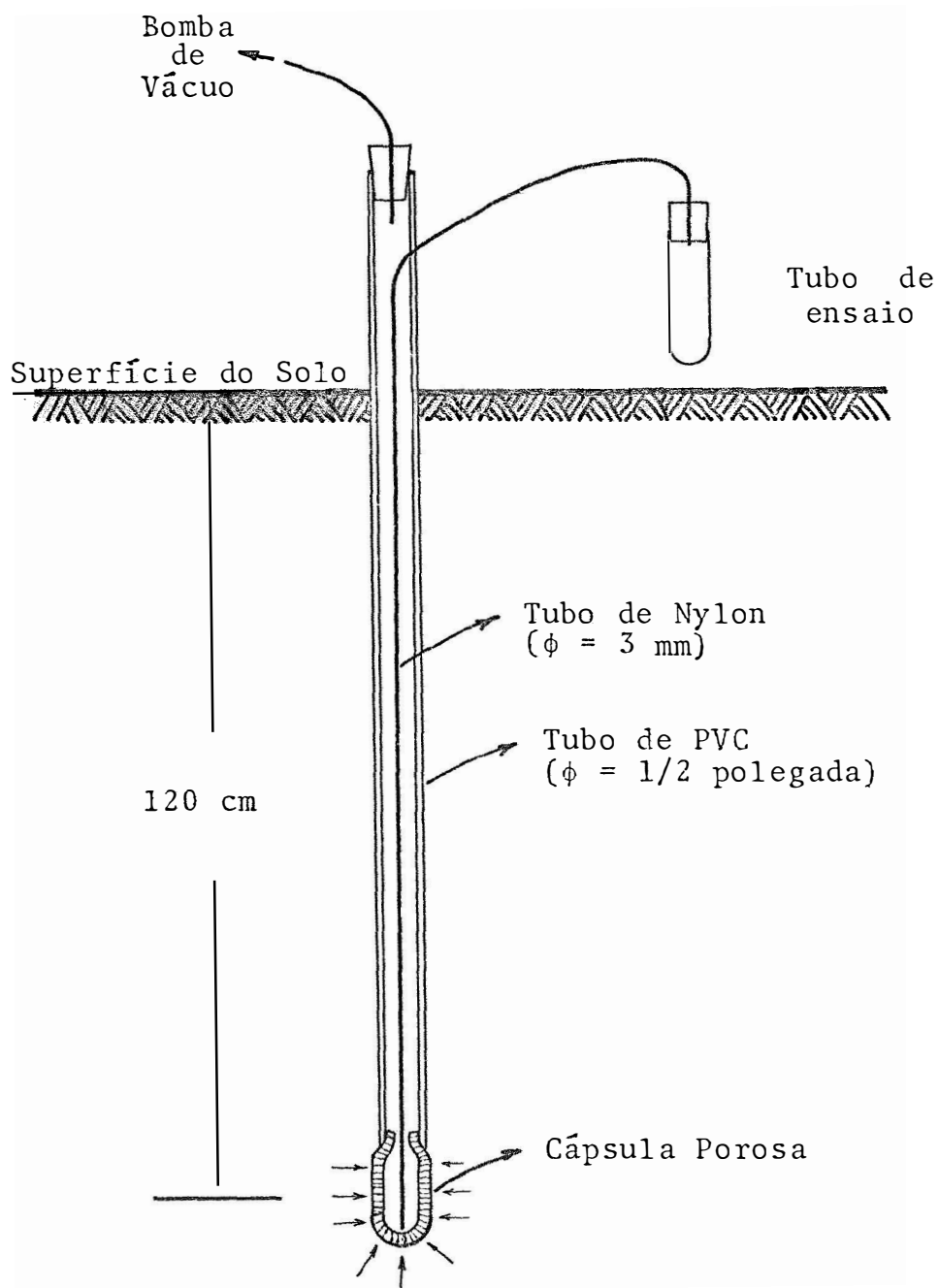


Figura B - Esquema da Unidade Extratora de Solução do Solo.

0,5 atm (limite), de aproximadamente 48 horas (REEVE e DOERING, 1965).

#### 4.2.2. Tensiômetros

Foram instalados vinte tensiômetros de manômetro de mercúrio em vidro, sendo dez à profundidade de 105 cm e dez à 135 cm. Os manômetros onde se realizaram as leituras dos tensiômetros foram colocados em uma única cuba de mercúrio a 45 cm da superfície do solo e acondicionados num abrigo fora da parcela.

#### 4.2.3. Tubos de Acesso para Sonda de Neutrons

Instalaram-se quatro tubos de alumínio com diâmetro interno de 30 mm e 34 mm de diâmetro externo para dar acesso à sonda de neutrons. O comprimento destes tubos era de 180 cm, dos quais 20 cm acima da superfície do solo, a fim de que se pudesse determinar a umidade do solo até 150 cm de profundidade.

#### 4.2.4. Sonda de Neutrons

Para se determinar a umidade do solo até 150 cm de profundidade foi utilizada uma sonda de neutrons fabricada pela *Nordisk Elektrisk Aparatfabrik, Copenhagen, Dinamarca*, modelo Baçc Deph Moisture/Densite Probe. As curvas de calibra-

ção deste aparelho para conversão de dados de contagens em dados de umidade para diferentes valores de densidade global do solo em estudo foram elaboradas por REICHARDT e LIBARDI (1974).

#### 4.3. Implantação da Cultura e Tratos Culturais

A cultura utilizada foi feijão comum *Phaseolus vulgaris* L., cultivar "rosinha" de hábito de crescimento indeterminado, com ciclo médio de 90 dias, sendo que 90% do seu sistema radicular explora a camada de solo 0 - 30 cm de profundidade.

Antes da semeadura o solo foi preparado da maneira convencional (aração + gradeação). Aplicou-se também herbicida Eptan na dose de 5 l/ha para controle da tiririca (*Cyperus rotundus* L.), erva daninha de ocorrência generalizada na área. Em seguida foram demarcados os sulcos de plantio. O espaçamento utilizado foi de 0,40 m entre linhas e 0,20 m entre plantas.

A semeadura foi feita manualmente em 09/03/77, colocando-se três sementes previamente tratadas com Benlate a cada 20 cm do sulco de 5 cm de profundidade, aproximadamente. O desbaste foi feito 15 dias após a germinação, deixando-se apenas duas plantas. A parcela experimental recebeu uma adubação equivalente a 100 Kg de NP/ha, na forma de sulfato de amô-

neo e superfosfato simples, aplicados 5 cm abaixo e ao lado das sementes. O fertilizante nitrogenado empregado na área central 5m x 5m foi sulfato de amônio enriquecido com 3,657 átomos % de  $^{15}\text{N}$ .

Durante o desenvolvimento da cultura, foram feitas três aplicações de Benlate + Folidol, em pulverização, 3,5 g + 1 cm<sup>3</sup> por litro de H<sub>2</sub>O para combate às moléstias e pragas, respectivamente.

O suprimento de água foram basicamente as chuvas, sendo realizadas irrigações adicionais simulando chuvas, quando necessário.

A colheita foi realizada manualmente em 08 de julho de 1977.

#### 4.4. Lixiviação de Nitratos

O fluxo de massa de nitrato,  $q(\text{NO}_3^-)$  (g/cm<sup>2</sup>.s) a 120 cm de profundidade no solo foi estimado pela equação:

$$q(\text{NO}_3^-) = q(\text{H}_2\text{O}) \cdot C_{\text{NO}_3^-} \dots\dots\dots (1)$$

onde  $q(\text{H}_2\text{O})$  é a densidade de fluxo de água (cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>.s) e  $C_{\text{NO}_3^-}$  é a concentração de nitrato (g/cm<sup>3</sup>).

A quantidade de nitrato lixiviada (L) num período de tempo  $t_2 - t_1$  foi determinada por:

$$L = \int_{t_1}^{t_2} q(\text{NO}_3^-) dt \dots\dots\dots (2)$$

#### 4.4.1. Fluxo de Água

O fluxo de água no solo em  $z = 120$  cm, no período de janeiro a junho de 1977, foi estimado diariamente por PAULA SOUZA (1978), na parcela em consideração, através da equação de Darcy aplicada ao movimento vertical da água no solo, na seguinte forma:

$$q_{120}(\text{H}_2\text{O}) = - K(\xi_{120}) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z}\right)_{120} \dots\dots\dots (3)$$

onde  $q_{120}(\text{H}_2\text{O})$  é a densidade de fluxo de água ( $\text{LT}^{-1}$ ) na profundidade  $z = 120$  cm;  $K(\xi_{120})$  é a condutividade hidráulica do solo ( $\text{LT}^{-1}$ ) em  $z = 120$  cm, a qual é função do potencial matricial (L) nesta profundidade,  $\xi_{120}$ ;  $\left(\frac{\partial \psi}{\partial z}\right)_{120}$  é o gradiente de potencial total da água na profundidade  $z = 120$  cm. O potencial total da água considerado,  $\psi$ , engloba os componentes matricial ( $\xi$ ) e gravitacional ( $z$ ). O sinal menos da equação indica que o

sentido do fluxo é inverso ao do gradiente.

A condutividade hidráulica como uma função do potencial matricial,  $K(\xi_{120})$ , foi obtida graficamente a partir da curva característica ( $\theta$  vs  $\xi$ ) e da curva  $K$  versus  $\theta$ . O gradiente de potencial  $(\partial\psi/\partial z)_{120}$  foi obtido a partir da média das leituras dos tensiômetros instalados em  $z = 105$  cm e  $z = 135$  cm. Detalhes destas determinações podem ser vistos no Apêndice.

#### 4.4.2. Concentração de Nitrato

A determinação da concentração de nitratos foi feita utilizando-se um sistema de eletrodos seletivos de íons em fluxo contínuo (*RUZICKA et alii, 1976*).

Este método utiliza de 0,3 a 0,4 ml da amostra que é injetada em fluxo contínuo, constituído de uma solução  $5 \cdot 10^{-3}$ M de  $K_2HPO_4$  e  $5 \cdot 10^{-3}$ M de  $KH_2PO_4$ . A função desta solução é tamponizar o meio a aproximadamente  $pH = 7$ , fixar a força iônica e manter melhores condições de temperatura. A amostra é, então, transportada aos eletrodos de nitrato e de referência conforme é ilustrado na Figura C.

A resposta dos eletrodos é registrada graficamente, obtendo-se os resultados em forma de picos cujas alturas são comparadas com as alturas de padrões de concentração



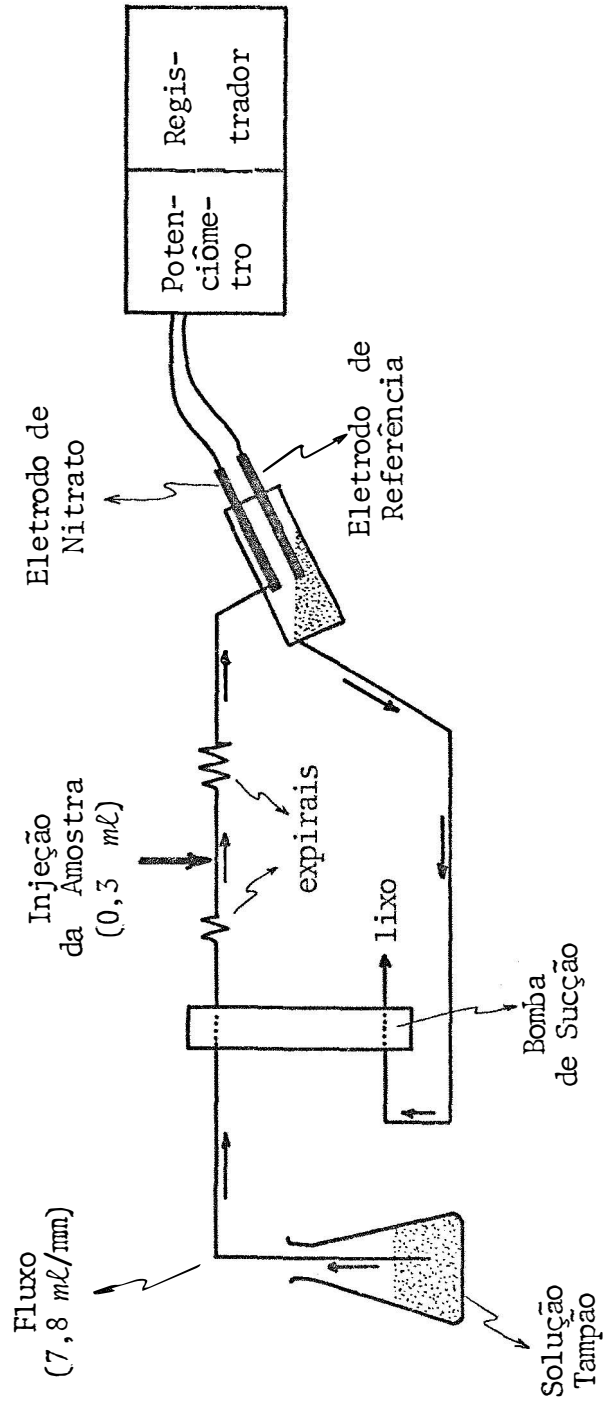


Figura C - Esquema do Eletrodo Seletivo de Nitrato em Fluxo Contínuo

de  $\text{NO}_3^-$  conhecida.

O método de fluxo contínuo mostrou-se conveniente para estudos de solução do solo por utilizar pequena quantidade de amostra e ter uma alta sensibilidade (da ordem de  $10^{-2}$  a  $10^{-4}$  M de  $\text{NO}_3^-$ ).

#### 4.4.3. Estimativa da Porcentagem de Nitrato na Solução do Solo Proveniente do Fertilizante

A porcentagem de  $\text{NO}_3^-$  na solução do solo proveniente do fertilizante (PNSPF) foi calculada pela equação:

$$\text{PNSPF} = \frac{\text{Átomos \% } ^{15}\text{N excessos da solução do solo}}{\text{Átomos \% } ^{15}\text{N excessos do fertilizante}} \times 100 \quad (4)$$

sendo Átomos %  $^{15}\text{N}$  em excesso = Átomos %  $^{15}\text{N}$  amostra - Átomos %  $^{15}\text{N}$  natural.

A determinação de átomos % de  $^{15}\text{N}$  foi feita por espectrometria de massa, seguindo-se o procedimento indicado por BREMNER (1965b), compreendendo as seguintes etapas:

a) conversão do nitrato (N -  $\text{NO}_3^-$ ) à amônia (N -  $\text{NH}_3$ )

O  $\text{NO}_3^-$  foi convertido a amônia por destilação com óxido de magnésio e liga de Devarda, utilizando-se um sistema destilador macro-Kjeldahl modificado por HOSKINS (1944)

recebendo o destilado em solução indicadora de ácido bórico a 2% (BREMNER e EDWARDS, 1965). Utilizou-se este procedimento diretamente nas amostras de solução do solo devido ao fato de testes preliminares indicarem ausência de amônia. Após a destilação de cada amostra, destilou-se um pequeno volume (15 a 20 ml) de etanol, eliminando possível contaminação. O destilado foi em seguida acidificado com 2 a 3 gotas de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , e concentrado por evaporação a  $60^\circ\text{C}$ .

b) conversão da amônia (N -  $\text{NH}_3$ ) a  $\text{N}_2$

A conversão de amônia a  $\text{N}_2$  para análise em espectrometria de massa consiste no tratamento da amostra com hipobromito de sódio em completa ausência de ar. A amostra foi então colocada num dos braços de um tubo de Rittenberg contendo no outro solução de hipobromito. Em seguida estabelece-se alto vácuo em seu interior, após o qual as soluções são misturadas ocorrendo oxidação da amônia conforme a reação abaixo:



Antes do  $\text{N}_2$  ser introduzido no espectrômetro de massa, o tubo de Rittenberg é submerso num *trap* contendo  $\text{N}_2$  líquido para congelar vapor d'água e gases provenientes da oxidação do hipobromito.

c) determinação da composição isotópica do N<sub>2</sub>

A análise isotópica do N<sub>2</sub> foi feita utilizando-se um espectrômetro de massa Atlas - Varian, modelo CH 4. Os resultados foram obtidos num diagrama de picos correspondentes às correntes dos íons de massas:

28	( <sup>14</sup> N <sup>14</sup> N) <sup>+</sup>
29	( <sup>15</sup> N <sup>14</sup> N) <sup>+</sup>
30	( <sup>15</sup> N <sup>15</sup> N) <sup>+</sup>
32	( <sup>16</sup> O <sup>16</sup> O) <sup>+</sup>

A partir das intensidades dos picos (I = altura do pico em milímetros x sensibilidade em volts) foram calculadas as concentrações em átomos % de <sup>15</sup>N pelas equações:

$$A \% \text{ } ^{15}\text{N} = \frac{I_{29} + 2 I_{30}}{2 I_{28} + 2 I_{29} + 2 I_{30}} \times 100 \quad \dots\dots (5)$$

$$A \% \text{ } ^{15}\text{N} = \frac{100}{2 \frac{(I_{28})_{\text{AM+CONT}} - \frac{(I_{28})_{\text{AR}}}{(I_{32})_{\text{AR}}} \times (I_{32})_{\text{CONT}}}{(I_{29})_{\text{AM+CONT}} - \frac{(I_{29})_{\text{AR}}}{(I_{32})_{\text{AR}}} \times (I_{32})_{\text{CONT}}} + 1} \quad \dots\dots\dots (6)$$

sendo a equação (6) utilizada para correção da contaminação da amostra pelo ar atmosférico.

#### 4.5. Eficiência de Utilização do Fertilizante Nitrogenado pela Cultura (EUFN)

Este parâmetro foi determinado em quatro estágios de desenvolvimento da cultura (20, 40, 60 e 90 dias) em amostras constituídas por quatro plantas tomadas ao acaso dentro da área com fertilizante marcado. As plantas foram inicialmente lavadas com água comum, depois com solução 0,005 N de HCl e, finalmente, com água deionizada. Em seguida foram levadas a secar em estufa a 70°C até peso constante. Após a pesagem, as plantas foram moídas em peneira 60.

Na matéria seca assim tratada, determinou-se o N total (*BREMNER, 1965a*) utilizando um aparelho Auto Analyser II Technicon.

Para a determinação de átomos % de  $^{15}\text{N}$  na planta, amostras de 100 mg de M.S. foram tratadas segundo o procedimento de Dumas (*BREMNER, 1965b*) para a conversão do N da planta em  $\text{N}_2$ .

Neste método foram utilizados tubos de vidro de 5 mm de diâmetro e 17 cm de comprimento, dentro dos quais foram colocadas as amostras de planta, 1,5 g de  $\text{CaO}$  e 1,5 g de  $\text{CuO}$ . Em seguida foram fechados a alto vácuo ( $5 \cdot 10^{-3}$  mm Hg) e, após a mistura dos reagentes, levados à calcinação numa mufla, aumentando-se gradualmente a temperatura até 550°C a qual

foi mantida por 8 horas.

As amostras assim preparadas foram analisadas em sua composição isotópica.

A eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado (EUFN) pela cultura foi obtida por:

$$E U F N = \frac{P N P P F \times N T P}{Q N A} \dots\dots\dots (7)$$

onde: PNPPF = porcentagem de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante;

NTP = nitrogênio total na planta (Kg/ha);

QNA = quantidade de nitrogênio aplicado (Kg/ha),

sendo:

$$P N P P F = \frac{\text{Átomos } \% \text{ } ^{15}\text{N em excesso na planta}}{\text{Átomos } \% \text{ } ^{15}\text{N em excesso no fertilizante}} \times 100 \quad (8)$$

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Fluxo de Água

Os valores médios diários de fluxo de água, potencial matricial ( $\xi$ ), condutividade hidráulica ( $K$ ) e gradiente de potencial ( $\partial\psi/\partial z$ ), à profundidade de 120 cm, no período de janeiro a junho de 1977, são encontrados em *PAULA SOUZA (1978)*. Em seu trabalho, o autor discute com detalhe a determinação destes parâmetros e faz um estudo completo de sua variação diária, mês por mês, juntamente com os dados de precipitação e armazenagem de água pelo solo até a profundidade de 120 cm. Observando os resultados de fluxo por ele obtidos chamou-nos a atenção o mês de janeiro onde a drenagem profunda mensal (= 35,12 cm) foi maior do que a precipitação durante este mês (= 32,27 cm). Este fato o autor justifica como sendo devido à elevada precipitação do mês anterior (dezembro de 1976) parte da qual ficou armazenada no solo em dezembro e só foi drenada em janeiro, aumentando assim, a drenagem profunda deste mês.

Esta explicação, embora satisfatória, não é convincente, principalmente se notarmos que no dia 07/01 o valor do fluxo foi de aproximadamente 12 cm/dia, isto é  $\approx 35\%$  da drenagem profunda total do mês. Este alto valor de fluxo em apenas um dia também nos chamou a atenção e nos levou a procurar os dados originais de leitura dos tensiômetros. Observando estas leituras, verificamos que no dia 07/01, à profundidade de 135 cm, houve um decréscimo acentuado nas alturas das colunas de mercúrio, o qual não se manifestou para a profundidade de 105 cm. Isto nos levou a concluir que provavelmente deve ter havido algum engano de leitura neste dia em  $z = 135$  cm. Se não considerarmos a leitura do dia 07/01 em  $z = 135$  cm e seguirmos a tendência da curva, os valores de  $\xi$  que se obtêm para os dias 05, 06, 07, 08 e 09/01 são 83, 80, 78, 77 e 76 cm, respectivamente. Com estes valores corrigidos de  $\xi$ , os novos valores de fluxo correspondentes foram 0,38; 0,40; 0,42; 0,56 0,71 cm/dia e o novo valor mensal da drenagem profunda foi de 11,54 cm. Estes resultados são mais coerentes do que os obtidos por *PAULA SOUZA (1978)* e foram os utilizados para o cálculo do fluxo de nitrato em  $z = 120$  cm.

Através do mesmo procedimento de *PAULA SOUZA (1978)*, obtivemos os valores de drenagem profunda para o período julho-dezembro de 1977, os quais, juntamente com os obtidos para o primeiro semestre de 1977, encontram-se na Tabela 1.



Tabela 1 - Valores mensais de precipitação, irrigação e drenagem profunda durante o ano de 1977.

Mês	Precipitação (mm)	Irrigação (mm)	Drenagem Profunda (mm)
JAN	322,7	0	115,4
FEV	37,3	0	23,4
MAR	199,8	40,3	9,0
ABR	107,7	8,8	27,2
MAI	0,9	49,9	3,2
JUN	46,8	0	0,6
JUL	6,7	0	0,9
AGO	19,7	0	0,2
SET	91,4	0	0,6
OUT	66,7	0	1,7
NOV	134,8	0	2,5
DEZ	238,8	0	25,5
Total Anual	1.273,3	99,0	210,2

Nesta Tabela encontram-se também dados de precipitação e irrigação.

A observação desses dados nos mostra uma grande variação na drenagem profunda a 120 cm de profundidade no período em estudo. Como era de se esperar, os maiores valores de drenagem foram precedidos pelas maiores precipitações, caso dos meses de janeiro, fevereiro, abril e dezembro. Após a colheita (mês de junho), observa-se um período de estiagem até o mês de setembro, mantendo-se a drenagem profunda praticamente constante e em valores bastante baixos.

Como nosso interesse se concentra mais no período da cultura, a Figura 1 mostra a variação do fluxo de água diário durante este período, juntamente com os dados de concentração de nitrato, fluxo de nitrato, precipitação e irrigação. Por esta figura nota-se a presença de dois picos de fluxo de água no período, um no início de abril e outro aos arredores do dia 10 deste mesmo mês. Estes picos só podem ser devidos às altas precipitações ocorridas de 20 a 24/03 e de 29/03 a 09/04, respectivamente.

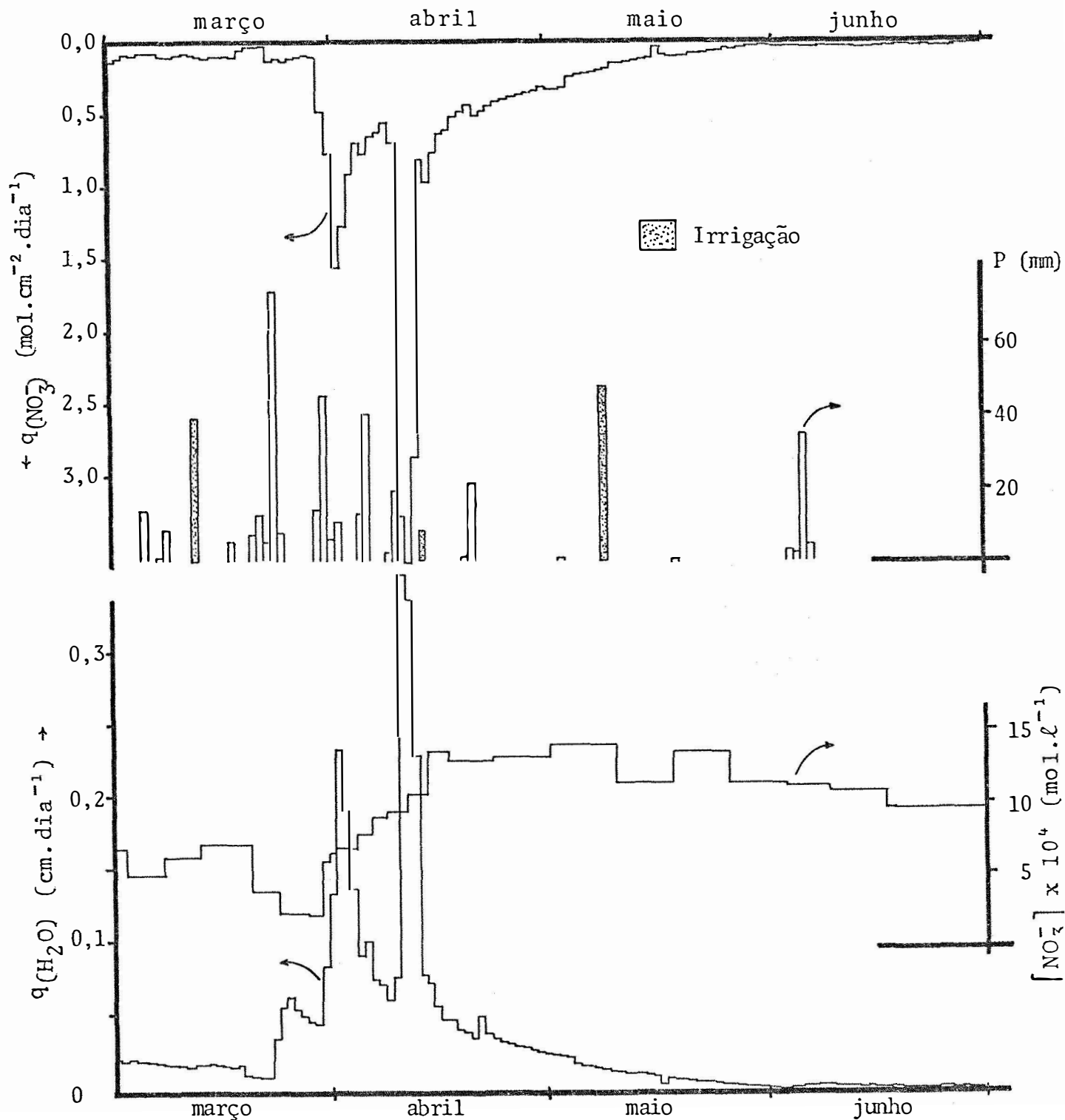


Figura 1 - Variação do fluxo de água ( $q_{\text{H}_2\text{O}}$ ), concentração de nitrato ( $[\text{NO}_3^-]$ ), fluxo de nitrato ( $q_{\text{NO}_3^-}$ ) e precipitação (P) durante o período da cultura (março a junho de 1977).

## 5.2. Concentração de Nitrato

Dados de concentração de nitrato na solução do solo obtidos de 10 unidades extratoras instaladas a 120 cm de profundidade são apresentados na Tabela 2. As concentrações de nitrato determinadas potenciométricamente utilizando-se eletrodos seletivos de íons em fluxo contínuo (ver item 4.4.2), foram obtidas durante aproximadamente o período de um ano.

Observando-se os dados médios das 10 unidades extratoras (Tabela 2) percebe-se uma tendência em sua variação, ou seja, valores menores de concentração no período precedente à instalação da cultura (janeiro e fevereiro), um aumento gradativo no seu início, passando por um máximo nos meses de abril e maio, e decrescendo de junho até dezembro, evidenciando um provável pulso de nitrogênio no perfil do solo.

A Figura 1 mostra a variação de concentração de nitrato durante o período da cultura. Como se pode notar nesta figura, os valores de concentração de nitrato foram considerados como média do período entre uma extração e outra.

Observando com mais detalhe a Figura 1, verificamos que no mês de março os valores das concentrações de nitrato são baixos, indicando uma concentração natural do solo, isto é, ainda não houve contribuição do fertilizante nitrogenado aplicado no plantio do feijão. As variações observadas nesse período são provavelmente devidas às pequenas precipitações ocorridas e irrigações efetuadas.

Tabela 2 - Concentração de Nitrato na Solução do Solo de 10 unidades extratoras colocadas na área de 5m x 5m a 120 cm de profundidade.

Data	Dias	$\text{NO}_3^- \text{ Mol. } \ell^{-1} \times 10^4$										$\Sigma$	$\bar{x}$
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
07/01/77	0	4,2	2,2	2,1	4,2	6,2	2,3	1,8	1,9	2,7	1,1	28,7	2,87
13/01/77	6	3,1	1,7	2,1	4,2	8,1	3,0	2,7	3,0	4,4	2,4	34,7	3,47
18/02/77	42	-	7,0	4,2	-	5,8	5,2	4,8	7,0	-	4,8	38,8	5,54
01/03/77	53	14,0	3,8	4,3	7,1	10,0	2,3	10,0	3,4	5,4	4,7	65,0	6,5
03/03/77	55	8,6	3,5	3,0	6,8	4,0	4,2	3,0	3,8	5,4	4,2	46,5	4,65
12/03/77	64	7,4	3,8	4,2	7,0	6,2	6,2	4,2	5,4	7,4	7,4	59,2	5,92
16/03/77	68	10,5	5,2	5,8	11,0	6,4	5,8	4,0	5,2	8,4	5,8	68,1	6,81
22/03/77	74	7,0	3,4	3,2	5,6	3,6	2,7	2,5	2,7	3,8	2,3	36,8	3,68
25/03/77	77	3,8	1,4	1,9	2,7	1,9	1,8	1,7	1,4	2,4	1,5	20,5	2,05
29/03/77	79	5,0	1,3	1,3	2,4	1,6	1,7	2,1	1,3	2,0	1,4	20,01	2,01
30/03/77	80	11,8	3,3	4,1	6,8	6,9	2,1	8,8	3,5	5,0	5,2	57,5	5,75
31/03/77	81	11,0	2,9	4,1	6,4	7,0	2,5	15,0	3,7	5,2	4,6	62,4	6,24
01/04/77	82	14,5	3,4	4,1	7,8	8,2	2,4	10,8	3,5	6,1	5,4	66,2	6,62
05/04/77	87	11,5	5,0	4,8	8,2	16,0	2,6	11,5	4,2	7,8	5,2	76,8	7,68
06/04/77	88	15,0	6,2	5,2	8,1	19,5	2,4	12,3	5,1	8,1	6,2	88,1	8,81
08/04/77	90	16,0	7,8	5,6	9,0	20,0	2,6	12,0	5,1	7,8	6,2	92,1	9,21
12/04/77	94	18,0	7,9	7,2	8,7	22,5	2,0	14,0	5,5	10,5	6,8	103,1	10,31
14/04/77	96	25,0	10,0	9,0	9,7	29,0	3,4	18,5	6,7	13,5	9,2	134,0	13,4
19/04/77	101	21,0	10,0	10,3	11,8	26,5	4,0	16,1	5,4	12,9	10,2	128,2	12,82
26/04/77	108	21,0	9,5	12,8	12,8	27,5	4,2	13,5	6,1	12,8	9,5	129,7	12,97
03/05/77	115	17,5	11,0	14,5	14,0	33,0	3,7	16,0	6,7	12,0	11,0	139,4	13,94
12/05/77	124	13,5	10,0	13,5	12,0	26,0	4,4	11,0	4,4	10,0	8,4	113,2	11,32
19/05/77	131	13,5	10,0	16,0	15,0	33,0	5,7	15,0	4,4	11,3	10,5	134,4	13,44
28/05/77	140	14,0	10,5	13,0	12,0	25,0	3,9	12,0	5,2	9,6	8,0	113,2	11,32
03/06/77	146	12,5	10,0	12,0	12,0	26,0	4,7	12,0	5,2	9,8	7,2	111,4	11,14
10/06/77	153	13,5	10,0	11,5	11,5	23,0	4,2	11,0	4,7	9,0	8,4	106,8	10,68
18/06/77	161	11,0	8,8	10,5	9,8	19,5	4,1	9,8	4,1	9,0	8,4	95,0	9,5
17/11/77	313	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56,5	5,65
06/12/77	332	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	92,5	9,25
26/12/77	352	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	76,3	7,63

nesse período são provavelmente devidas às pequenas precipitações ocorridas e irrigações efetuadas.

No mês de abril verifica-se logo a partir dos primeiros dias um aumento gradativo na concentração de nitrato até o fim do período, mostrando uma contribuição do nitrogênio aplicado arrastado pelas intensas precipitações ocorridas no mês de março.

No início do mês de maio observa-se que a concentração de nitrato atinge seu valor máximo. No fim desse período percebe-se ligeira queda nos valores de concentração. Isto indica, provavelmente, a passagem de um pulso de nitrogênio na profundidade em estudo.

Durante o mês de junho permanece a mesma tendência de declínio nos valores de concentração.

### 5.3. Fluxo de Nitrato

Os valores mensais de quantidade de nitrato e nitrogênio por unidade de área durante o ano de 1977 encontram-se na Tabela 3. Estes resultados, para o período da cultura, foram obtidos por meio da equação (2) através do cálculo da área sob a curva  $q_{(NO_3^-)}$  versus  $t$  (Figura 1). Nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, como houve no máximo a-

Tabela 3 - Valores da vazão de nitrato e nitrogênio por mês, em z = 120 cm, durante o ano de 1977.

Mês	Vazão de $\text{NO}_3^-$ (moles/ha)	Vazão de N (Kg / ha)
JAN	365,818	5,12
FEV	129,636	1,81
MAR	39,876	0,56
ABR	265,059	3,71
MAI	40,411	0,56
JUN	6,672	0,09
JUL	....	....
AGO	....	....
SET	....	....
OUT	....	....
NOV	14,125	0,20
DEZ	215,220	3,01
Total Anual	1.076,817	15,06

penas duas extrações de solução do solo por mês, o cálculo da quantidade de nitrato mensal por unidade de área foi feito multiplicando-se o valor da drenagem profunda do mês (Tabela 1) pela concentração de  $\text{NO}_3^-$  média do mês. No período de julho a outubro, não houve coleta de solução do solo por se tratar de um período no qual os valores de drenagem foram extremamente baixos (Tabela 1), sendo portanto desprezíveis os valores de  $q(\text{NO}_3^-)$ .

A observação dos dados de fluxo de nitrato na Figura 1, nos mostra que sua variação seguiu a variação do fluxo de água. Isto é facilmente explicado pelo fato do fluxo de nitrato ter sido determinado pela equação (1) e a concentração de nitrato também ter seguido, aproximadamente, a mesma tendência de variação do fluxo de água.

Considerando negligíveis os valores de vazão de nitrato para os meses de julho, agosto, setembro e outubro, obtém-se um valor anual de 1076,817 moles de  $\text{NO}_3^-$ /ha ou, aproximadamente, 15 Kg N/ha, isto é, durante o ano de 1977 passaram, à profundidade de 120 cm, numa área de 1 ha do solo em estudo, praticamente 15 Kg de nitrogênio.



#### 5.4. Nitrato na Solução do Solo Proveniente do Fertilizante

Na Tabela 4 encontram-se os dados de Átomos% de  $^{15}\text{N}$  e PNSPF. Como se pode notar nesta tabela, foram analisadas um total de 16 amostras, 13 das quais correspondentes ao período da cultura (março-junho). Pode-se notar também que as amostras 1, 2, 3 e 4 são amostras compostas de extrações de diversos dias. Isto foi necessário a fim de que se obtivesse uma amostra adequada para análise da concentração de  $^{15}\text{N}$ .

Os valores de Átomos % de  $^{15}\text{N}$  foram calculados por meio da equação (6) e os de PNSPF através da equação (3). Para o caso presente, Átomos % de  $^{15}\text{N}$  em excesso no fertilizante = 3,289 e Átomos % de  $^{15}\text{N}$  natural = 0,368.

A partir dos valores de vazão de nitrato por mês (Tabela 3) e dos valores médios mensais de PNSPF (média dos valores da Tabela 4), obtêm-se facilmente os valores de vazão de nitrato ou nitrogênio por mês proveniente do fertilizante, os quais se encontram na Tabela 5.

Para o caso específico do mês de março, a determinação da vazão de nitrato proveniente do fertilizante foi feita, obviamente, considerando o valor da vazão de nitrato para o intervalo 16-31/03 (= 25,500 moles/ha) e não para o mês todo (= 39,876 moles/ha, Tabela 3).

Tabela 4 - Dados de átomos %  $^{15}\text{N}$  e de porcentagem de nitrato na solução do solo proveniente do fertilizante (PNSPF) aplicado no solo em março de 1977.

Amostra	Data de Extração	Átomos % $^{15}\text{N}$	P N S P F
1	16, 22, 23, 25/03	0,4140	1,40
2	29, 30, 31/03	0,6142	7,48
3	05, 06, 08/04	0,7948	12,98
4	12, 14/04	1,1258	23,05
5	19/04	1,0968	22,17
6	26,04	0,9796	18,61
7	03/05	0,9455	17,57
8	12/05	0,8569	14,87
9	19/05	0,9494	17,66
10	28/05	1,1100	22,56
11	03/06	1,1344	23,29
12	10/06	0,6546	8,73
13	18/06	1,0662	21,22
14	17/11	0,8246	13,89
15	06/12	0,8800	15,57
16	26,12	0,8820	15,63

Tabela 5 - Valores da vazão de nitrato e nitrogênio por mês, proveniente do fertilizante (em z = 120 cm) aplicado no solo em março de 1977.

Mês	Vazão de $\text{NO}_3^-$ Proveniente do Fertilizante (moles/ha)	Vazão de N Proveniente do Fertilizante (Kg/ha)
JAN	-	-
FEV	-	-
MAR	1,32	0,018
ABR	50,89	0,712
MAI	7,34	0,103
JUN	1,18	0,016
JUL	.....	.....
AGO	.....	.....
SET	.....	.....
OUT	.....	.....
NOV	1,96	0,027
DEZ	33,57	0,470
Total	96,26	1,346

Pelos dados da Tabela 5 vemos que dos 100 Kg N/ha aplicados por ocasião do plantio de feijão em 09/03/77, 1,35 Kg/ha passaram à profundidade de 120 cm até o final do ano.

### 5.5. Nitrogênio na Planta

A Tabela 6 apresenta os dados de matéria seca, átomos %  $^{15}\text{N}$ , nitrogênio total na planta (NTP), porcentagem de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (PNPPF) e eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado (EUFN), em diferentes fases de desenvolvimento da cultura de feijão: aos 20, 40 e 60 dias após a germinação e na colheita.

Como se pode notar por esta Tabela, durante todo o período da cultura, a parcela que recebeu fertilizante (= parcela experimental) teve uma quantidade de matéria seca muito maior do que a testemunha (= bordadura). Assim é que na primeira amostragem obteve-se  $\approx 3$  vezes mais matéria seca na parcela experimental, enquanto que, aos 40 dias após a germinação a testemunha tinha uma quantidade de matéria seca  $\approx 7$  vezes menor. Aos 60 dias após a germinação e na colheita resultaram valores de matéria seca  $\approx 4,5$  e  $\approx 4$  vezes maiores na parcela fertilizada em relação à testemunha, respectivamente. Estes resultados mostram que a cultura de feijão, na área em estudo, respondeu bem à adubação, visto que a produção (em grãos) com adubação foi de 2025 Kg/ha e sem adubação (= testemunha) de apenas 575 Kg/ha. Deve-se salientar que o solo da bordadura ( $\approx 200 \text{ m}^2$  ao redor da parcela experimental) possuía a mesma fertilidade (Tabela B) que o solo da parcela antes da instalação do experimento.

Tabela 6 - Dados de Matéria Seca (M.S.), Átomos % de  $^{15}\text{N}$ , Nitrogênio Total na Planta (NTP), Porcentagem de Nitrogênio na Planta Proveniente do Fertilizante (PNPPF) e Eficiência de Utilização do Fertilizante Nitrogenado (EUFN) pela cultura do feijão aos 20, 40 e 60 dias na colheita.

Determinação	1a. Amostragem (28/03/77)		2a. Amostragem (15/04/77)		3a. Amostragem (06/05/77)		Colheita 08/06/77			
	100 NP Kg/ha	Testemunha	100 NP Kg/ha	Testemunha	100 NP Kg/ha	Testemunha	Grão			
							100 NP Kg/ha	Testemunha		
NS	0,77	0,27	4,08	0,59	11,5	2,58	4,32	1,17	8,10	2,30
-kg/ha	192,50	67,50	1020,00	147,5	287,5	645,00	1080,00	292,5	2025,0	575
Átomos % $^{15}\text{N}$ na planta	2,629	0,368	2,513	0,368	1,592	0,368	1,582	0,368	1,574	0,368
N T F	5,01	4,23	4,33	3,92	2,84	2,91	0,69	0,66	3,64	3,53
kg/ha	9,64	2,85	44,17	5,78	81,65	18,77	7,45	1,93	73,71	20,30
PNPPF	58,74	-	65,22	-	37,21	-	36,91	-	36,68	-
EUFN (%)	6,62	-	28,81	-	30,38	-	2,75	-	27,04	-

Os dados de porcentagem de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (obtidos por meio da equação 8) e nitrogênio total foram utilizados para determinar a eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado através da equação (7). A Figura 2 mostra a variação da eficiência de utilização ao longo do período da cultura, juntamente com os dados de nitrogênio total e porcentagem de nitrogênio proveniente do fertilizante.

Observa-se claramente nesta figura que o nitrogênio total da planta aumentou sensivelmente da primeira para a terceira amostragem, permanecendo a partir daí, praticamente constante até a colheita, enquanto que a porcentagem de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante teve um comportamento oposto, isto é, decresceu da primeira para a terceira amostragem permanecendo também constante a partir daí até a colheita.

Observando com mais detalhe a Figura 2, verifica-se que no primeiro estágio de desenvolvimento da cultura (até os 20 dias após a germinação) houve uma alta utilização do fertilizante nitrogenado porém com uma baixa eficiência devido ao pequeno porte da cultura. No período dos 20 aos 40 dias após a germinação houve um aumento sensível na eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado apesar de sua utilização ter decrescido um pouco. Isto se deve ao fato da quantidade de nitrogênio total ter apresentado um grande aumento durante este período, devido ao desenvolvimento da cultura.

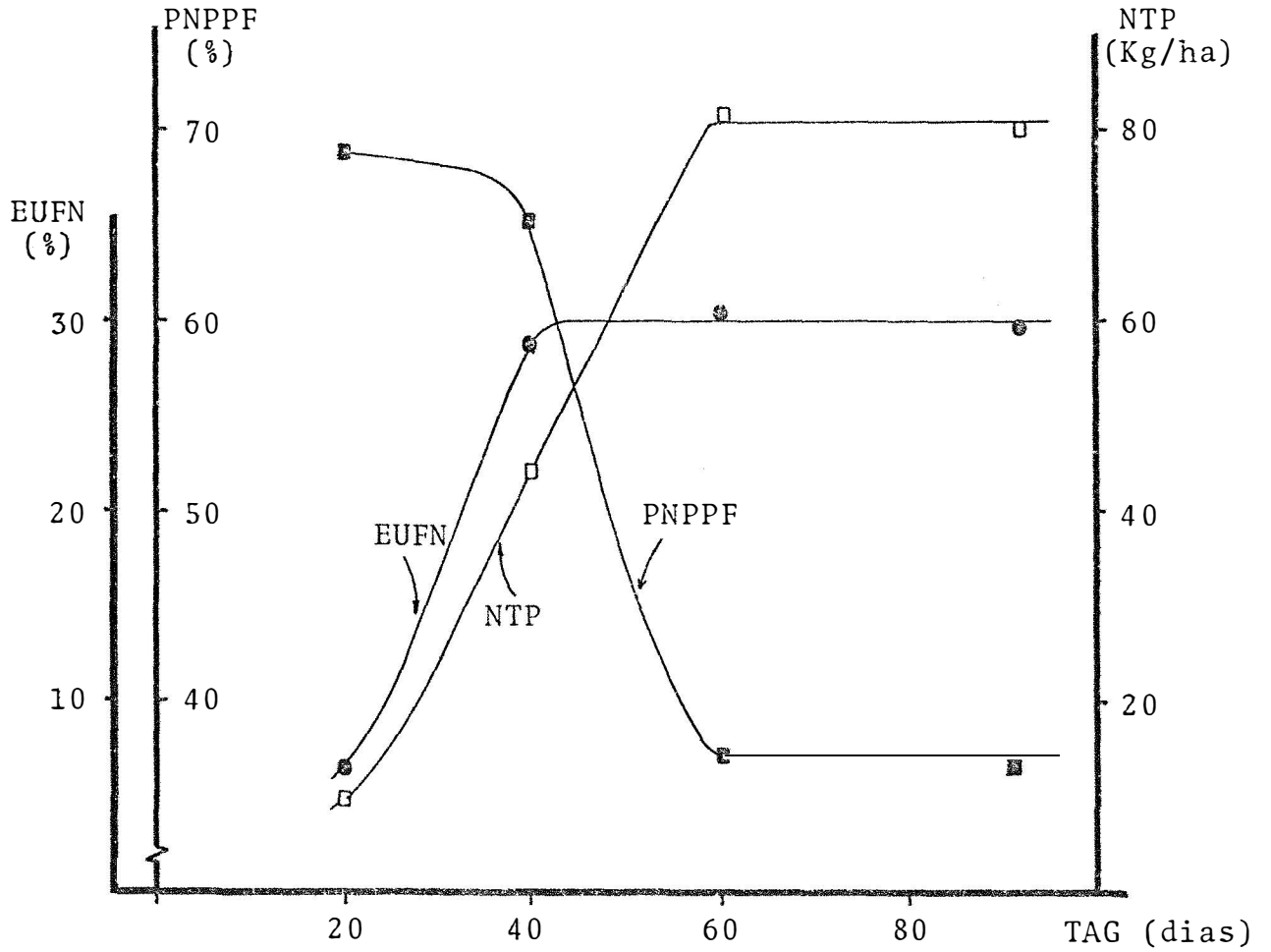


Figura 2 - Gráfico da Porcentagem de Nitrogênio na Planta Proveniente do Fertilizante (PNPPF), Nitrogênio Total na Planta (NTP) e Eficiência de Utilização do Fertilizante Nitrogenado (EUFN), em função do Tempo Após a Germinação (TAG).



A partir do 40º dia após a germinação, a eficiência de utilização permaneceu praticamente constante até a colheita, apesar que do 40º para o 60º dia a utilização do fertilizante nitrogenado teve um decréscimo bastante acentuado. Este fato também é devido ao aumento na quantidade de nitrogênio total para o período 40-60 dias. Evidentemente o aumento de nitrogênio total na planta do 20º ao 60º dia após a germinação é resultado da maior exploração de volume de solo devido ao desenvolvimento radicular da cultura.

Como a partir do 40º dia a eficiência de utilização praticamente não variou e nota-se um sensível acréscimo no nitrogênio total (Figura 2) é indicação de que a planta está iniciando a absorver mais nitrogênio do solo do que do fertilizante. Isto pode ser melhor visualizado na Figura 3, onde se mostra a variação da contribuição do solo e do fertilizante para o nitrogênio da planta, durante o período da cultura. O nitrogênio total na planta proveniente do fertilizante (NTPPF) foi calculado por

$$N T P P F = \frac{P N P P F}{100} \times N T P$$

enquanto que o nitrogênio total na planta proveniente do solo (NTPPS) foi calculado por diferença, isto é,

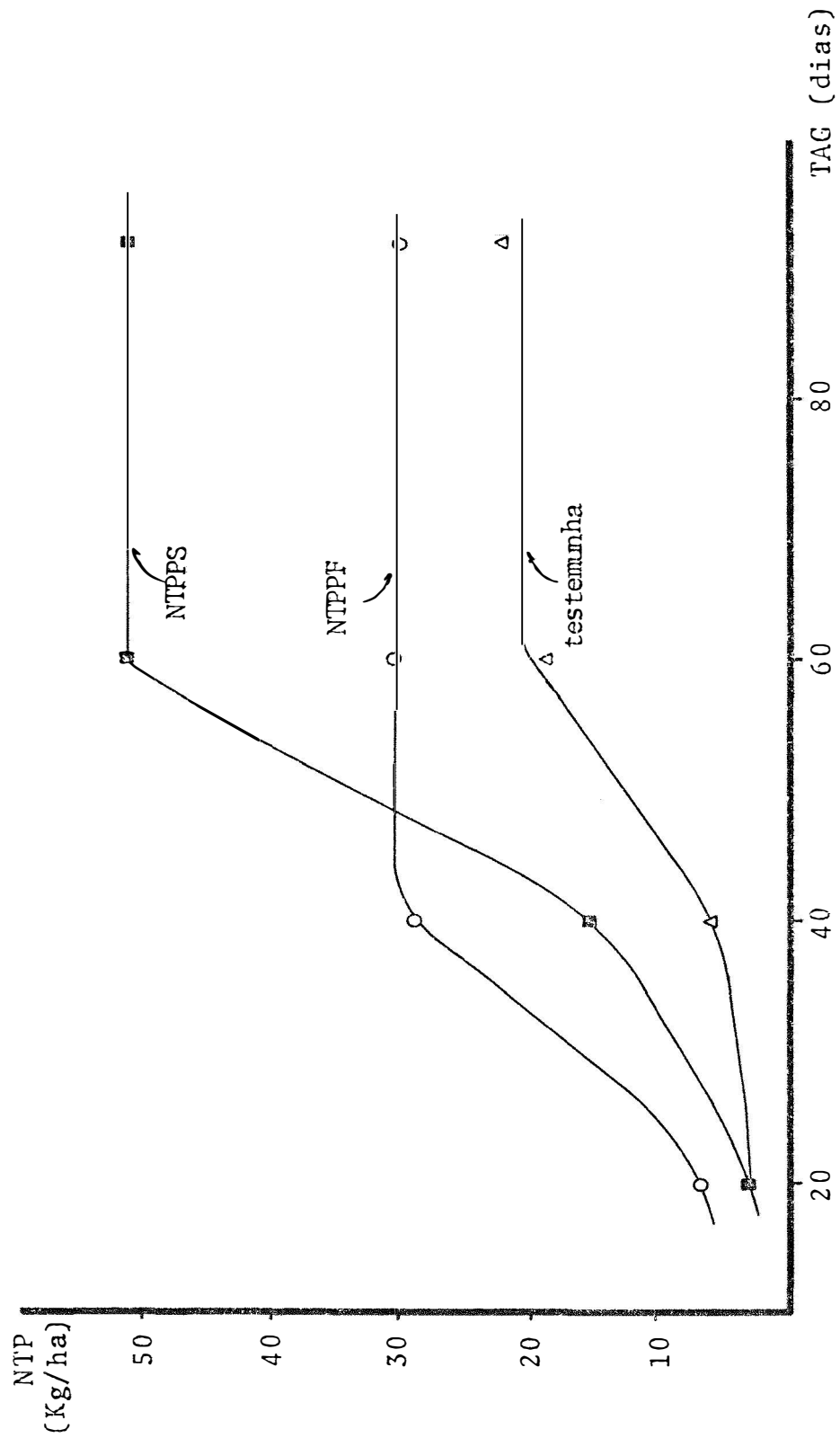


Figura 3 - Gráfico da variação do Nitrogênio Total na Planta (NTP) Proveniente do Fertilizante (NTPPF) e do Solo (NTPPS), e da Testemunha, ao longo do período da cultura. TAG = Tempo após germinação.

$$N T P P S = N T P \left( 1 - \frac{PNPPF}{100} \right)$$

Na Figura 3 nota-se que, até aproximadamente o 50º dia após a germinação, a cultura absorveu menos nitrogênio do solo do que do fertilizante, o inverso acontecendo a partir desta data:

A Figura 3 mostra também os dados de nitrogênio total da cultura testemunha os quais, teoricamente, deveriam ser iguais aos de NTPPS. Observa-se, entretanto, que foram bastante diferentes chegando a haver uma diferença de  $\approx 30$  Kg/ha a partir do 60º dia. Porém, sua tendência de variação ao longo do período da cultura foi praticamente a mesma da do NTPPS. Desde que a única diferença entre a parcela experimental e a testemunha foi a adubação, podemos supor a hipótese de que esta diferença seja devida a um maior aproveitamento do nitrogênio do solo pela aplicação do fertilizante. Isto se deve ao priming effect (BINGEMAN *et alii*, 1953; BARTHOLOMEW, 1957; JANSSON, 1958; BARROW, 1960 e WESTERMAN e KURTZ, 1973) e também ao maior desenvolvimento do sistema radicular da cultura adubada.

Finalmente, voltando à Tabela 6, verifica-se que a maior parte do nitrogênio da planta entra na formação dos grãos, visto que tanto para a parcela fertilizada como para a

testemunha o nitrogênio total (Kg/ha) no grão foi praticamente 10 vezes maior do que o da palha.

## 6. CONCLUSÕES

Da discussão dos resultados apresentados neste trabalho pôde-se concluir que:

i) Os maiores valores de fluxo de água à profundidade de 120 cm foram sempre precedidos pelas maiores precipitações, o mesmo acontecendo com o fluxo de nitrato, percebendo-se, porém, a passagem de um pulso de nitrogênio a esta profundidade no mês de abril.

ii) Aproximadamente 15 Kg N/ha foram lixiviados à 120 cm de profundidade durante o ano, dos quais apenas 1,35 Kg N/ha foram provenientes do fertilizante nitrogenado aplicado (100 Kg N/ha).

iii) A fertilização nitrogenada deve ser parcelada: (a) 1/3 da dose total no plantio, pelo fato de nos primeiros estágios de desenvolvimento da cultura a utilização do fer-

tilizante ter sido alta, porém, com uma baixa eficiência; e (b) os 2/3 restantes dos 30 aos 45 dias após a germinação, período de maior necessidade de N pela planta e de maior eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado.

iv) Após os 45 dias não se deve fazer adubação nitrogenada, pois apesar de haver aumento no nitrogênio total da planta, a contribuição do nitrogênio do fertilizante cai sensivelmente, havendo uma maior absorção de nitrogênio do solo.

v) Após os 60 dias, o nitrogênio total na planta permaneceu constante, porém verificou-se uma concentração ~10 vezes maior nos grãos, indicando sua redistribuição dentro da planta.

## 7. SUMMARY

Studies on the fate of nitrogen fertilizer applied to a bean crop (*Phaseolus vulgaris* L.) were carried out on an Oxic Paleustalf soil plot, located in the "Luiz de Queiroz" campus, University of São Paulo. Nitrogen leaching losses by deep drainage at 120 cm depth and plant absorption were specially considered.

Neutron probe, tensiometers, soil solution extractors and  $^{15}\text{N}$ -labelled nitrogen fertilizer (Ammonium sulphate) applied at a rate of 100 Kg N/ha were used in the experiment.

A soil solution extraction methodology is described in which nitrate concentrations were determined by means of continuous flow injection technique using selective electrode.

Determinations of total nitrogen,  $^{15}\text{N}$  % atom excess in soil solution and plant samples, as well as dry matter made it possible to determine the nitrogen fertilizer utilization efficiency of the crop at different growing stages.

The data obtained permitted to quantify nitrogen leaching losses ( $\sim 15$  Kg N/ha year, of which 9% from fertilizer) as well as best timing for nitrogen fertilizer application (1/3 at planting and the balance 30-45 days after germination).



## 8. LITERATURA CITADA

- ALLISON, F.E., 1955. Does nitrogen applied to crop residues produce more humus ? *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 19: 210-211.
- BARROW, N.J., 1960. Stimulated decomposition of soil organic matter during the decomposition of added organic matter. *Australian J. Agr. Res.* 2: 331-338.
- BARTHOLOMEW, W.V.; L.B. NELSON e C. H. WERKMAN, 1950. The use of  $^{15}\text{N}$  in field with oats. *Agron. J.* 42: 100-103.
- BARTHOLOMEW, W.V., 1957. Use of isotopes in following nitrogen transformations in soil. A conference on radioactive isotopes in agriculture. *U.S. Atomic Energy Comm. Rep. T.I.D. 7512: 337-347.*
- BIGGAR, J.W.; D.R. NIELSEN e J.L. MacINTYRE, 1975. Measurement

of water and nitrogen fluxes in soil profiles planted to maize. IAEA - SM 191/19, p. 417-428.

BINGEMAN, C.W.; J.E. VARNER e W.P. MARTIN, 1953. The effect of the addition of organic materials on the decomposition of an organic soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 17: 34-38.

BREMNER, J.M., 1965a. Total Nitrogen. In: BLACK, C.A. ed. Methods of soil analysis. Part 2. *American Society of Agronomy*, Inc. Publisher. Madison, Wisconsin, 1149-1178.

BREMNER, J.M., 1965b. Isotope ratio analysis of nitrogen in Nitrogen-15. Tracer Investigation. Part 2. *American Soc. of Agronomy*, Inc., Publisher. Madison, Wisconsin, p. 1256-1286.

BREMNER, J.M. e A.P. EDWARDS, 1965. Determination and Isotope-Ratio Analysis of Different Forms of Nitrogen in Soils: I. Apparatus and Procedure for Distillation and Determination of Ammonium. *Soil Sci. Soc. Amer. Journ.* 29:504-507.

BROADBENT, F.E. e A.B. CARLTON, 1978. Field trials with isotopically labeled nitrogen fertilizer. In: NIELSEN, D.R. e J.G. Mac DONALD, ed. Nitrogen in the environment. New York, Academic Press, 1: 1-41.

CERVELLINI, A.; E. SALATI; E.S. BARROS FERRAZ; N.A. VILLA NOVA; K. REICHARDT; A. DECICO; J.C. OMETTO e M.J.P. JUNIOR, 1973. Análise dos dados meteorológicos de Piracicaba (SP). *Bole-*

*tim Científico* 36. ESALQ/USP, Piracicaba (SP).

CHO, C.M.; G. PROKSCH e A.C. CALDWELL, 1967. The effect of placement on the utilization of nitrogen by maize as determined by  $^{15}\text{N}$ -labelled ammonium sulphate. In: Isotopes in plant nutrition and physiology. Proc. Symp. IAEA. Vienna, p. 47-53.

EPSTEIN, E., 1975. Nutrição mineral das plantas: princípios e perspectivas. Livros Técnicos e Científicos ed. e Editora da Universidade de São Paulo (Trad. E. MALAVOLTA), p. 341.

FRIED, M. e H. BROESHART, 1974. Priming effect of nitrogen fertilizers on soil nitrogen. In: Comments and Letters to the Editor, *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 38: 858.

FRIED, M.; K.K. TANJI e R.M. VAN DE POL, 1976. Simplified long term concept for evaluating leaching of nitrogen from agricultural land. *J. Environ. Qual.* 5: 197-200.

FRIED, M., 1978. Critique of "Field trials with isotopically labeled nitrogen fertilizer. In: NIELSEN, D.R. e J.G. Mac DONALD, ed. *Nitrogen in the environment*. New York, Academic Press, 1: 43-77.

GARDNER, W.R., 1965. Movement of nitrogen in soil. In: BARTHOLOMEW, W.V. e F.E. CLARK, ed. *Soil Nitrogen Am.*

*Soc. of Agronomy. Inc.*, Publisher, Madison, Wisconsin, 15:  
550-572.

GETMANETS, A.YA. e P.S. AVRAMENKO, 1976. Vertical migration  
of nitrate nitrogen in the ordinary chernozems of the  
Ukrainian Steppe Zone. *Soviet Soil Science*, 8(5): 523-  
527.

HAUCK, R.D. e M. BYSTROM, 1970.  $^{15}\text{N}$  - A selected bibliography  
for Agricultural Scientists. *Iowa State Univ. Press*,  
Ames, Iowa, 206p.

HAUCK, R.D. e J.M. BREMNER, 1976. Use of tracers for soil  
and fertilizer nitrogen research. *Adv. Agron.*, 28: 219-  
266.

HILLEL, D.; V.D. KRENTOS e Y. STYLIANOU, 1972. Procedure and  
test of an internal method for measuring soil hydraulic  
characteristics *in situ*. *Soil Sci. Baltimore*, 114: 395 -  
400.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 1974. Effects of  
agricultural production on nitrates in food and water with  
particular reference to isotope studies. IAEA, Viena,  
Sti/PUB/361, 1974.

- JACKSON, M.L., 1976. Análisis Químico de Suelos. 3a. ed. Barcelona, Ediciones Omega, 662 p.
- LIBARDI, P.L. e K. REICHARDT, 1978. Destino de uréia aplicada a um solo tropical. *R. bras. Ci. Solo* 2: 40-44.
- MANGUIAT, I.J. e F.E. BROADBENT, 1977.  $^{15}\text{N}$  studies on nitrogen losses and transformation of residual nitrogen in a flooded soil-plant system. *Phil. Agric.* 60: 354-366.
- NEPTUNE, A.M.L. e T. MURAOKA, 1978a. Aplicação de uréia -  $^{15}\text{N}$  em feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivar carioca. *R. bras. Ci. Solo* 2: 51-55.
- NEPTUNE, A.M.L. e T. MURAOKA, 1978b. Uso de isótopos em Química e Fertilidade do Solo. *R. bras. Ci. Solo* 2: 151-163.
- NIELSEN, D.R. e J.W. BIGGAR, 1976. Spatial variability of the leaching characteristics of a field soil. *Water Resour. Res.* 12(1): 78-84.
- ONKEN, A.B. e H.D. SUNDERMAN, 1970. Use of the nitrate electrode for determination of nitrates in soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 1: 155-161.

- PAULA SOUZA, M.L., 1978. Drenagem profunda em Terra Roxa Estruturada (Paleustalf). ESALQ/USP, 70p. (Tese de Doutorado).
- REEVE, R.C. e E.J. DOERING, 1965. Sampling the soil solution for salinity appraisal. *Soil Sci.* 99(5): 339-344.
- RANZANI, G.; O. FREIRE e T. KINJO, 1967. Levantamento da carta de solos do município de Piracicaba. ESALQ, Piracicaba, SP, 85p. (mimeografado).
- REICHARDT, K. e P.L. LIBARDI, 1974. An analysis of soil water movement in the field: hydrological field site characterization. BC-021, CENA, Piracicaba, SP.
- REICHARDT, K.; F. GROHMANN; P.L. LIBARDI e S.V. QUEIROZ, 1976. Spatial variability of physical properties of a tropical soil: I - Geometric properties. BT-004, CENA/ESALQ/USP, Piracicaba, SP, 27p.
- 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* 1: 130-132.
- RICHARDS, L.A., 1965. Physical condition of water in soil.

In: BLACK, C.A. ed. *Methods of Soil Analysis*. Madison, Amer. Soc. Agron. Part I. *Agronomy*, p. 128-152.

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. Chem. Act.* 88: 1-16.

SAUNDERS, L.C.U., 1978. Métodos de determinação e variabilidade espacial da condutividade hidráulica sob condições de campo. ESALQ/USP, 77p. (Tese de Doutorado).

TANJI, K.K.; M. FRIED e R.M. VAN DE BOL, 1977. A steady-state conceptual nitrogen model for estimating nitrogen emissions from cropped lands. *J. Environ. Qual.* 6(2): 155-159.

VILLA NOVA, N.A.; R. VENCOVSKY; J.C. OMETTO e A. DECICO, 1973. Contribuição ao estudo dos ventos na região de Piracicaba. II Semana de Estudos de Meteorologia Agrícola do Paraná. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

WESTERMAN, R.L. e L.T. KURTZ, 1973. Priming effect of  $^{15}\text{N}$  labelled fertilizers on soil nitrogen in field experiments. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37: 725-727.

WESTERMAN, R.L. e L.T. KURTZ, 1974. Reply to FRIED and BROESHART. In: Comments and Letters to the Editor. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38: 858-859.

WESTERMAN, R.L. e L.T. KURTZ, 1974. Isotopic and non isotopic estimation of fertilizer nitrogen uptake by Sudangrass in field experiments. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38: 07-109.

WESTERMAN, R.L.; L.T. KURTZ e R.D. HAUCK, 1972. Recovery of  $^{15}\text{N}$ -labelled fertilizers in field experiments. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36: 82-86.



A P P E N D I C E

Cálculo do Fluxo de Água no Solo em z = 120 cm

Para calcular o fluxo de água na profundidade z = 120 cm, as seguintes determinações foram feitas:

- a) Média das leituras dos tensiômetros à profundidade z,  $\bar{L}_z$  (cm Hg):

$$\bar{L}_z = \frac{\sum_{i=1}^N L_{i,z}}{N} \dots\dots\dots (A-1)$$

onde z = profundidade 105 ou 135 cm

N = número de tensiômetros na profundidade considerada

$L_{i,z}$  = leituras dos tensiômetros na profundidade z (cm Hg).

- b) Determinação do potencial matricial médio à profundidade z,  $\bar{\xi}_z$ :

A determinação de  $\bar{\xi}_z$  em cm de H<sub>2</sub>O foi obtida a partir da média das leituras dos tensiômetros  $\bar{L}_z$  através de:

$$\bar{\xi}_z = -12,6 \bar{L}_z + h_c + z \dots\dots\dots (A-2)$$

onde  $h_c$  = altura da cuba de mercúrio em relação à superfície

do solo, 45 cm para ambas as profundidades;

z = profundidade dos tensiômetros, 105 e 135 cm.

O potencial matricial médio na profundidade z = 120 cm ( $\bar{\xi}_{120}$ ) foi obtido por:

$$\bar{\xi}_{120} = \frac{\bar{\xi}_{135} + \bar{\xi}_{105}}{2} \dots\dots\dots (A-3)$$

c) Determinação do gradiente de potencial médio da água em

$$z = 120 \text{ cm, } \left. \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial z} \right|_{120}$$

$$\left. \frac{\partial \bar{\psi}}{\partial z} \right|_{120} \approx \left. \frac{\Delta \bar{\psi}}{\Delta z} \right|_{120} = \frac{-12,6(\bar{L}_{135} - \bar{L}_{105})}{30} \dots\dots\dots (A-4)$$

onde  $\bar{\psi} = -12,6 \bar{L}_z + h_c =$  potencial total médio da água no solo (cm H<sub>2</sub>O).

$\Delta \bar{\psi}$  = diferença de potencial total médio entre z = 135 cm e z = 105 cm.

$\Delta z$  = diferença entre as profundidades dos tensiômetros.

$\bar{L}_{135}$  e  $\bar{L}_{105}$  = média das leituras dos tensiômetros a z = 135

e  $z = 105$  cm de profundidade, respectivamente.

Nestas condições, a equação de Darcy (equação 4) para o caso específico, assume a forma:

$$q_{120}^{(H_2O)} = K(\bar{\xi}_{120}) \frac{12,6 (\bar{L}_{135} - \bar{L}_{105})}{30} \dots\dots\dots (A-5)$$

A condutividade hidráulica como uma função do potencial matricial,  $K(\bar{\xi}_{120})$ , foi obtida graficamente a partir da curva característica ( $\theta$  vs  $\xi$ ) e da curva  $K$  versus  $\theta$ . A função  $K(\theta)$  foi obtida por SAUNDERS (1977), pelo procedimento de HILLEL (1972) e a curva característica por PAULA SOUZA (1978).