

HIDRÁULICA DA FERTIRRIGAÇÃO POR GOTEJA UTILIZANDO TANQUE DE DERIVAÇÃO DE FLUXO E BOMBA INJETORA

JOSÉ RENATO ZANINI
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. ANTÔNIO FERNANDO LORDELO OLITTA

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Fevereiro - 1987

HIDRÁULICA DA FERTIRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO
UTILIZANDO TANQUE DE DERIVAÇÃO DE FLUXO E
BOMBA INJETORA

JOSÉ RENATO ZANINI

APROVADA EM: 10/04/87

COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dr. ANTÔNIO F. LORDELO OLITTA.	ESALQ/USP
Prof. Dr. JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE	FEIS/UNESP
Prof. Dr. KLAUS REICHARDT	ESALQ/USP
Prof. Dr. PAULO LEONEL LIBARDI	ESALQ/USP
Prof. Dr. RUBENS SCÂRDUA	ESALQ/USP

Prof. Dr. ANTÔNIO FERNANDO L. OLITTA

- Orientador -

*Com esperança que em alguma época
o Brasil importe menos alimentos
e use pouco sua agricultura
para pagamento de uma inter
minável dívida externa.*

A G R A D E C I M E N T O S

Ao Prof. Dr. Antônio Fernando Loderlo Olitta, pela orientação e apoio recebidos para realização desta pesquisa.

À Universidade Estadual Paulista (UNESP) e Universidade de São Paulo (USP) que me permitiram realizar o curso de doutorado.

Ao Programa Institucional de Capacitação Docente (PICD) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudo concedida.

À indústria Aspersão no Brasil (ASBRASIL) pelo fornecimento de tubulações, gotejadores e bomba injetora de fertilizantes utilizados nesta pesquisa.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), que me possibilitou realizar análises químicas, no Laboratório de Análises de Água e Plantas.

Aos Profs. Gener Tadeu Pereira e Humberto de Campos pela colaboração nas análises estatísticas.

A todas as pessoas que de diversas formas contribuíram para a realização deste trabalho.

Í N D I C E

	Página
RESUMO	ix
SUMMARY	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Vantagens e Limitações da Fertirrigação	3
2.2. Sistemas de Injeção de Fertilizantes à Rede de Irrigação	6
2.3. Operação do Sistema de Fertirrigação	11
2.4. Concentrações Aplicadas Durante a Fertirriga- ção	13
2.5. Uniformidade de Distribuição	17
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1. Método de Irrigação Utilizado	21
3.1.1. Sistemas de Injeção de Fertilizante ..	22
3.1.1.1. Injeção por Derivação de Flu- xo	22
3.1.1.2. Bomba Injetora	22
3.1.2. Cabeçal de Controle com Tanque de Fer- tilizante	23
3.1.3. Cabeçal de Controle com Bomba Injetora	27
3.1.4. Linha de Gotejadores	29

3.2. Injeção de Fertilizante por Derivação de Fluxo	33
3.2.1. Equação de Regressão entre Diferença de Pressão e Vazão Derivada	33
3.2.2. Tempos de Fertirrigações e Instantes de Coleta de Amostras	34
3.2.3. Pressão e Vazão ao Longo da Linha de Gotejadores	39
3.2.4. Fertilizante e Manejo do Sistema para as Fertirrigações	39
3.2.4.1. Fertilizante	39
3.2.4.2. Manejo do Sistema	40
3.2.5. Previsão das Concentrações a serem obtidas e Quantidades Aplicadas de Fertilizante	41
3.3. Injeção do Fertilizante com Bomba	45
3.3.1. Controle da Taxa de Injeção	45
3.3.2. Tempo de Fertirrigação e Instantes de Coleta de Amostras	45
3.3.3. Manejo do Sistema para Fertirrigação.	46
3.3.4. Previsão das Concentrações a serem obtidas	47
3.3.5. Solução Fertilizante	48
3.4. Coleta e Análise de Amostras	48

3.5. Uniformidade de Distribuição do Fertilizante.	51
3.6. Análises Estatísticas	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1. Pressão na Linha de Gotejadores	53
4.2. Vazão na Linha de Gotejadores	55
4.3. Injeção por Derivação de Fluxo	55
4.3.1. Diferença de Pressão e Vazão Derivada.	55
4.3.2. Teores de Cloreto	58
4.3.2.1. Teores no Tanque de Fertilizante.....	62
4.3.2.2. Teores na linha de Gotejadores.....	67
4.3.3. Quantidade Aplicada de Cloreto	69
4.3.3.1. Vazão de Derivação de 372 l/h e Tempo de Fertirrigação de 40 minutos	73
4.3.3.2. Vazão de Derivação de 186 l/h e Tempo de Fertirrigação de 80 minutos	76
4.3.3.3. Vazão de Derivação de 93 l/h e Tempo de Fertirrigação de 160 minutos	80
4.4. Injeção com Bomba	84
4.4.1. Taxa de Injeção da Bomba	84

Página

4.4.2. Teores de Cloreto	86
4.4.3. Quantidade Aplicada de Cloreto	88
4.5. Comparação entre Aplicação com Derivação de Fluxo e com Bomba Injetora	92
5. CONCLUSÕES	97
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

HIDRÁULICA DA FERTIRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO UTILIZANDO TANQUE DE DERIVAÇÃO DE FLUXO E BOMBA INJETORA

Autor: JOSÉ RENATO ZANINI

Orientador: Dr. ANTÔNIO FERNANDO L. OLITTA

RESUMO

Com o objetivo de estudar a hidráulica da fertirrigação por gotejamento com tanque de derivação de fluxo e bomba injetora de fertilizantes, utilizando-se o íon cloreto como traçador, foi conduzido um experimento no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP. Para isso foi instalado um sistema de irrigação por gotejamento, com cabeçal de controle e uma linha de 52,25 m, contendo 210 gotejadores espaçados de 0,25 m.

Com derivação de fluxo injetaram-se 93, 186 e 372 l/h de solução de KCl à linha de gotejadores e com bomba injetora 372 l/h. Amostras de solução distribuídas pe-
los gotejadores foram coletadas na saída do tanque de ferti-
lizante e em 20 pontos da linha de gotejadores, em dez ins-
tantes. Essas amostras foram analisadas determinando-se o
teor de cloreto nas mesmas.

Pela análise dos resultados obtidos concluiu-se que:

- a) A vazão derivada através do tanque de fertilizante é diretamente proporcional à diferença de pressão entre os pontos de entrada e saída do tanque, seguindo o Teorema de Torricelli.
- b) A concentração do íon cloreto no tanque em relação à sua concentração inicial diminuiu com o aumento do volume derivado através do mesmo, segundo um modelo exponencial.
- c) A quantidade de cloreto distribuída pela linha de gotejadores, diminuiu linearmente do início para o final da linha, tanto com a utilização de tanque de derivação de fluxo como para bomba injetora. Ainda, esses dois sistemas não diferiram entre si com relação às quantidades aplicadas e a redução dessas quantidades.
- d) Aumentando-se o tempo de aplicação de cloreto obtiveram-se menores diferenças entre quantidades do mesmo distribuídas em diversos pontos na linha de gotejadores.
- e) A uniformidade de distribuição de cloreto avaliada pelo Coeficiente de Uniformidade de Christiansen foi elevada, sendo maior ou igual a 97,3%, para os dois sistemas de injeção de fertilizantes.

HYDRAULIC OF THE FERTIGATION BY DRIP USING TANK OF FLOW DERIVATION AND INJECTOR PUMP

Author: JOSÉ RENATO ZANINI

Adviser: Dr. ANTÔNIO FERNADO L. OLITTA

SUMMARY

In this work the objective was to study the hydraulic of the fertigation by drip with tank of flow derivation and injector pump of fertilizer, using the chloride ion as a tracer.

At the Hydraulic Laboratory of Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP, Brazil, a drip irrigation system was installed with control head and one line of 52.25 m, with 210 emitters spaced 0.25 m.

Ninety three, 186 and 372 ℓ/h of KCl solution were injected in the emitters line by flow derivation and 372 ℓ/h with an injector pump. Samples of KCl solution were collected on the outlet of the fertilizer tank and also in 20 points of the emitters line, in ten different instants. These samples were analysed and then the chloride content

was determined.

The analysis of the results led to the following conclusions:

- a) The flow through the fertilizer tank is directly proportional to the pressure difference between the enter and outlet points of the tank, according to Torricelli's Theorem;
- b) The chloride ion concentration in the tank in relation to its initial concentration decreases with the increase in the volume derivated through it, according to an exponential model;
- c) The quantity of chloride distributed by the emitters line, decreased linearly from the beginning to the end of the line using either the tank of flow derivation or the injector pump. Still, these two systems didn't differ from each other in relation to the quantities applied and the reduction of these quantities;
- d) With the increase in the application time of chloride smaller differences were obtained among quantities of it, distributed in different points in the emitters line;

- e) The chloride distribution uniformity evaluated by Christiansen's Uniformity Coefficient was high, being larger or equal to 97.3%, for the two injection fertilizers systems.

1. INTRODUÇÃO

O fornecimento de água e nutrientes é essencial para se obter boa produção das culturas, porém, a irrigação e fertilização estão se tornando cada vez mais caras e difíceis devido à pouca disponibilidade e elevado custo de mão-de-obra, fertilizantes, sistemas de irrigação e energia.

Fertirrigação consiste na aplicação simultânea de água e fertilizantes, através de um sistema de irrigação. É uma técnica relativamente antiga, que os agricultores de muitos países têm utilizado, por meio de diversos métodos de irrigação. Em países como os Estados Unidos, Israel, Itália e outros, tornou-se de uso generalizado, principalmente com o desenvolvimento da irrigação por gotejamento.

No Brasil são ainda poucas as áreas que recebem fertirrigação, porém, com as vantagens que oferece e a necessidade de se aumentar o uso da irrigação, abrem-se grandes perspectivas à utilização de tal prática. Contudo, necessita-se de pesquisas sobre este assunto, tais como sistemas de injeção de fertilizantes, uniformidade de distribuição de fertilizantes na rede de irrigação e no solo.

No presente trabalho teve-se como objetivo

estudar a hidráulica da fertirrigação por gotejamento com tanque de derivação de fluxo e bomba injetora, utilizando-se o íon cloreto como traçador, proveniente de solução de KCl, para se verificar a sua distribuição espacial e temporal pelo sistema de irrigação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conforme WOODWARD (1959), a introdução de vários materiais fertilizantes, orgânicos e inorgânicos, em água de irrigação é praticada há séculos. Uma das primeiras aplicações por aspersão foi com adubos líquidos em pastagens.

De acordo com BOAZ & HALEVY (1974), a fertilização combinada com a água de irrigação é perfeitamente adaptável a diferentes sistemas de irrigação, sejam eles fixos, semi-fixos ou móveis. GOLDBERG & SHMUELI (1970) e BRESLER (1977) afirmam que a fertirrigação é mais indicada por gotejamento, seguida pela aspersão, principalmente em sistemas fixos.

2.1. VANTAGENS E LIMITAÇÕES DA FERTIRRIGAÇÃO

Os aspectos favoráveis da fertirrigação são relatados por diversos autores.

WIERSMA (1969) menciona as seguintes vantagens: o trabalho necessário para realizar fertirrigação é pouco maior do que para irrigação; com os mesmos equipamentos de fertirrigação podem-se aplicar herbicidas e outros produtos químicos, utilizando-os também para desobstrução de goteja

dores pela da aplicação de ácidos; necessita-se menor quantidade de fertilizante quando comparado com outros métodos de fertilização.

POMPA (1974) comenta que por meio da fertirrigação é possível: fracionar e dosificar a aplicação de fertilizante tanto quanto se deseja; economizar mão-de-obra; reduzir a lixiviação e distribuir melhor os nutrientes no perfil do solo.

Segundo RAPOSO (1979), com fertirrigação é possível realizar adubação foliar e também: evitar compactação do solo pela não necessidade de máquinas; facilitar a adubação de cobertura em culturas densas e dosar com rigor as quantidades de nutrientes de acordo com a marcha de absorção; maior uniformidade de distribuição e melhor localização dos nutrientes no volume de solo ocupado pelo sistema radicular.

FREY (1981) cita como aspectos favoráveis: possibilidade de utilizar mais intensamente o sistema de irrigação, evitando uso de tratores, aviões, custando em geral um terço dos métodos convencionais de aplicação; permite aplicação independente da cultura e cobertura do solo; não provoca compactação do solo; devido à menor quantidade de produtos aplicados e possibilidade de melhor controle, podem-se reduzir os casos de contaminações de águas superficiais e subterâneas sendo também menor o risco de intoxicações de trabalhadores, quando comparado com métodos convencionais de aplicação de produtos químicos destinados à agricultura.

Comentando sobre a fertirrigação utilizada em Israel, SHANI (1981) expõe as vantagens: é uma maneira rápida e bastante cômoda, podendo ser realizada por um equipamento central para toda a área ou para uma parcela; a coincidência do momento de aplicação da água e do fertilizante aumenta a eficiência de ambos; a época de fertilização pode ser planejada pelo estágio da planta e não por fatores físicos ou técnicos; o sistema pode servir para aplicar outros produtos químicos ou água quente contra geadas, apesar de existir pouca experiência neste aspecto.

Embora sejam diversos os aspectos favoráveis da fertirrigação, existem também algumas limitações.

Conforme WIERSMA (1969), um sistema indevidamente projetado fará distribuição desuniforme. Se chover quando a fertirrigação está programada, o sistema terá que ser acionado da mesma forma ou então transferir-se a época de realização. Muitos fertilizantes baratos não podem ser utilizados. Dependendo do sistema de irrigação a aplicação localizada não pode ser realizada. Adubos fosfatados concentram-se na superfície do solo. Operação inadequada pode danificar equipamentos. Alguns fertilizantes favorecem a obstrução de gotejadores.

FRIZZONE *et alii* (1985) comentam sobre as seguintes limitações:

a) Contaminações e envenenamento: as águas de irrigação que contêm fertilizantes ou outras substâncias po

dem contaminar fontes ou envenenar trabalhadores. Deve-se orientá-los e instalar válvulas de retenção e anti-vácuo, impedindo inversão do fluxo na rede de irrigação.

b) Tipos de fertilizantes: o método não é apropriado para produtos pouco solúveis ou insolúveis. Alguns fertilizantes, principalmente fosfatados, podem provocar reações químicas originando precipitados, limitando o uso de gotejadores. Outros produtos são corrosivos podendo danificar alguns sistemas de irrigação.

2.2. SISTEMAS DE INJEÇÃO DE FERTILIZANTES À REDE DE IRRIGAÇÃO

Segundo WOODWARD (1959), POMPA (1974) e GOLDBERG *et alii* (1976), os sistemas mais comuns de aplicação de fertilizantes com equipamentos de irrigação podem ser divididos em:

a) Tanque de fertilizante

Este sistema opera com um tanque conectado em paralelo à tubulação de irrigação. Provocando-se uma diferença de pressão entre os pontos de entrada e saída do tanque, parte do fluxo da água de irrigação flui através do mesmo e dilui a solução de nutrientes, a qual vai sendo injetada à rede de irrigação.

b) Bombas Injetoras

A solução contida num reservatório aberto é introduzida ao sistema de irrigação por meio de uma bomba.

Em princípio existem dois tipos de bombas: aquelas operadas por uma fonte de energia independente da bomba de irrigação e bombas acionadas por meio da própria pressão da água no sistema.

c) Aplicadores tipo Venturi

Succionam a solução fertilizante de um tanque aberto ou fechado utilizando-se do princípio de Venturi.

d) Tubo ligado à sucção da bomba de irrigação

Com um tubo conectado à tubulação de sucção de água, a solução fertilizante é aspirada, passando pela bomba de irrigação. Por este motivo, produtos corrosivos ou abrasivos são contra-indicados. Também segundo GOLDBERG *et alii* (1976), a escolha do sistema vai depender de cada situação, levando-se em consideração diversos aspectos: volume do tanque, exatidão de diluição, possibilidade de ser portátil, custo da unidade em relação à área que pode atender e demanda de operador.

HOLMAN (1978), referindo-se a bombas injetoras, comenta que devem desenvolver pressão maior do que a da linha de irrigação. Muitas são acionadas eletricamente e com dispositivo que permite controlar a quantidade de solução injetada. As bombas com pistão ou diafragma, operadas hidraulicamente ou eletricamente, são usadas mais frequentemente e permitem amplo ajuste do fluxo para regulagem da taxa de injeção.

Tal como apresentado em boletim da FAO (1980), existem muitas maneiras de injetar fertilizantes em uma rede de irrigação. Contudo, os dois sistemas básicos são:

a) Sistema de pressão diferencial.

É também chamado de derivação de fluxo ou simplesmente tanque de fertilização.

Com este sistema, a concentração da solução injetada diminui continuamente com o tempo, conseqüentemente a desuniformidade de distribuição pode tornar-se um problema. Quando o fertilizante contido no tanque deve ser totalmente aplicado após determinado período, em uma única área, não há problema de desuniformidade. O mesmo não ocorre quando pretende-se atingir ciclicamente diversas unidades, necessitando-se aplicar quantidades distintas para cada área.

b) Bombas injetoras

Para casos onde não existe energia para acioná-las, além da fonte de energia para o sistema de irrigação, tem-se desenvolvido bombas que são acionadas utilizando-se da pressão do sistema.

Estas bombas operam proporcionalmente, ou seja, a quantidade de solução injetada no sistema de irrigação é diretamente proporcional ao fluxo do mesmo.

SHANI (1981), discorre sobre dois sistemas de injeção de fertilizantes:

a) Tanque com derivação de fluxo

É um dos meios mais difundidos para fertir

rigação; é padrão em gotejamento e representa uma unidade inseparável do cabeçal de controle. Porém, com aumento do tamanho das parcelas irrigadas supõe-se que outros métodos serão preferidos.

b) Injetor de fertilizante

Este sistema está bastante difundido no mundo, com muitas variações. A solução contida num tanque aberto é injetada à rede, por uma bomba. Essa geralmente é de diafragma e protegida contra corrosão. Tem os seguintes aspectos favoráveis: é possível controlar a taxa de injeção; permite uso de tanque grande e aberto, com pouca necessidade de recarga.

Em contraposição tem as seguintes desvantagens: o equipamento é caro e relativamente complexo; muitos tipos requerem fonte externa de energia; a injeção prosseguirá em casos de interrupção do fluxo de água, exceto para bombas acionadas hidraulicamente.

Também, segundo SHANI (1981), o equipamento para fertirrigação pode localizar-se em três posições: no ponto central de uma grande área, nas parcelas ou no início de uma linha distribuidora.

Sobre este mesmo aspecto, FINKEL (1982) diz que o aplicador (tanque) de fertilizante é um integrante do cabeçal de controle devendo ser instalado à montante do filtro de tela.

Discorrendo sobre fertirrigação por gotejamento, GROBBELLAR & LOURENS (1974) comentam que as bombas injetoras podem ser do tipo taxa proporcional. Com estas, a taxa de injeção se altera com o fluxo do sistema de irrigação. Outros tipos são de taxa constante, independentemente do fluxo do sistema, porém, podem ser reguláveis para obterem-se diferentes concentrações na rede de irrigação. Esses autores citam também que normalmente são injetados 80 l/h de solução em sistemas de gotejamento.

De acordo com KENNEDY (1984), diversos sistemas de injeção são frequentemente usados na Austrália. Talvez o mais comum seja introdução da solução utilizando-se um tubo ligado à tubulação de sucção da bomba de irrigação. Este sistema, apesar de ser fácil e de baixo custo, pode apresentar problema quando o produto é corrosivo ou abrasivo, danificando os componentes da bomba; quando mal manejado facilita a ocorrência de cavitação e perda do escorvamento da bomba.

Também segundo este autor, o sistema de derivação de fluxo através de pressão diferencial tem como primeira objeção a excessiva perda de carga pela necessidade de se criar pressão diferencial. Porém, esta colocação do autor pode ser contra-argumentada, pois pode-se ter menores perdas quando a vazão de derivação é pequena.

Outras objeções levantadas por KENNEDY (1984) são: dificuldade de controle da vazão derivada e da concentração aplicada. Embora isto seja válido a nível de agricultor, pode também ser refutado, pois, com manômetro e medidor de vazão, é possível calibrar o sistema e calcular a concentração a ser aplicada.

Ainda segundo KENNEDY (1984), o sistema Venturi é um dos melhores meios de aplicação, embora provoque perda de carga e o controle da taxa de aplicação seja problemático. A aplicação mais eficiente seria com bomba injetora, com um sistema próprio de acionamento, necessitando-se, porém, uma fonte de energia próxima ao ponto de injeção. Este autor comenta também que é desejável que o sistema tenha como características: fácil controle da quantidade total a ser injetada; independência de fonte externa de energia; possibilidade de automação; construção com material leve e não corrosível.

2.3. OPERAÇÃO DO SISTEMA DE FERTIRRIGAÇÃO

Segundo WOODWARD (1959), o tempo de aplicação irá variar em função de diversos fatores: tamanho e tipo de equipamento de injeção, fertilizante e taxa de aplicação. A maioria dos materiais são injetados entre 30 a 40 minutos; deve-se evitar interrupção e reinício da aplicação, o que poderia levar a distribuição desuniforme ou excessiva fixação da substância aplicada sobre a planta. Após o tempo de injeção de-

ve-se continuar a operação do sistema por mais 30 minutos para lavagem do injetor, tubulações e cultura.

SHANI (1981) e o SOIL CONSERVATION SERVICE - USDA (1968) indicam que a aplicação de fertilizantes via sistemas de irrigação envolve três etapas. Em um período inicial o sistema é operado com água para molhar a folhagem e o solo ou somente o solo. O período de aplicação de fertilizante raramente deverá ser menor que 30 minutos, sendo aconselhável uma a duas horas. O terceiro período deverá ser suficientemente longo para lavagem do sistema de irrigação e das plantas.

KELLER & KARMEELLI (1975) indicam que a razão entre o tempo de aplicação de fertilizante e o tempo de irrigação é geralmente tomado como 0,8.

A vazão derivada através do tanque é diretamente proporcional à pressão diferencial. Nesse sentido, também SHANI (1981) cita que o valor dessa pressão deve ser de 1 a 2 metros de coluna de água (9,806 a 19,612 kPa).

Com relação a esse mesmo aspecto, FINKEL (1982) comenta que o cálculo da pressão diferencial é complexo. Cada tanque, junto com as conexões, deve ser calibrado na posição de trabalho; a pressão diferencial deve ser da ordem de 1 a 2 m.c.a. (9,806 a 19,612 kPa), enquanto HAGIN & TUCKER (1982) indicam 2 m.c.a. (19,612 kPa).

Entretanto, para nenhuma dessas pressões mencionadas os autores indicam as relações entre vazões derivadas e as vazões totais dos sistemas.

2.4. CONCENTRAÇÕES APLICADAS DURANTE A FERTIRRIGAÇÃO

Tal como apresentado pela FAO (1980), para os sistemas de derivação de fluxo, a concentração da solução injetada varia com o tempo; diminui rapidamente no início, porém, cada vez menos com o decorrer da aplicação. A diferença básica entre derivação de fluxo e bombas injetoras, é que essas apresentam taxa constante de injeção.

Como a variação da concentração da solução injetada diminui com o transcorrer da aplicação, os tempos decorridos entre as amostragens podem ser cada vez maiores.

GOLDBERG *et alii* (1976), comentam que a calibração do tanque não é difícil de ser efetuada, porém, é complexa. Indicam que uma pequena quantidade de sal deve ser dissolvida no tanque e o sistema colocado em operação normal. A seguir, amostras de solução são coletadas dos emissores, inicialmente cinco vezes por minuto e posteriormente a cada cinco minutos. Periodicamente, amostras são coletadas também da solução do tanque e testadas quanto à condutividade elétrica, informando o tempo requerido para o fertilizante passar do tanque para o sistema de irrigação. Essa informação não satisfaz plenamente, pois não segue nenhum critério.

Melhores considerações sobre concentrações injetadas utilizando sistema de derivação de fluxo são encontradas em FAO (1980).

Segundo essa publicação, considerando-se a concentração inicial no tanque igual a 100%, o tempo de aplicação requerido para uma taxa de injeção preestabelecida pode ser determinado usando-se a Figura 1.

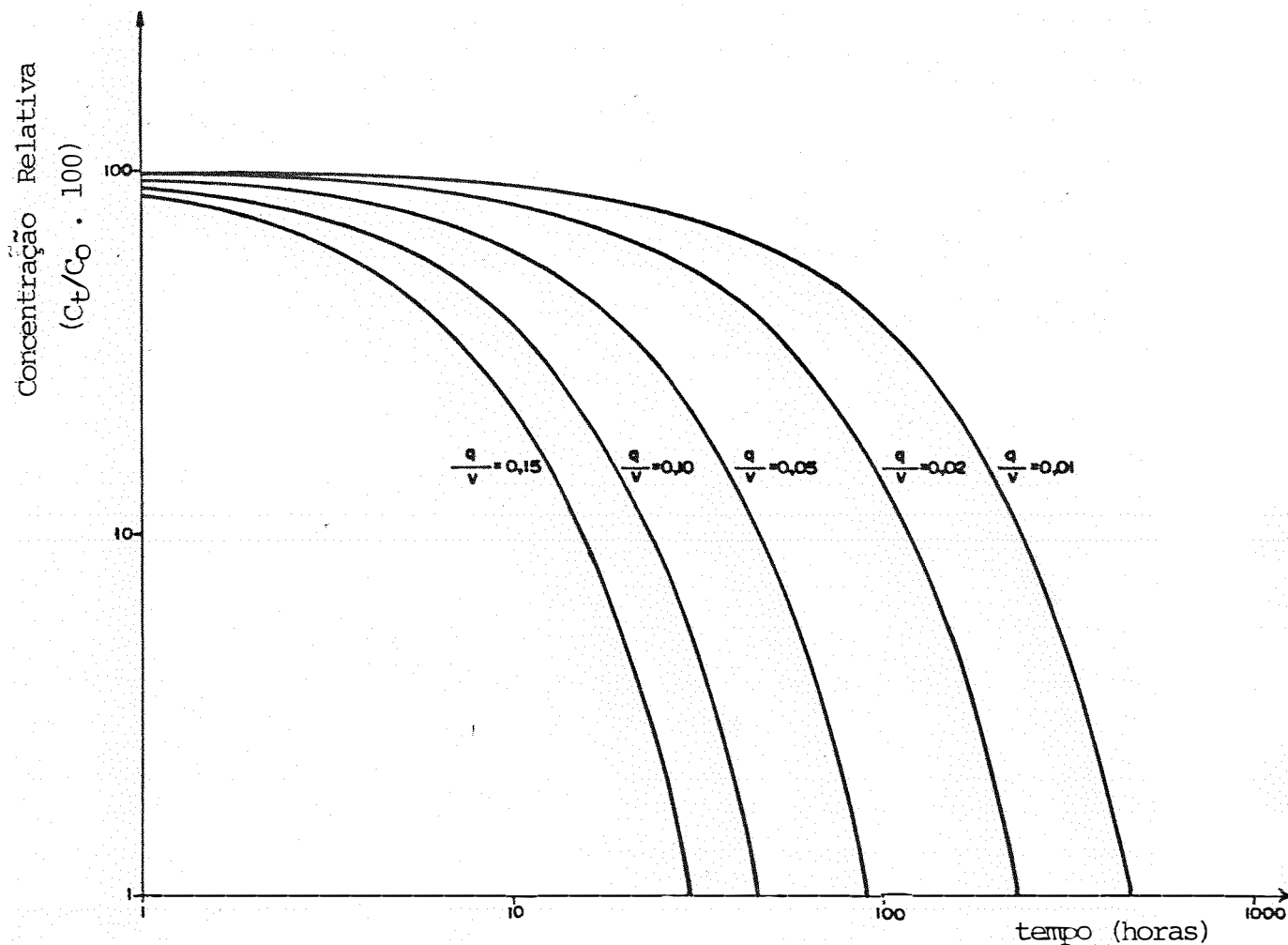


FIGURA 1. Curvas de concentração relativa (C_0 = concentração inicial = 100%; C_t = concentração em um tempo t) versus tempo de aplicação, para diversas relações entre vazão derivada (q) e volume do tanque (v). FAO (1980).

As curvas apresentadas na Figura 1 foram obtidas a partir da equação

$$X = 2,303 \log \frac{1}{C_t/C_o} \quad (1)$$

onde:

X = relação entre volume que passou pelo tanque e volume do tanque

C_o = concentração inicial no tanque

C_t = concentração no tanque após um tempo t decorrido do início da aplicação.

Embora não apresentado na referência citada, a eq. (1) pode ser deduzida partindo-se da equação geral empregada para um reservatório (tanque) com diluição contínua, que é:

$$C_t = C_o \cdot e^{-X} \quad (2)$$

onde:

C_t = concentração no reservatório em um tempo t

C_o = concentração inicial no reservatório

e = base do logaritmo neperiano

X = relação entre volume que passou pelo reservatório (V) até o tempo t e o volume do reservatório (v)

Da eq. (2) temos:

$$\frac{C_t}{C_o} = e^{-x} \Rightarrow \ln \frac{C_t}{C_o} = -x \Rightarrow \ln \frac{1}{C_t/C_o} = x,$$

portanto, $x = 2,303 \log \frac{1}{C_t/C_o}$ que corresponde à eq(1).

Embora teoricamente corretas, as curvas apresentadas na Figura 1 estão relacionadas com baixos valores de q/v , que só se enquadram para pequenas taxas de injeção (q), necessitando-se longos tempos de aplicação, o que dificilmente ocorre na prática.

Como também discutido pela FAO (1980), a mistura do material no tanque irá depender das características do mesmo. Na maioria dos casos considera-se que ocorre mistura imediata e uniforme, podendo-se aplicar a eq. (1). Por outro lado, para objetivos práticos, valores apresentados graficamente semelhantes à Figura 1, podem ser considerados de boa precisão.

Também com objetivos práticos, SHANI (1981) apresentou a eq. (2) graficamente. Nessa forma é possível verificar a concentração relativa no tanque após determinado volume de aplicação, conforme apresentado na Figura 2.

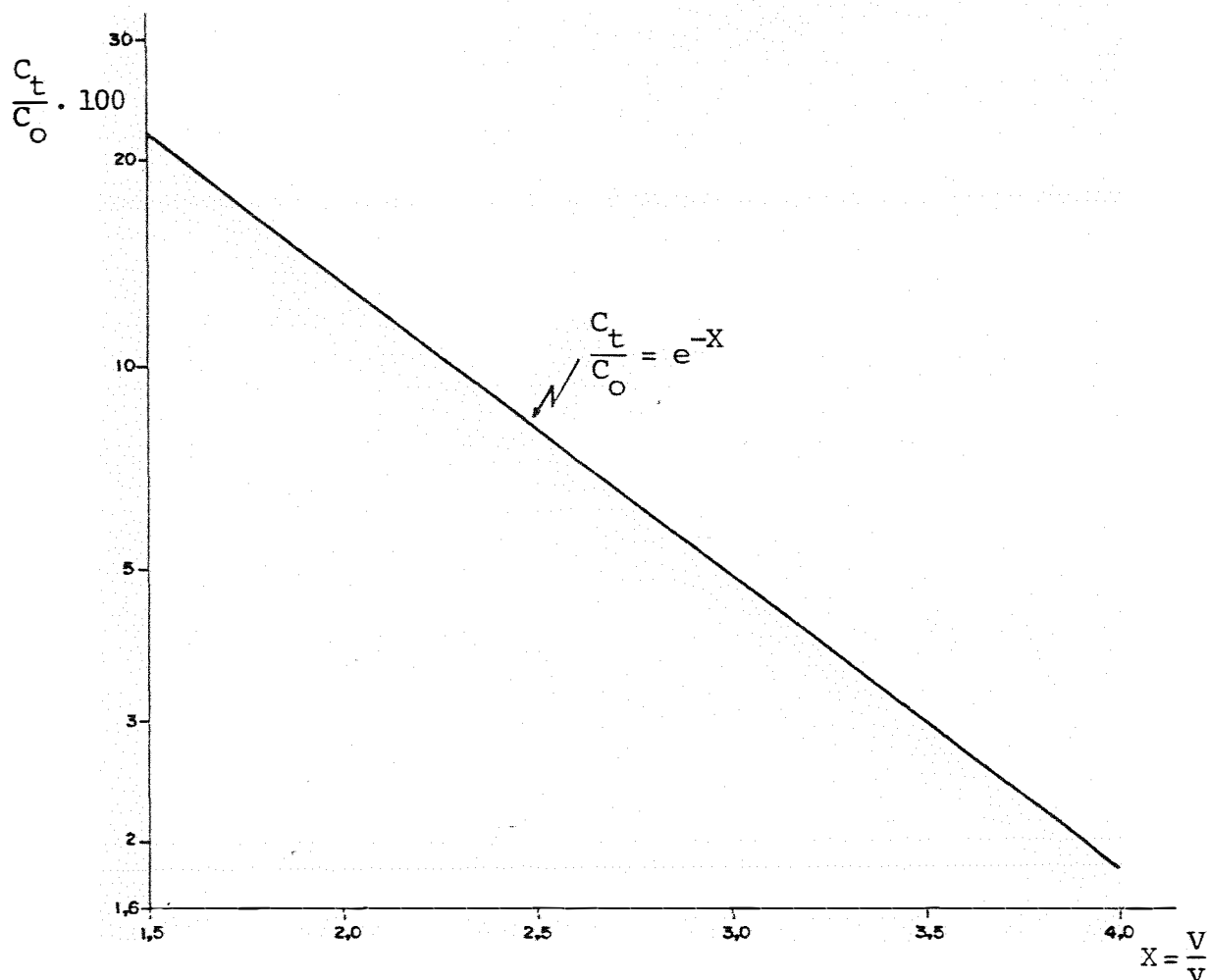


FIGURA 2. Concentração relativa (C_t/C_o) versus relação entre volume aplicado (V) e volume do tanque (v). SHANI (1981).

2.5. UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO

São poucas as citações encontradas sobre uniformidade de distribuição de fertilizantes por meio de sistemas de irrigação. A maioria das considerações são incompletas e de natureza apenas descritiva.

WIERSMA (1969), referindo-se à aspersão, comenta que a solução de fertilizante deve ser injetada a uma taxa constante para se obter aplicação uniforme.

Descrevendo sobre fertirrigação por gotejamento, GROBBELAAR & LOURENS (1974) indicam que para materiais pouco solúveis ou para melhor uniformidade de distribuição, o tempo de fertirrigação deve ser longo, de 3 a 5 horas.

GOLDBERG *et alii* (1976) comentam que testes realizados, utilizando derivação de fluxo com tanques pequenos, têm mostrado distribuição uniforme, por exemplo em sistema fixo de aspersão, especialmente quando o diâmetro da tubulação é pequeno e a pressão é alta. Se a pressão não necessita ser alta e o diâmetro for grande, para a distribuição manter-se uniforme deve-se injetar o fertilizante em menor taxa. Diâmetro e comprimento dos tubos de entrada e saída do tanque têm considerável influência na taxa de injeção.

Com relação a fertilizantes e produtos químicos, HOLMAN (1978) sugere que em quase todos os casos é preferível injetá-los vagarosamente ao sistema de irrigação, para ocorrer cobertura uniforme. A injeção muito rápida pode distribuir o material somente a uma parte do campo.

ROLSTON *et alii* (1981), mencionando sobre sistemas de gotejamento, citam que a uniformidade de distribuição de fertilizantes depende da eficiência da agitação da solução no tanque, da uniformidade de aplicação de água e das características do fluxo da água e solutos na tubulação de irrigação. Muitos sistemas projetados adequadamente distribuem com boa uniformidade. BESTER *et alii** (1974), citados

* BESTER, D.H.; LOTTER, D.C.; VELDMAN, G.H. Drip irrigation on citrus. Second International Drip Irrigation Congress Proceedings. San Diego, 1974, pp. 58-64.

por esses autores, verificaram que iniciando-se a injeção após completo enchimento das tubulações com água, a distribuição foi bastante uniforme.

Comparando métodos e sistemas de irrigação, HAGIN & TUCKER (1982) afirmam que com irrigação por superfície o uso da fertirrigação deve resultar em distribuição inadequada. Pivô central, aspersão convencional e gotejamento dão melhores resultados.

Embora se tenha encontrado poucos trabalhos sobre fertirrigação, estudos de uniformidade de distribuição em sistemas de irrigação são diversos, porém, referem-se apenas à distribuição de água.

CHRISTIANSEN (1942) sugeriu um critério, que se tornou bastante utilizado, conhecido como Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC). Este coeficiente é uma medida de dispersão, sendo definido como:

$$CUC(\%) = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n \bar{X}^2} \right) \quad (3)$$

onde,

X_i = valor observado no ponto i

\bar{X} = média dos valores observados

n = número de observações.

Christiansen indica como aceitáveis valores de CUC iguais ou maiores que 80%.

O SOIL CONSERVATION SERVICE (1968) adotou o CUC como base para irrigação por aspersão, indicando valores iguais ou maiores a 85%; abaixo desse limite ocorre distribuição desuniforme de água na área molhada.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, da Universidade de São Paulo.

Foi montado um sistema de irrigação por gotejamento, composto basicamente de um cabeçal de controle e uma linha de gotejadores, visando-se estudar a distribuição do íon cloreto ao sistema de irrigação, aplicado por dois sistemas de injeção de fertilizantes: tanque com derivação de fluxo e bomba injetora.

3.1. MÉTODO DE IRRIGAÇÃO UTILIZADO

A água para as irrigações foi tomada de um reservatório do Laboratório de Hidráulica e bombeada até o cabeçal de controle.

Para o sistema de injeção de fertilizante com derivação de fluxo, utilizou-se uma bomba centrífuga com vazão e altura manométrica nominais de 25 m³/h e 25 m.c.a. (245 kPa), respectivamente, acionada por motor elétrico de 5 cv (3,7 kW).

Para injeção de fertilizante com bomba injetora, foram utilizados uma bomba centrífuga de 40 m³/h e

100 m.c.a. (980kPa), respectivamente, e motor elétrico de 30 cv (22 kW).

3.1.1. SISTEMAS DE INJEÇÃO DE FERTILIZANTE

3.1.1.1. INJEÇÃO POR DERIVAÇÃO DE FLUXO

Consistiu da aplicação de fertilizante contido em um tanque conectado à linha principal de irrigação.

Com esse sistema, ocorre derivação de parte do fluxo da linha principal, entrando continuamente pelo tanque e voltando à mesma. Isso provoca a injeção do fertilizante à rede de irrigação, levando-o em solução até os gotejadores.

A montagem e melhor descrição desse sistema serão apresentadas nas Figuras 3 e 4, no item 3.1.2.

3.1.1.2. BOMBA INJETORA

Foi utilizada uma bomba injetora fabricada pela indústria ASBRASIL (Aspersão no Brasil S/A), de acionamento hidráulico.

Este equipamento utiliza a própria água do sistema de irrigação para impulsionar hidráulicamente um pistão.

Utilizando-se do princípio de Ariete, a água utilizada para acionamento é ejetada e não se mistura com a solução fertilizante. Portanto, a solução contida em um recipiente aberto não sofre diluição durante a aplicação, sendo succionada e injetada à linha de irrigação, a uma taxa constante.

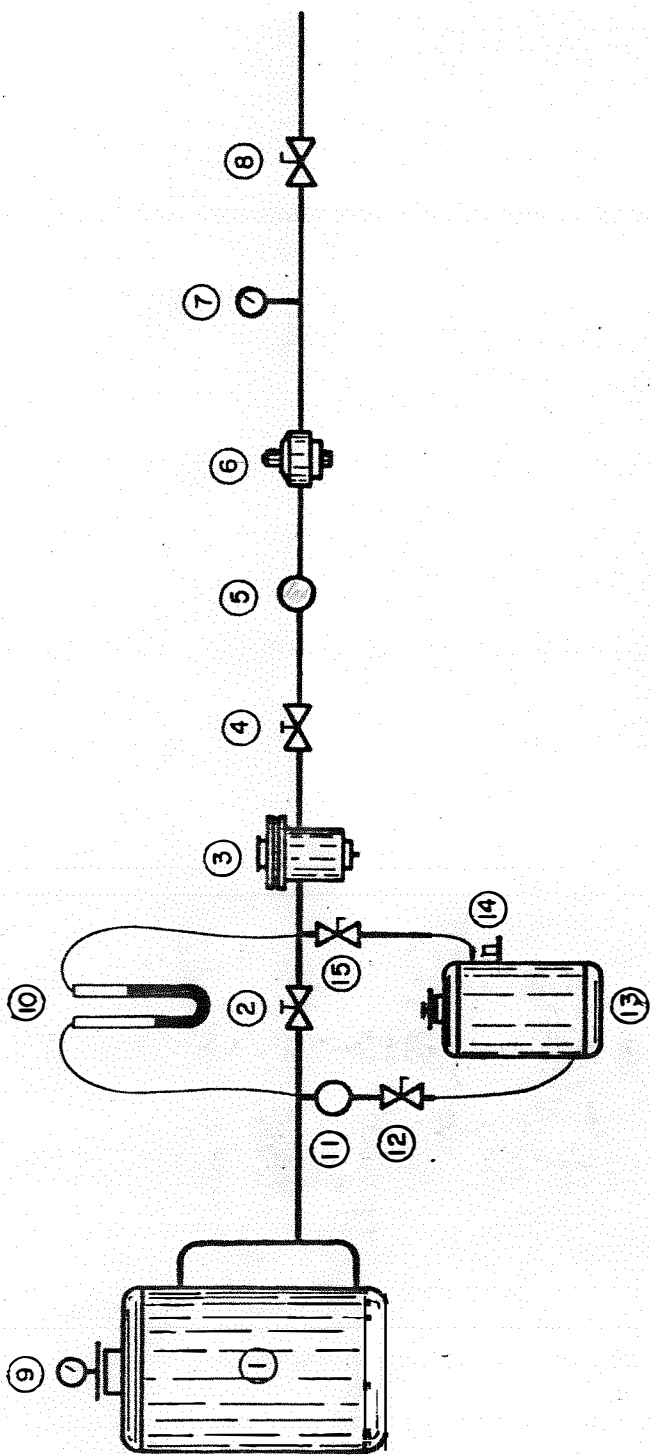
A montagem dessa bomba junto ao cabeçal de controle e melhor descrição do mesmo serão apresentadas nas Figuras 5 e 6, no item 3.1.3.

3.1.2. CABEÇAL DE CONTROLE COM TANQUE DE FERTILIZANTE

O cabeçal de controle e seus componentes estão apresentados nas Figuras 3 e 4, a seguir.



FIGURA 3. Cabeçal de controle utilizado com derivação de fluxo.



- | | |
|--|---|
| 1. filtro de areia | 7. manômetro de precisão |
| 2. registro de fechamento lento (2 polegadas), para derivação de vazão | 9. manômetro de Bourdon |
| 3. filtro de tela | 8, 12 e 15. registros de fechamento rápido (1/2 polegada) |
| 4. registro de fechamento lento (1 polegada) | 10. manômetro diferencial |
| 5 e 11. hidrômetros | 13. tanque de fertilizante |
| 6. válvula de controle de pressão (1/2 polegada) | 14. ponto de coleta de amostra de solução |

FIGURA 4. Esquema do cabeçal de controle com derivação de fluxo e principais componentes.

Conforme mostram as Figuras 3 e 4, foram utilizados os componentes discriminados e operados como a seguir:

Filtro de areia (nº 1, Figura 4): este reservatório foi utilizado sem areia, servindo apenas como suporte de outros componentes do cabeçal de controle; a água proveniente da moto-bomba preencheu totalmente este reservatório, atingindo uma pressão de 25 m.c.a. (245 kPa), medida no manômetro instalado na parte superior do filtro (nº 9, Figura 4).

Registro de fechamento lento (nº 2, Figura 4): a água que passava pelo filtro de areia atingia em seguida este registro. Pelo fechamento parcial do mesmo provocou-se perda de carga, resultando uma derivação do fluxo da linha principal em direção ao tanque de fertilizante. A perda de carga originada do fechamento deste registro foi acusada pelo manômetro diferencial.

Filtro de tela (nº 3, Figura 4): foi utilizado um filtro de 150 "mesh", com a finalidade de reter impurezas minerais provenientes principalmente do fertilizante.

Hidrômetros (nºs 5 e 11, Figura 4): o hidrômetro indicado com número 5, instalado na linha principal, foi utilizado para calcular a vazão total do sistema; com o outro, instalado em direção à entrada do tanque, calculou-se a vazão derivada. Foram usados hidrômetros domiciliares, com vazão nominal de 3 m³/h e com graduação que permite leitura mínima de um litro.

Válvula de controle de pressão (nº 6, Figura 4): esta válvula, de operação manual, foi utilizada com a finalidade de ajustar a pressão após a mesma, acusada no manômetro de precisão (nº 7, Figura 4). Com a instalação dessa válvula, a pressão na saída da central de controle foi mantida em 11,2 m.c.a. (109,83 kPa), resultando em uma pressão de serviço na linha de gotejadores de 10 m.c.a. (98,06 kPa).

Registros de fechamento rápido (nºs 8, 12 e 15, Figura 4): os registros instalados na tubulação de entrada e saída do tanque foram utilizados para possibilitar o isolamento do mesmo em relação à linha principal. O registro instalado na saída do cabeçal de controle foi utilizado com a finalidade de permitir interrupção brusca do fluxo. Isso possibilitou a leitura dos hidrômetros em determinado instante, permitindo obter-se uma relação entre perda de carga, acusada no manômetro diferencial e vazão derivada ao tanque de fertilizante.

Manômetro diferencial (nº 10, Figura 4): foi utilizado um manômetro em "U", com líquido manométrico de densidade igual a 1,75.

As tomadas de pressão foram conectadas a linha principal, antes e após o registro de controle de derivação de fluxo, por meio de engates rápidos.

Com a perda de carga acusada no manômetro causada pelo fechamento parcial do registro localizado entre as tomadas de pressão, e volume lido no hidrômetro, obteve-se

uma relação entre perda de carga e vazão derivada. Esta relação foi utilizada para controlar a vazão de solução fertilizante injetada à linha principal.

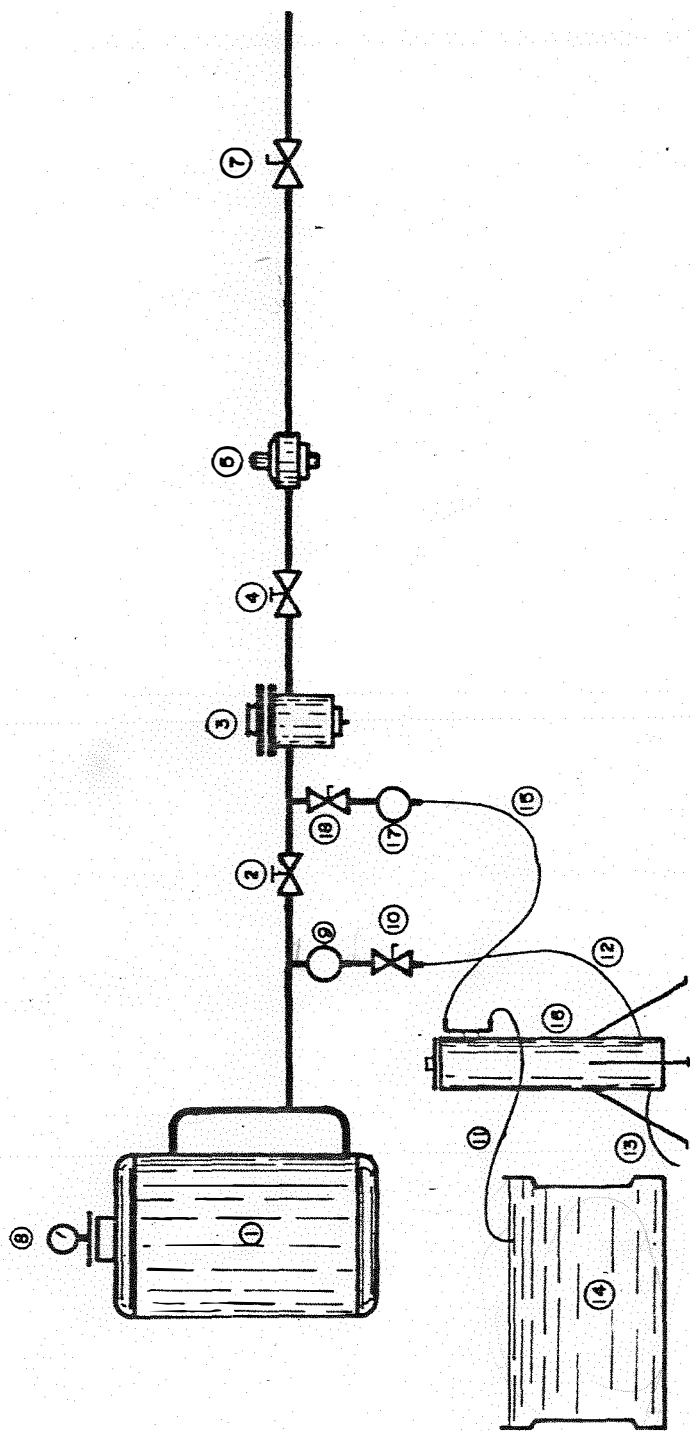
Tanque de fertilizante (nº 13, Figura 4): utilizou-se tanque da indústria IRTEC, com capacidade de 62 l. No início da tubulação de saída do tanque (nº 14, Figura 4), foi inserido um gotejador, permitindo coleta de amostras de solução durante as fertirrigações.

3.1.3. CABEÇAL DE CONTROLE COM BOMBA INJETORA

O cabeçal de controle contendo a bomba injetora e demais componentes estão apresentados nas Figuras 5 e 6.



FIGURA 5. Cabeçal de controle com bomba injetora



- | | |
|--|--|
| 1. filtro de areia | 9 e 17. hidrômetros |
| 2. registro de fechamento lento (2 polegadas) | 11. mangueira de sucção da solução fertilizante |
| 3. filtro de tela | 12. mangueira de entrada de água na bomba para seu acionamento |
| 4. registro de fechamento lento (1 polegada) | 13. mangueira de ejeção de água da bomba |
| 5. válvula de controle de pressão (1/2 polegada) | 14. reservatório da solução fertilizante |
| 7, 10 e 18. registros de fechamento rápido | 15. mangueira de injeção da solução fertilizante |
| 8. manômetro de Bourdon | 16. bomba injetora de fertilizante |

FIGURA 6. Esquema do cabeçal de controle com bomba injetora de fertilizante.

Tal como descrito para o tanque de fertilizante, foi utilizado o mesmo cabeçal de controle para instalação da bomba injetora.

Para operação do sistema com a bomba injetora, os seguintes aspectos diferiram em relação ao tanque de fertilizante:

Registro de fechamento (nº 2, Figura 6): mantido totalmente aberto.

Manômetro de Bourdon (nº 8, Figura 6): devido à necessidade de maior pressão para acionamento da bomba, a pressão controlada por meio deste manômetro foi de 4 kgf.cm^{-2} (392,2 kPa).

Reservatório de solução fertilizante (nº 14, Figura 6): foi utilizada uma caixa de cimento amianto aberta, com capacidade de 500 l.

Hidrômetro (nº 17, Figura 6): este hidrômetro instalado na mangueira de injeção de solução fertilizante, permitiu verificar o volume de solução injetada, e relacioná-lo ao volume ejetado pela bomba.

3.1.4. LINHA DE GOTEJADORES

A linha de gotejadores foi conectada ao final do cabeçal de controle e estendida em uma área externa ao Laboratório de Hidráulica. Nas Figuras 7 e 8 estão apresentados os detalhes da linha de gotejadores.



FIGURA 7. Aspecto da linha de gotejadores em um momento de coleta.

Para constituição da linha de gotejadores foi utilizado tubo de polietileno com 17 mm de diâmetro interno e 2 mm de espessura e gotejador de inserção sobre a linha ("on line"), internamente de longo percurso (labirinto) e desmontável, possibilitando limpeza. O tubo e gotejador procederam da indústria ASBRASIL (Aspersão no Brasil S/A).

O tubo foi perfurado com vazador manual a cada 0,25 m, tendo-se utilizado 210 gotejadores.

No sistema de irrigação utilizado no presente trabalho, a vazão média dos 210 gotejadores, à pressão de serviço de 10 m.c.a., calculada pelo volume marcado no hidrômetro da saída da central de controle foi de 3,238 l/h.

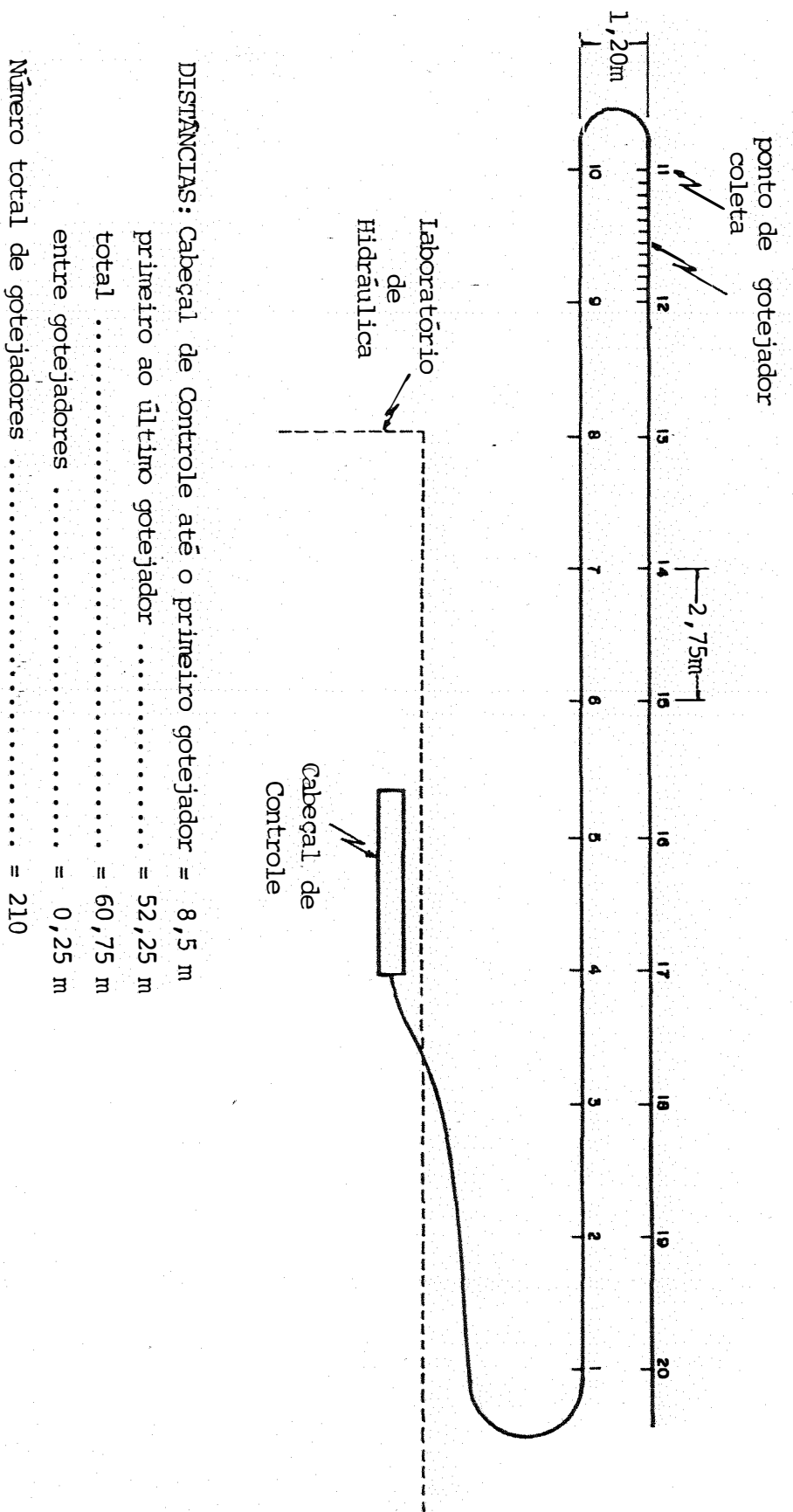


FIGURA 8. Esquema de linha de gotejadores.

Para estabelecimento do comprimento da linha de gotejadores, adotou-se o critério de KELLER & KARMELI (1975), o qual indica que o comprimento máximo da mesma deve ser tal que a perda de carga ocorrida entre os gotejadores extremos seja de 12% da pressão de serviço.

Esses mesmos autores determinaram que 3/4 da perda de carga ocorre do início da linha até a posição da pressão de serviço e que o restante da perda ocorre dessa posição até o final da linha.

Tendo-se adotado nesse trabalho pressão de serviço igual a 10 m.c.a. (98,06 kPa), a perda de carga permitida foi igual a 1,2 m.c.a. (11,77 kPa) e os valores de pressão no primeiro e último gotejadores foram 10,9 e 9,7 m.c.a. (106,9 e 95,12 kPa), respectivamente. Para ocorrência desses valores, por meio de tentativas, foi-se aumentando o número de gotejadores na linha e medindo-se a pressão nos pontos de inserção do primeiro e do último gotejador, com o manômetro de precisão (nº 7, Figura 4). Esse manômetro é padrão para aferição de outros manômetros, tem divisões de escala de 0,1 m.c.a. (0,98 kPa) e imprecisão de leitura de $\pm 0,5\%$. Encontrou-se a condição desejada para o comprimento de 52,25m, com 210 gotejadores.

O controle da pressão na linha foi feito com a válvula de regulação de pressão, localizada na saída do cabeçal de controle.

Também segundo KELLER & KARMELI (1975), a pressão de serviço ao longo de uma linha de gotejadores ocorre na posição de 39% do comprimento da mesma, a partir do primeiro gotejador instalado.

Baseando-se nessa informação, instalou-se uma tomada de pressão nessa posição, a fim de regular a pressão de serviço durante as fertirrigações utilizando-se do manômetro de precisão e da válvula de controle de pressão localizada no final do cabeçal de controle.

Conforme pode-se observar nas Figuras 7 e 8, para instalação da linha de gotejadores, utilizou-se como suporte dois fios de arame esticados em nível, distanciados lateralmente de 1,20 m.

Do primeiro ao décimo ponto de coleta, a linha foi fixada a um dos fios e do décimo primeiro até a extremidade final ao outro fio; esta disposição, formando um U entre o décimo e décimo primeiro ponto, permitiu que cada pessoa coletasse amostras em dois pontos ao mesmo tempo.

3.2. INJEÇÃO DE FERTILIZANTE POR DERIVAÇÃO DE FLUXO

3.2.1. EQUAÇÃO DE REGRESSÃO ENTRE DIFERENÇA DE PRESSÃO E VAZÃO DERIVADA

Para controle da vazão derivada ao tanque de fertilizante, em função da diferença de pressão existente entre os pontos de tomada de pressão, localizados antes e depois do registro de controle de vazão, foram correlacionados valores de pressão diferencial e vazão derivada, procedendo-se como descrito a seguir.

Fechando-se gradativamente o registro indicado com número 2 na Figura 4, conseqüentemente aumentando-se a diferença de pressão acusada no manômetro diferencial, obtiveram-se aumentos da vazão derivada para o tanque.

As vazões derivadas foram calculadas pelas leituras do hidrômetro localizado na tubulação da entrada do tanque, permitindo-se e interrompendo-se momentaneamente o fluxo através do registro de fechamento rápido localizado na tubulação de saída do tanque.

Foram relacionados 18 valores de diferença de pressão, de 0,02 até 1,40 m.c.a. (0,196 até 13,73 kPa) e correspondentes vazões derivadas, com quatro repetições.

Com esses dados obteve-se uma equação de regressão entre as variáveis citadas, a partir da qual, estimaram-se as vazões desejadas.

3.2.2. TEMPOS DE FERTIRRIGAÇÕES E INSTANTES DE COLETA DE AMOSTRAS

Para estabelecimento dos instantes de coleta de amostras de solução fertilizante, partiu-se da equação geral de diluição em que se enquadra a situação empregada neste trabalho, ou seja: tendo-se uma vazão constante passando por um reservatório de volume e concentração inicial conhecidos, considerando-se que ocorra mistura perfeita, a concentração neste reservatório em determinado tempo será dada pela eq. (2).

Deste modo, pode ser calculado o volume que passou pelo tanque até um determinado instante e a concentração teoricamente existente nesse instante.

Para o presente trabalho, estabeleceu-se que seriam coletadas amostras na saída do tanque e nos diversos pontos da linha de gotejadores, para três vazões derivadas ao tanque, sempre que teoricamente a concentração no tanque baixasse 10% em relação à concentração inicial (considerada 100%), definindo-se assim dez instantes de coleta.

SHANI (1981) recomenda que a relação entre o volume que deve passar pelo tanque (V) e o volume do tanque (v), seja no mínimo igual a quatro, para que se garanta boa solubilização do fertilizante e aplicação uniforme.

Adotando-se esse critério, a concentração final no tanque em relação à concentração inicial será de 1,83%. Para valores iguais ou inferiores a esse poder-se-á admitir finalizada a aplicação. No presente trabalho, adotou-se esse valor de concentração para definição do último (décimo) instante de coleta.

Conforme SHANI (1981) e SOIL CONSERVATION SERVICE (1968), o período de aplicação do fertilizante raramente deverá ser menor que 30 minutos, sendo aconselhável usar um período entre uma e duas horas.

Baseando-se nessa indicação, para este trabalho, adotaram-se três tempos de fertirrigação: 40, 80 e 160 minutos.

Uma vez que para os três tempos de fertirrigação o volume de solução aplicada foi constante ($4 \times 62 \text{ l} = 248 \text{ l}$), obtiveram-se três vazões de derivação, indicadas na Tabela 1. Nessa mesma tabela também estão apresentados os tempos de aplicação do fertilizante e respectivos instantes de coleta.

A redução da concentração relativa de fertilizante no tanque para os três valores de vazão e tempos de coleta de amostras marcados apenas para a vazão de 372 l/h , estão apresentados graficamente na Figura 9.

TABELA 1 - Instantes de coleta de amostras, para os tempos de fertirrigação e vazões de derivação.

Concentração relativa no tanque $(\frac{C_t}{C_o}) \cdot 100$	T = 40 min q = 372 l/h q/Q = 0,5470	T = 80 min q = 186 l/h q/Q = 0,2735	T = 160 min q = 93 l/h q/Q = 0,1367
100*	0'	0'	0'
90	1'03"	2'06"	4'13"
80	2'14"	4'28"	8'55"
70	3'34"	7'08"	14'16"
60	5'06"	10'13"	20'26"
50	6'56"	13'52"	27'44"
40	9'08"	18'20"	36'39"
30	12'02"	24'05"	48'10"
20	16'06"	32'11"	64'22"
10	23'02"	46'03"	92'06"
1,83	40'00"	80'00"	160'00"

* amostras coletadas somente no tanque

T = tempo de fertirrigação

q = vazão de derivação = V/T

Q = vazão do sistema = 680 l/h

V = volume que passa pelo tanque no tempo T = 248 l

C_t = concentração no tanque, em determinado momento

C_o = concentração inicial no tanque (100%).

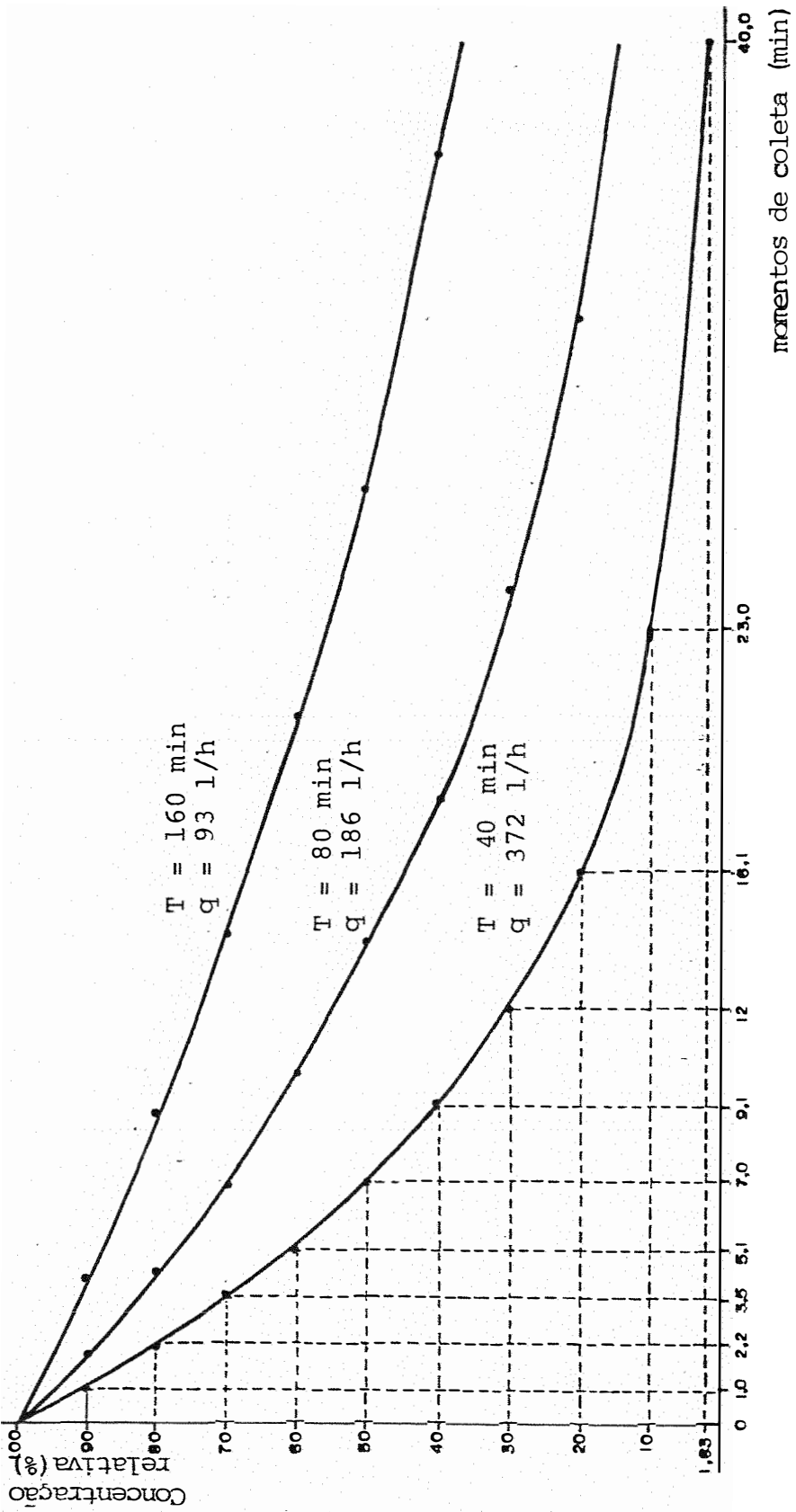


FIGURA 9. Instantes de coleta de amostras em relação à concentração relativa de fertilizante no tanque.

3.2.3. PRESSÃO E VAZÃO AO LONGO DA LINHA DE GOTEJADORES

Após estabelecido o comprimento da linha de gotejadores, conforme descrito em 3.1.3., utilizando-se manômetro de precisão (nº 7, Figura 4), determinou-se a distribuição da pressão ao longo da linha de gotejadores, medida no ponto de inserção dos 20 gotejadores destinados à coleta de amostras de solução fertilizante.

Nesses pontos determinaram-se também os valores de vazão, coletando-se o volume aplicado por cada gotejador durante dez minutos, com quatro repetições.

3.2.4. FERTILIZANTE E MANEJO DO SISTEMA PARA AS FERTIRRIGAÇÕES

3.2.4.1. FERTILIZANTE

Para estudo da distribuição de fertilizante com os sistemas de injeção, foi utilizado cloreto de potássio (KCl). Esse fertilizante apresenta alta solubilidade, pequena higroscopicidade, facilidade de análise e pouco problema de conservação de amostras em solução quando é necessário armazenamento.

Foi empregado KCl destinado ao uso agrícola, procedente da indústria FOSFANIL S/A, de natureza física farelada.

A análise desse fertilizante, realizada no Departamento de Química da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" em Piracicaba, a partir de amostra mantida em estufa a 105°C durante duas horas revelou teores de 61,3% de K_2O e 46,3% de Cl .

3.2.4.2. MANEJO DO SISTEMA

Para todas as fertirrigações, operou-se o sistema inicialmente apenas com água, regulando-se o registro de derivação de fluxo para se obter a vazão desejada em direção ao tanque, a qual fora previamente estabelecida. Em seguida, mantendo-se a posição encontrada para esse registro, interrompeu-se a operação, desligando-se a bomba.

Para colocação de fertilizante no tanque, inicialmente foram fechados os registros das tubulações de entrada e saída do mesmo e, então, transferida a quantidade pré-determinada de KCl ; em seguida, fez-se a complementação do volume do tanque com água e agitação da mistura. Após isso, uma amostra de solução foi retirada para análise da concentração inicial no tanque, fechando-se em seguida o mesmo.

Mantendo-se o tanque isolado da linha principal, por meio dos registros fechados, a bomba foi novamente acionada e aplicou-se apenas água até que toda a linha de gotejadores estivesse operando à pressão de serviço.

Estando posicionadas as pessoas para coleta de amostras na saída do tanque e ao longo da linha de goteja

dores, os registros de ligação do tanque ao sistema foram abertos e então iniciada a fertirrigação.

Decorrido o tempo total da fertirrigação, o tanque foi esgotado e lavado; para lavagem também de todo o sistema de irrigação, foi mantida a aplicação apenas de água durante mais 30 minutos.

3.2.5. PREVISÃO DAS CONCENTRAÇÕES A SEREM OBTIDAS E QUANTIDADES APLICADAS DE FERTILIZANTE

Anteriormente à realização das fertirrigações, analisou-se o teor de cloreto da água utilizada, o qual foi de 15 ppm. Esse mesmo resultado foi obtido para outras análises realizadas durante o transcorrer do experimento.

Baseando-se nesse valor e considerando-se que a aplicação seria realizada de tal modo que no final das fertirrigações a concentração média da solução na linha de gotejadores seria teoricamente de 30 ppm, calcularam-se as quantidades de KCl a serem colocadas no tanque, da seguinte maneira:

a) Para $T = 40$ minutos e $q = 372$ l/h

$$Q_1 = 308 \text{ l/h}$$

$$C_1 = 15 \text{ ppm}$$



$$q = 372 \text{ l/h}$$

$$C_{ft} = ?$$

onde,

Q_1 = vazão que passa pelo registro de derivação na linha principal

Q = vazão total do sistema de irrigação

q = vazão derivada ao tanque de fertilizante

C_1 = concentração natural de cloreto na água

C_{fg} = concentração final desejada na linha de gotejadores

C_{ft} = concentração necessária no tanque, no final da aplicação.

- Cálculo da concentração (C_{ft}) necessária no tanque no final da aplicação:

$$Q_1 \cdot C_1 + q \cdot C_{ft} = Q \cdot C_{fg} \Rightarrow C_{ft} = \frac{Q \cdot C_{fg} - Q_1 \cdot C_1}{q} \Rightarrow C_{ft} = 42,4 \text{ ppm}$$

- Sendo C_{ft} igual a 1,83% da concentração inicial no tanque (C_{it}), esta deverá ser:

$$C_{it} = \frac{100 \cdot 42,4}{1,83} = 2.317 \text{ ppm}$$

- Concentração inicial na linha de gotejadores (C_{ig})

$$Q_1 \cdot C_1 + q \cdot C_{it} = Q \cdot C_{ig} \Rightarrow C_{ig} = \frac{Q_1 \cdot C_1 + q \cdot C_{it}}{Q}$$

$$\Rightarrow C_{ig} = \frac{308 \times 15 + 372 \times 2317}{680} \Rightarrow C_{ig} = 1.274 \text{ ppm}$$

- Quantidade de Cl a ser colocado no tanque, com volume (v) = 62 ℓ

$$Cl = v \cdot C_{it} = 62 \text{ ℓ} \cdot 2317 \text{ ppm} = \frac{62000 \text{ ml} \cdot 2317 \text{ g}}{1.000.000 \text{ ml}} = 143,6 \text{ g}$$

Como o conteúdo de Cl contido na água para enchimento do tanque é de 0,9 g, a quantidade de Cl será = 142,7 g.

- Quantidade (peso seco) de KCl (46,3% de Cl) a ser colocado no tanque

$$KCl = \frac{Cl \cdot 100}{46,3} = \frac{142,7 \cdot 100}{46,3} = 308,2 \text{ g}$$

Por analogia ao item a, obteve-se:

b) Para $T = 80$ minutos e $q = 186$ l/h

- Concentração (C_{ft}) necessária no tanque, no final da aplicação = 69,8 ppm.

- Concentração inicial no tanque (C_{it}) = 3.814,2 ppm.

- Concentração inicial na linha de gotejadores (C_{ig}) = 1.054,2 ppm.

- Quantidade de KCl a ser colocado no tanque = 508,8 g.

c) Para $T = 160$ minutos e $q = 93$ l/h

- Concentração (C_{ft}) necessária no tanque, no final da aplicação = 124,7 ppm.

- Concentração inicial no tanque (C_{it}) = 6.812,9 ppm.

- Concentração inicial na linha de gotejadores (C_{ig}) = 944,7 ppm.

- Quantidade de KCl a ser colocado no tanque =
910,3 g.

3.3. INJEÇÃO DO FERTILIZANTE COM BOMBA

3.3.1. CONTROLE DA TAXA DE INJEÇÃO

A taxa de injeção é proporcional à frequência de golpes e curso do pistão da bomba. A frequência pode ser regulada com um registro localizado na mangueira de entrada de água na bomba, controlando-se a vazão.

No presente trabalho determinou-se a relação ejeção/injeção da bomba, fazendo-se medições dos volumes de ejeção e injeção resultantes de dez golpes do pistão, repetindo-se quatro vezes.

Para tal, o volume ejetado foi coletado em um recipiente de 20 l e medido com proveta graduada; o volume de injeção correspondente foi medido com o hidrômetro localizado na tubulação de injeção.

Uma vez determinada a relação ejeção/injeção, por tentativas, controlando-se a vazão de entrada de água na bomba, regulou-se para 11,15 golpes/minuto a frequência de golpes, correspondendo à taxa de injeção de 372 l/h.

3.3.2. TEMPO DE FERTIRRIGAÇÃO E INSTANTES DE COLETA DE AMOSTRAS

O tempo de fertirrigação utilizado empregando-se a bomba injetora foi de 40 minutos com taxa de aplicação

de 372 l/h, injetando-se 248 litros de solução.

Durante a fertirrigação as amostras de solução fertilizante foram coletadas nos seguintes instantes: 1, 2, 4, 8, 16, 24, 32, 40, 42 e 44 minutos.

3.3.3. MANEJO DO SISTEMA PARA FERTIRRIGAÇÃO

Para todas as fertirrigações operou-se inicialmente o sistema com a bomba injetora succionando apenas água, controlando-se a pressão estabelecida de 4 kgf/cm² (392,2 kPa).

Usando-se o registro na entrada da bomba, um marcador de golpes instalado na mesma e um cronômetro, regulou-se a frequência de golpes.

Em seguida, sem interromper a irrigação, fechou-se o registro de acionamento rápido instalado na saída da bomba e transferiu-se a mangueira de sucção para o reservatório de solução fertilizante.

Abrindo-se o registro da saída da bomba, iniciou-se a fertirrigação, coletando-se as amostras nos instantes programados.

Decorridos 40 minutos de injeção de solução à rede de irrigação, voltou-se novamente a mangueira de sucção para um reservatório contendo apenas água.

Para coletar amostras nos dois últimos instantes e lavagem do sistema, a irrigação foi mantida até 60 minutos.

3.3.4. PREVISÃO DAS CONCENTRAÇÕES A SEREM OBTIDAS

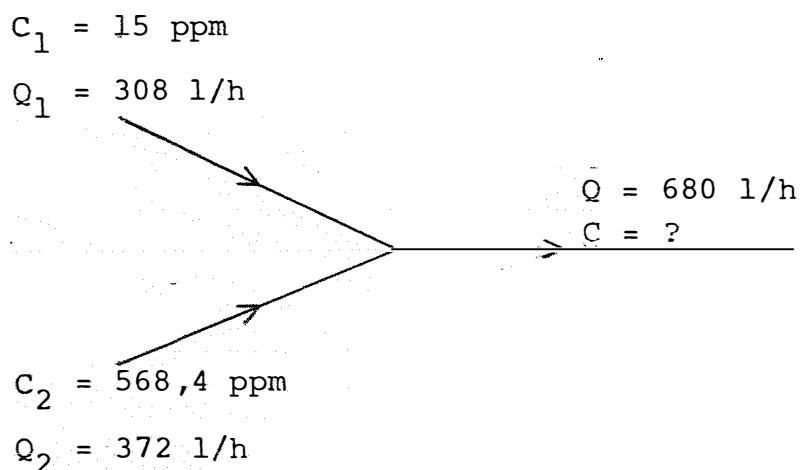
No preparo da solução fertilizante, utilizou-se a mesma quantidade de KCl empregada para a injeção realizada com derivação de fluxo.

Para a aplicação correspondente realizada com derivação de fluxo, com vazão de 372 l/hora e tempo de 40 minutos, a quantidade de cloreto contido no tanque foi de 143,6g e no final da aplicação restou 1,83% desta quantidade.

Assim, a quantidade de cloreto injetada foi $0,9817 \times 143,6 = 140,97$ g.

Como o volume de solução injetada é de 248 l, a concentração da solução foi de 568,4 ppm.

Tendo-se essa concentração no reservatório de fertilizante, a previsão da concentração na linha de gotejadores foi calculada da seguinte maneira:



$$15 \times 308 + 568,4 \times 372 = 680 C$$

$$C = 317,8 \text{ ppm}$$

onde,

C_1 = concentração de cloreto na água de irrigação

C_2 = concentração de cloreto no reservatório de solução fertilizante

C = concentração prevista na linha de gotejadores

Q_1 = vazão não derivada à bomba

Q_2 = vazão de solução injetada

Q = vazão total do sistema ($Q_1 + Q_2$).

3.3.5. SOLUÇÃO FERTILIZANTE

Embora se tenha injetado 248 l de solução, o volume de solução preparado para cada injeção foi de 300 l, possibilitando a sucção da mesma até o final da fertirrigação. O volume não aplicado foi descartado.

3.4. COLETA E ANÁLISE DE AMOSTRAS

As amostras de solução de KCl foram tomadas durante 20 segundos para cada instante de amostragem, totalizando aproximadamente 20 ml, sendo coletadas em recipientes de vidro com capacidade de 50 ml.

Em cada fertirrigação com derivação de fluxo as amostras foram tomadas na saída do tanque e nos 20 pontos ao longo da linha de gotejadores, por 11 pessoas, indicando-se os dez instantes de amostragem com um cronômetro. Para as fertirrigações com bomba injetora as amostras foram

tomadas apenas nos 20 pontos de coleta, por dez pessoas.

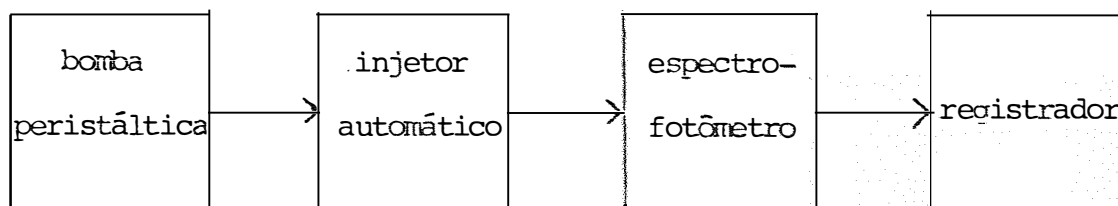
As amostras de solução de KCl foram analisadas no Laboratório de Análises de Águas e Plantas, no Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA) em Piracicaba.

Uma vez que tanto o potássio como o cloreto são bons elementos indicadores da fase dispersa da solução e como o resultado obtido para o presente estudo deve ser semelhante para ambos, analisou-se apenas o cloreto. Para tal, utilizou-se sistema de injeção em fluxo, seguindo-se recomendações de ZAGATTO *et alii* (1981).

Esse método baseia-se na reação entre cloreto e tiocianato de mercúrio, com liberação de ions tiocianatos, os quais, em presença de ions fêrricos, formam o complexo colorido tiocianato fêrrico, a ser medido.

O preparo da solução reagente consistiu de: 30 g de nitrato fêrrico [$\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$], 0,626 g de tiocianato de mercúrio [$\text{Hg}(\text{SCN})_2$] e 6 ml de ácido nítrico (HNO_3) concentrado (6N), completando-se o volume a um litro com água destilada.

A montagem do sistema de análises foi realizada conforme esquema a seguir.



A determinação dos teores de cloreto foi baseada em padrões de concentração conhecida, preparados com NaCl, com registro de picos em triplicata, conforme ilustrado a seguir, na Figura 10.

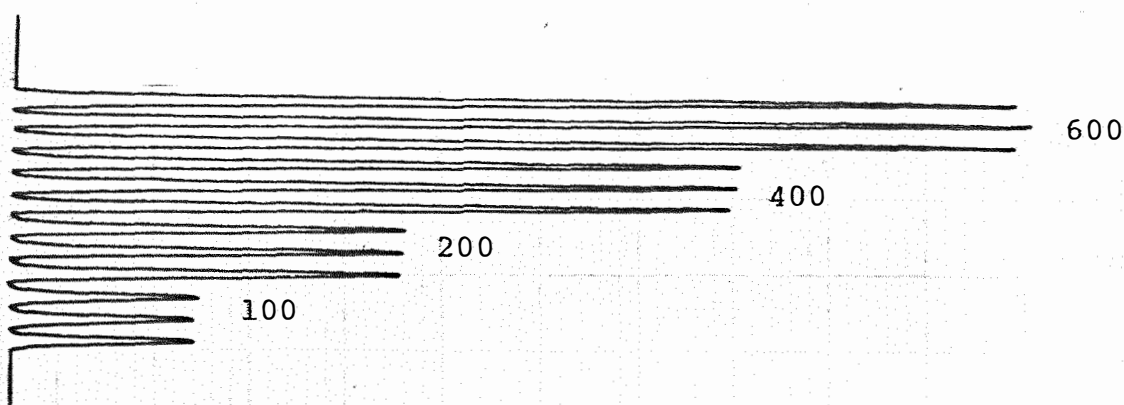


FIGURA 10. Valores registrados para determinação de cloreto em soluções padrões de concentrações de 100, 200, 400 e 600 ppm.

Os picos de análises de amostras foram obtidos em duplicata e a estimativa dos teores médios de cloreto feita por meio de equação de regressão. Para soluções padrão, utilizando computador, obtiveram-se as equações de regressão, como exemplificado a seguir com os dados da Figura 10.

grau do polinômio = 2

coeficientes do polinômio:

coef. de grau 0 = 24,5864

coef. de grau 1 = 2,8300

coef. de determinação = 0,999989

Comprimento médio de picos (mm)	Concentração (ppm)		Desvio (ppm)
	esperada	estimada	
24	100	99,6	- 0,4
51	200	200,9	0,9
94	400	399,2	- 0,8
130	600	600,3	0,3

3.5. UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DO FERTILIZANTE

Para análise da uniformidade de distribuição do fertilizante aos diversos pontos da linha de gotejadores, as quantidades totais calculadas para os mesmos foram avaliadas usando-se o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (C.U.C.), conforme eq. (3), apresentada no item 2.5.

3.6. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para facilidade de aplicação do fertilizante e coleta de amostras, o sistema de irrigação foi utilizado

com apenas uma linha de gotejadores.

Deste modo, para efeito de repetições, todas fertirrigações estudadas foram efetuadas três vezes, realizando-as em dias diferentes.

Uma vez que para cada aplicação as condições foram as mesmas para os diferentes pontos a serem comparados, o experimento foi analisado em blocos ao acaso e fez-se comparação de médias pelos testes F, t e Tukey, com o seguinte esquema de análise de variância:

causas de variação	graus de liberdade
blocos	2
tratamentos (regressões)	19
resíduo	38
total	59

Foram considerados como tratamentos as distâncias dos pontos de coleta ao início da linha de gotejadores e os blocos corresponderam às repetições.

Como a montagem deste experimento não satisfez inteiramente às condições de casualização e independência de tratamentos, as análises mais apropriadas para o mesmo foram realizadas por meio de regressões. A comparação entre equações de regressão foi realizada segundo DIXON & MASSEY JR. (1969).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para facilitar a exposição, a apresentação e a discussão dos resultados obtidos foram feitas em itens distintos.

4.1. PRESSÃO NA LINHA DE GOTEJADORES

Na Figura 11 estão apresentados os valores de pressão medidos na linha de gotejadores.

Com estes valores traçou-se a curva de perda de carga (H), ocorrida ao longo da linha.

Observando-se esta figura, verifica-se que, do início da linha até a posição de pressão de serviço, a perda de carga ocorrida foi de $0,75.H$ e deste ponto até o final da linha foi de $0,25.H$.

Esses valores são semelhantes aos citados por KELLER & KARMELI (1975) que indicam $0,77.H$ e $0,23.H$ para os respectivos trechos.

Pode-se observar também que tal como indicado por estes autores, estabeleceu-se perda de carga total igual a $11,76 \text{ kPa}$, correspondendo a 12% da pressão de serviço ($98,06 \text{ kPa}$). Por outro lado, a pressão de serviço preestabelecida

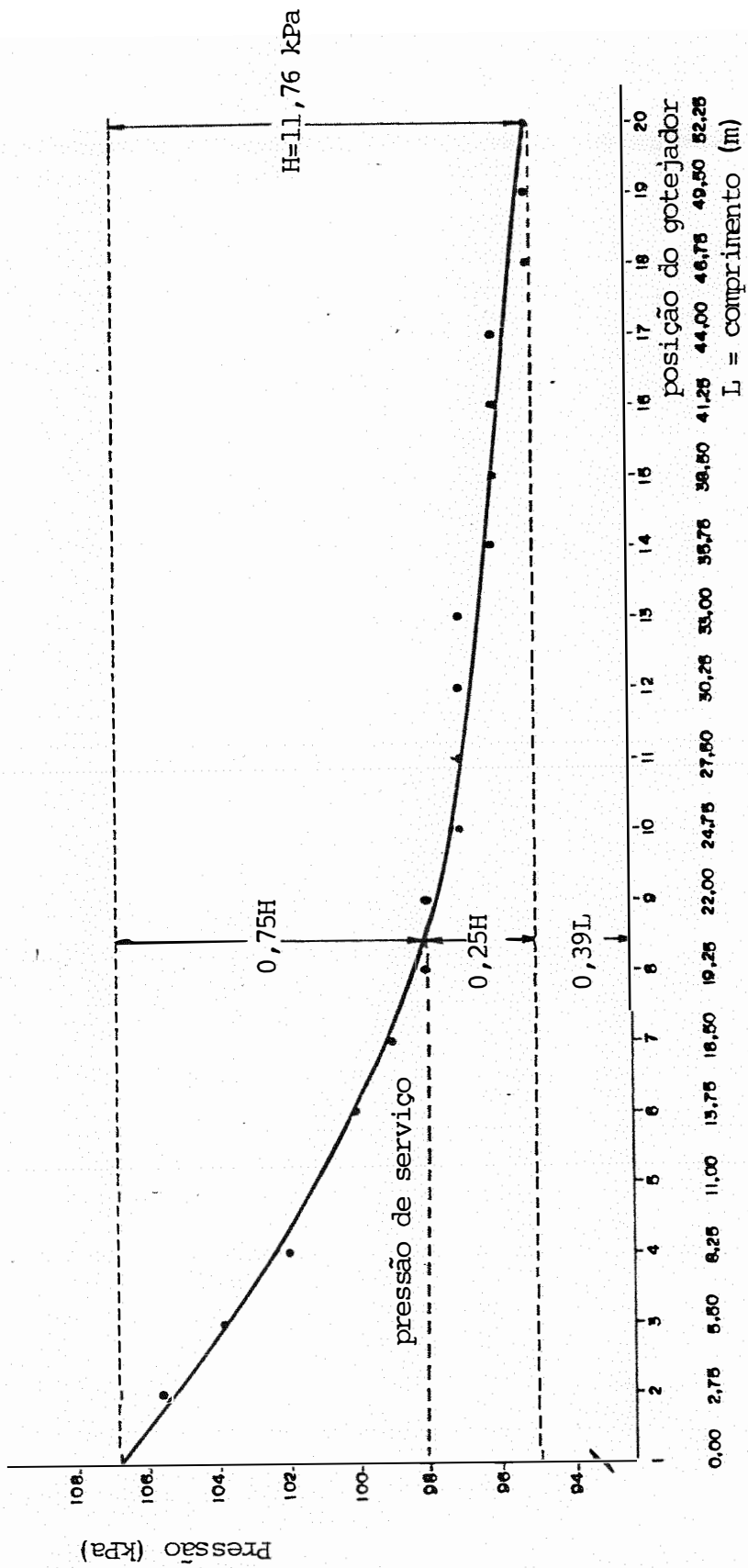


FIGURA 11. Distribuição da perda de carga ao longo da linha de gotejadores.

ocorreu em posição correspondente a 39% do comprimento total da linha, concordando plenamente com KELLER & KARMELI (1975) que citam essa mesma posição.

4.2. VAZÃO NA LINHA DE GOTEJADORES

Os valores de vazão medidos nos pontos de amostragem da linha de gotejadores, bem como curva e equação de regressão obtidas, estão apresentados na Figura 12.

Verificando-se esta figura, observa-se que a equação de regressão tem modelo exponencial. Esta equação foi adotada por ter apresentado o maior coeficiente de determinação (r^2), quando comparado com coeficientes de outros modelos testados. Porém, este modelo se aproximou bastante do linear.

Com a equação obtida, estimaram-se as vazões para os diversos pontos de amostragem, utilizando-as posteriormente para determinação de volumes de solução aplicados durante as fertirrigações.

4.3. INJEÇÃO POR DERIVAÇÃO DE FLUXO

4.3.1. DIFERENÇA DE PRESSÃO E VAZÃO DERIVADA

Conforme descrito em 3.2.1., na Figura 13 estão apresentados os valores de diferença de pressão e vazões derivadas, bem como curva e equação de regressão obtidas a partir destes valores.

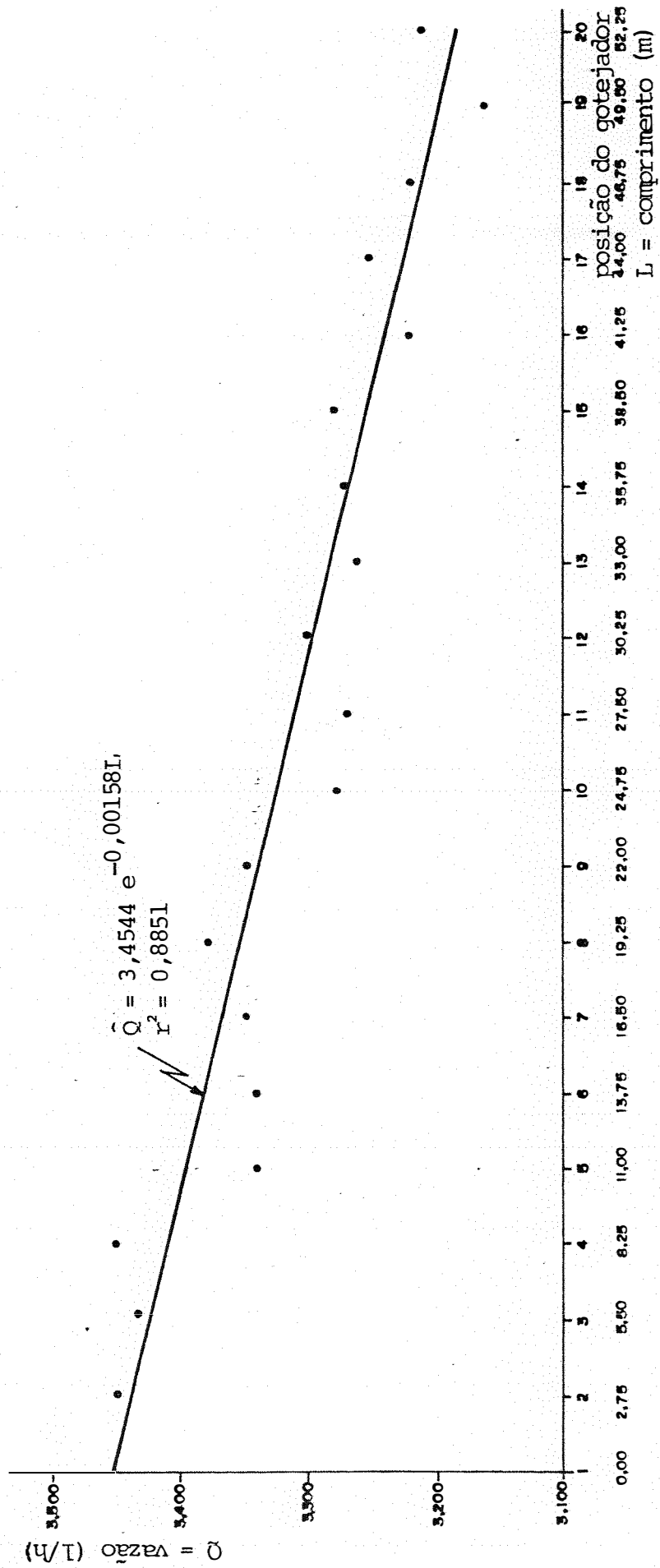


FIGURA 12. Curva e equação de regressão entre vazão e posição do gotejador na linha.

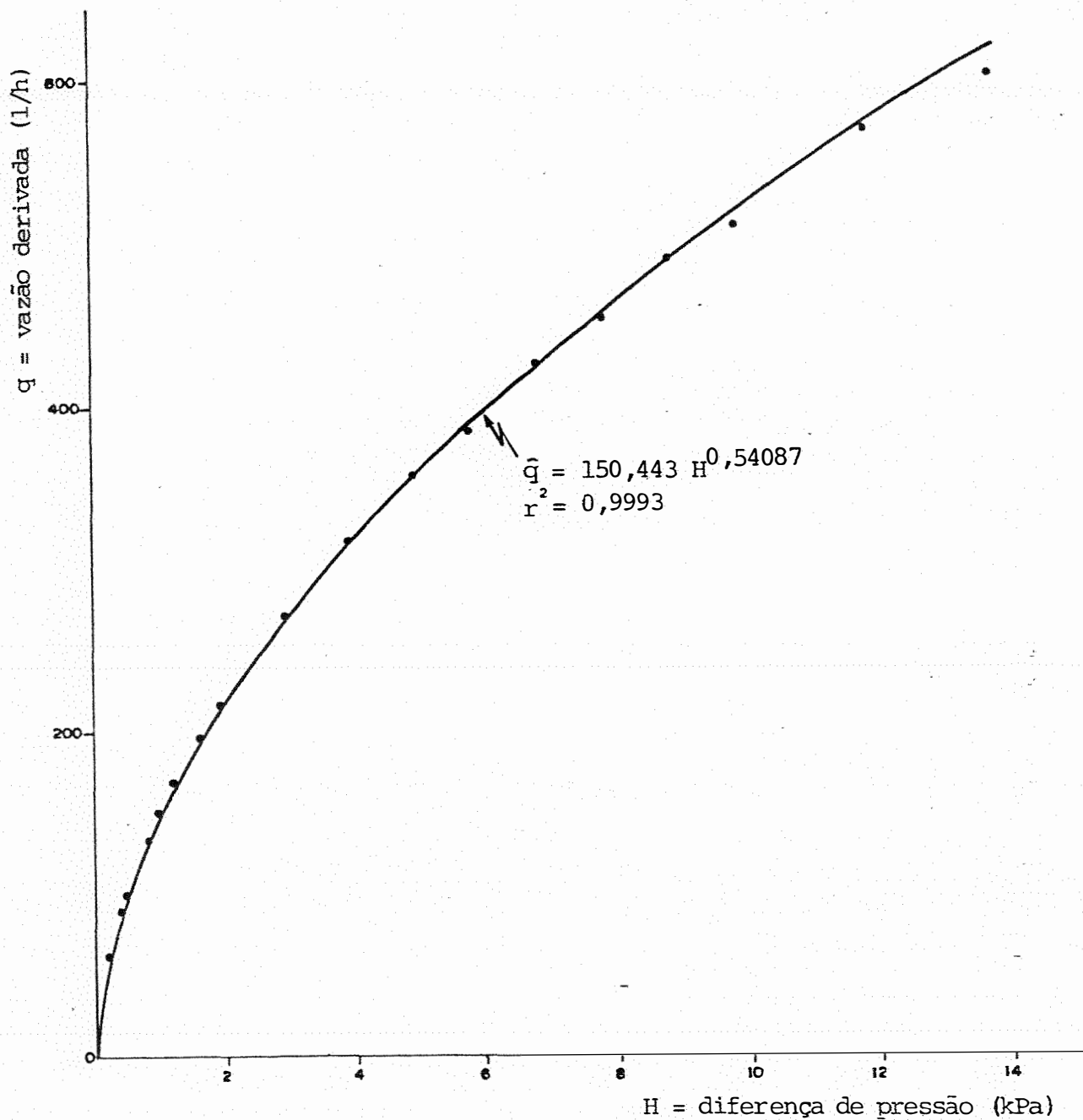


FIGURA 13. Curva e equação de regressão entre diferença de pressão e vazão derivada.

Analisando-se a equação ajustada, verifica-se que o coeficiente de determinação é 0,9993, indicando que os valores estimados representam bem os valores reais.

Por outro lado, a equação obtida assemelha-se ao modelo $q = K.H^{0,5}$, sendo que K deve assumir valores diferentes para cada instalação do sistema de fertirrigação. Esse modelo representa a equação de vazão em orifícios obtida a partir do Teorema de Torricelli, indicando que a vazão é proporcional à raiz quadrada da pressão.

A equação de regressão ($\hat{q} = 150,443 H^{0,54087}$) foi comparada ao modelo $q = KH^{0,5}$, confrontando-se seus expoentes pelo teste t. Esse teste indicou que os expoentes não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5% de pro babilidade.

4.3.2. TEORES DE CLORETO

Os teores de cloreto obtidos nas amostras co letadas na saída do tanque e nos 20 pontos da linha de gote jadores, para os instantes estabelecidos, estão apresentados nas Tabelas 2 a 4.

TABELA 2 - Teor médio de cloreto (ppm), obtido com vazão de derivação de 372 l/h e tempo de fertirrigação de 40 minutos.

Ponto	Instante de Coleta										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Distância (m)	Tempo (minutos)										
	0,00	1,05	2,23	3,57	5,10	6,93	9,13	12,03	16,10	23,03	40,00
Tanque	2356**	2208	1798	1508	1302	1133	881	659	418	207	62
1 0,00		1028	1057	966	831	708	543	430	265	134	41
2 2,75		1024	1048	968	816	711	543	424	263	135	41
3 5,50		1011	1053	972	816	716	544	434	270	136	41
4 8,25		1002	1059	987	824	728	548	435	270	138	41
5 11,00		996	1072	997	818	732	549	432	271	139	41
6 13,75		949	1082	1012	833	744	561	437	275	139	41
7 16,50		892	1082	1025	843	744	558	437	280	138	41
8 19,25		834	1082	1037	843	747	565	440	284	140	42
9 22,00		733	1077	1037	857	762	567	448	288	140	42
10 24,75		636	1091	1040	877	767	577	452	293	141	42
11 27,50		500	1093	1063	879	772	580	456	293	143	42
12 30,25		271	1040	1062	887	790	585	464	295	143	42
13 33,00		108	1045	1082	910	797	589	472	302	143	42
14 35,75		26	1051	1104	923	805	601	474	301	142	42
15 38,50		15*	1031	1119	935	823	608	481	310	146	43
16 41,25		15*	908	1143	943	841	620	488	312	150	43
17 44,00		15*	602	1142	977	863	635	497	320	154	44
18 46,75		15*	167	1124	1028	896	673	507	327	160	45
19 49,50		15*	15*	928	1090	946	696	555	351	172	46
20 52,25		15*	15*	15*	156	861	864	756	511	267	61

* teor natural da água

** teor inicial no tanque

TABELA 3 - Teor médio de cloreto (ppm), obtido com vazão de derivação de 186 l/h e tempo de fertirrigação de 80 minutos.

Ponto	Instante de Coleta										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Distância (m)	Tempo (minutos)										
	0,00	2,10	4,47	7,13	10,22	13,87	18,33	24,08	32,18	46,05	80,00
Tanque	3885 ^{**}	3438	3015	2611	2198	1853	1494	1077	727	358	71
1 0,00		973	847	764	646	582	469	361	235	111	31
2 2,75		967	856	764	648	582	468	360	235	112	31
3 5,50		970	867	763	657	584	472	364	232	114	31
4 8,25		969	873	766	667	587	475	374	233	112	31
5 11,00		970	872	774	679	594	475	377	236	112	31
6 13,75		979	882	775	681	595	478	380	235	112	31
7 16,50		994	887	777	685	594	485	374	237	112	31
8 19,25		998	888	780	692	594	484	374	241	116	31
9 22,00		1003	889	783	696	593	484	391	245	118	31
10 24,75		1006	897	778	718	594	488	377	243	118	31
11 27,50		1003	910	780	724	595	497	371	244	119	31
12 30,25		989	904	776	725	598	499	374	245	119	31
13 33,00		975	909	770	728	598	497	373	247	119	31
14 35,75		926	910	789	737	604	503	376	246	121	32
15 38,50		798	907	794	741	618	514	378	248	122	33
16 41,25		514	921	803	750	616	510	382	258	123	33
17 44,00		98	925	820	764	614	521	384	262	125	33
18 46,75		15 [*]	933	853	773	612	532	394	266	128	33
19 49,50		15 [*]	959	862	781	623	552	402	280	134	34
20 52,25		15 [*]	15 [*]	705	852	707	636	468	343	164	40

* teor natural da água

** teor inicial no tanque

TABELA 4 - Teor médio de cloreto (ppm), obtido com vazão de derivação de 93 l/h e tempo de fertirrigação de 160 minutos.

Ponto	Instante de Coleta										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Distância (m)	Tempo (minutos)										
	0,00	4,22	8,92	14,27	20,43	27,73	36,65	48,17	64,37	92,10	160,00
Tanque	7014 *	6143	5476	4737	4064	3362	2604	1892	1288	640	134
1 0,00		908	796	686	568	473	388	264	182	92	42
2 2,75		908	800	686	568	473	388	266	182	92	42
3 5,50		908	804	686	568	473	388	266	182	92	42
4 8,25		908	806	686	568	473	388	266	183	92	42
5 11,00		908	808	686	572	473	388	267	184	92	42
6 13,75		908	810	686	572	473	388	269	185	92	42
7 16,50		912	818	686	572	476	388	269	186	92	42
8 19,25		912	820	688	572	476	388	269	187	92	42
9 22,00		914	832	690	572	476	391	271	188	93	42
10 24,75		914	834	692	572	476	392	272	188	93	42
11 27,50		946	840	694	572	476	394	272	188	93	42
12 30,25		950	840	694	572	476	396	273	189	93	42
13 33,00		972	840	703	584	476	398	273	191	93	42
14 35,75		975	840	707	585	476	400	273	192	95	42
15 38,50		984	840	712	588	476	402	280	194	95	42
16 41,25		988	840	716	592	476	408	281	194	95	42
17 44,00		1006	848	716	596	476	414	284	195	95	42
18 46,75		1006	850	719	596	488	414	295	196	98	43
19 49,50		941	864	757	608	504	416	305	198	101	43
20 52,25		36	836	804	638	544	454	344	212	107	45

* teor inicial no tanque

4.3.2.1. TEORES NO TANQUE DE FERTILIZANTE

Com os teores de cloreto obtidos de amostras coletadas na saída do tanque (Tabelas 2 a 4), foram calculadas as concentrações relativas nos diversos instantes de coleta, para os tempos de fertirrigação de 40, 80 e 160 minutos. Esses valores de concentração relativa e equações de regressão estão apresentados na Tabela 5.

Com os dados apresentados na Tabela 5, usando-se as médias dos tempos de fertirrigação, construiu-se a Figura 14.

Analisando-se os dados e equações de regressão obtidos, apresentados na Tabela 5 e Figura 14, verifica-se que os valores de concentração relativa reduziram com o aumento do volume derivado (V), porém, estas reduções foram cada vez menores com o transcorrer do tempo, apresentando comportamento exponencial.

Pode-se descrever matematicamente este processo por meio de uma equação diferencial.

Seja:

$y(t)$ = concentração relativa no instante t

$\frac{dy}{dt}$ = taxa de variação da concentração relativa em relação ao tempo,

sendo que $\frac{dy}{dt}$ é proporcional a y

TABELA 5 - Concentrações relativas médias de cloreto para diversos valores de V (volume que passou pelo tanque)/v (volume do tanque).

$\frac{V}{v}$	y = concentração relativa (%)				média $\underline{d/}$
	tempo de fertirrigação				
	40 min $\underline{a/}$	80 min $\underline{b/}$	160 min $\underline{c/}$		
0,000	100,0	100,0	100,0	100,0	
0,105	93,7	88,5	87,6	89,9	
0,223	76,3	77,6	78,1	77,3	
0,357	64,0	67,2	67,5	66,2	
0,511	55,3	56,6	57,9	56,6	
0,693	48,1	47,7	47,9	47,9	
0,916	37,4	38,4	37,1	37,6	
1,204	28,0	27,7	27,0	27,6	
1,609	17,7	18,7	18,4	18,3	
2,302	8,8	9,2	9,1	9,0	
4,000	2,6	1,8	1,9	2,1	
$\underline{a/} \hat{y}_2 = 90,9991e^{-0,9343V/v}$ $r^2 = 0,9907$		$\underline{b/} \hat{y}_2 = 96,1899e^{-1,0047V/v}$ $r^2 = 0,9995$			
$\underline{c/} \hat{y}_2 = 95,2271e^{-0,9959V/v}$ $r^2 = 0,9987$		$\underline{d/} \hat{y}_2 = 93,9515e^{-0,9757V/v}$ $r^2 = 0,9974$			

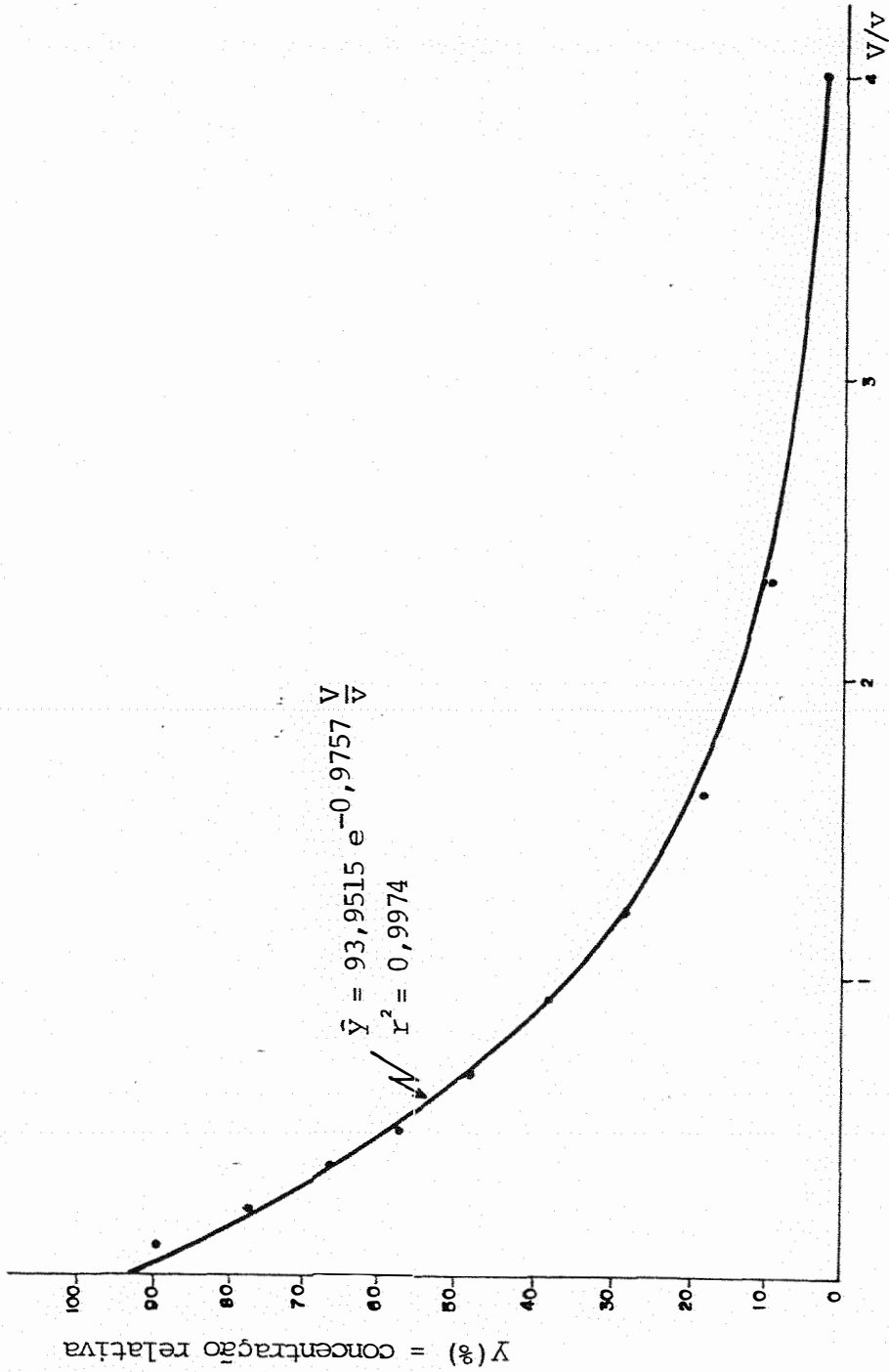


FIGURA 14. Curva e equação de regressão estimadas, para concentração relativa no tanque versus a relação V/v = volume que passou pelo tanque / v = volume do tanque.

Então:

$$\frac{dy}{dt} = -Ky \quad (4)$$

onde:

- K = constante de proporcionalidade = $\frac{q}{v}$
- q = vazão derivada para o tanque de fertilizante
- v = volume do tanque.

A eq. (4) trata-se de uma equação diferencial ordinária de primeira ordem.

Se essa equação possui uma solução $y(t)$, sua derivada deve ser proporcional a y . Isso também é válido para as funções exponenciais.

De maneira geral, a função e^{-Kt} pode ser escrita como:

$$y(t) = C \cdot e^{-Kt} \quad (5)$$

onde C é uma constante genérica.

Essa equação é uma solução geral da eq. (4).

Considerando-se a concentração inicial presente no tanque igual a 100, tem-se que definir C , de modo que para $t = 0$, $y = 100$.

Assim,

$$y(0) = C \cdot e^{-K \cdot 0} = 100, \text{ ou } C = 100.$$

Empregando-se esse valor de C, a eq. (5) se transforma em $y(t) = 100 \cdot e^{-Kt}$.

$$\text{Sendo } K = \frac{q}{v},$$

$$y(t) = 100 \cdot e^{-q/v \cdot t}$$

Como $q \cdot t = V$ (volume derivado), tem-se:

$$y(t) = 100 \cdot e^{-V/v} \quad (6)$$

As médias de concentrações relativas dos três tempos de fertirrigação, apresentadas na Tabela 5, foram submetidas à análise de regressão na forma $\hat{y} = \hat{a} \cdot e^{bx}$.

Essa equação foi linearizada aplicando-se o logaritmo, assumindo a forma $\ln \hat{y} = \ln \hat{a} + bx$, que pode ser reescrita como $y = a + bx$, onde $x = \frac{V}{v}$.

A análise de regressão dos valores observados apresentou os seguintes resultados:

coeficiente de determinação (r^2)	=	0,998
coeficiente angular (b)	=	-0,976
coeficiente linear (a)	=	4,543
variância total	=	1,231
variância explicada	=	1,228
variância inexplicada	=	0,003
equação de regressão : $\hat{y} = 93,9515 e^{-0,976 \frac{V}{v}}$		

Essa equação de regressão foi comparada estatisticamente com a eq. 6, com o teste t, confrontando-se os coeficientes angulares e lineares. Não se verificaram diferenças significativas entre os parâmetros testados, ao nível de 5% de probabilidade, indicando que a equação de regressão obtida não diferiu estatisticamente da equação teórica ($y = 100 \cdot e^{-V/v}$).

4.3.2.2. TEORES NA LINHA DE GOTEJADORES

O avanço da solução fertilizante na tubulação ocorre por difusão e transporte de massa; a difusão depende do gradiente de concentração e o transporte de massa se dá devido ao fluxo.

Analisando-se a Tabela 2, verifica-se que para taxa de injeção de 372 l/h, até os primeiros instantes de coleta a solução injetada avançou ao longo da linha, porém, ainda não havia atingido o final da mesma. O alcance do final da linha ocorreu entre os momentos 3 e 4, isto é, entre 3,57 e 5,10 minutos.

Por outro lado, pode-se verificar principalmente a partir de 9,13 minutos que, com o transcorrer da fertirrigação, os maiores teores de cloreto foram obtidos nos últimos pontos de amostragem. Isso indica um acúmulo do fertilizante no final da linha devido à extremidade da mesma, após o último gotejador, ter sido mantida fechada.

Com taxa de injeção de 186 l/h (Tabela 3), a solução fertilizante atingiu o último gotejador logo após o

instante 2 (4,47 minutos); de 10,22 minutos até o final da fertirrigação, nota-se também o acúmulo do fertilizante na extremidade final da linha.

Para a taxa de injeção de 93 ℓ/h (Tabela 4), pode-se notar que a solução fertilizante atingiu o final da linha próximo de 4,22 minutos. Evidenciaram-se também maiores teores de cloreto no final da linha, a partir de 14,27 minutos, revelando acúmulo.

Comparando-se as três taxas de injeção, analisando-se conjuntamente as Tabelas 2, 3 e 4, verifica-se que para os três casos o tempo decorrido do início da aplicação do fertilizante até chegar na extremidade da linha foi praticamente o mesmo, ou seja, em torno de cinco minutos.

Esse comportamento indica que a velocidade de caminhamento da solução injetada independeu da taxa de aplicação (vazão derivada ao tanque). Uma vez que para cada taxa de aplicação utilizou-se determinada concentração de cloreto, pode-se deduzir que as diferenças de concentração não evidenciaram variações no processo de difusão.

Ainda comparando-se as três vazões de derivação, para todas elas, após a solução fertilizante ter atingido toda a extensão da linha, os últimos pontos mantiveram-se com maiores teores de cloreto, revelando acúmulo na extremidade final da linha de gotejadores.

4.3.3. QUANTIDADE APLICADA DE CLORETO

Com os dados de concentração de cloreto, apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4, considerando-se os intervalos de tempo entre os consecutivos instantes de coleta, calcularam-se as quantidades aplicadas de cloreto, da seguinte maneira:

$$\text{Quantidade de cloreto (g)} = \frac{q \cdot t \cdot c}{1000} \quad (7)$$

onde,

q = vazão do gotejador no ponto considerado, em l/hora
(Figura 12)

t = intervalo de tempo entre o instante considerado e o instante anterior (horas)

c = concentração (ppm).

As quantidades aplicadas, resumidas como médias de três repetições, estão apresentadas a seguir nas Tabelas 6, 7 e 8, para as vazões de derivação de 372, 186 e 93 l/hora, respectivamente.

Como se pode verificar nestas tabelas, efetuou-se o somatório das quantidades em cada intervalo de tempo, tendo-se os totais resultantes de todo período de fertirrigação para os diversos pontos de coleta.

Esses totais de cloreto foram analisados estatisticamente através dos testes F e Tukey, bem como submetidos a análises de regressão.

TABELA 6 - Quantidade média aplicada de cloreto (g), entre os instantes de coleta, para vazão de derivação de 372 l/h e tempo de fertirrigação de 40 minutos.

Ponto	Distância (m)	Instante de coleta de amostras (minutos)										Total
		1,05	2,23	3,57	5,10	6,93	9,13	12,03	16,10	23,03	40,00	
		Intervalo entre os instantes (horas)										
		0,0175	0,0197	0,0223	0,0255	0,0305	0,0367	0,0483	0,0678	0,1155	0,2828	
1	0,00	0,062	0,072	0,074	0,073	0,074	0,069	0,072	0,062	0,053	0,040	0,651
2	2,75	0,062	0,071	0,074	0,072	0,074	0,068	0,070	0,061	0,054	0,040	0,646
3	5,50	0,060	0,071	0,074	0,071	0,075	0,068	0,072	0,063	0,054	0,040	0,648
4	8,25	0,060	0,071	0,075	0,072	0,076	0,068	0,072	0,062	0,054	0,040	0,650
5	11,00	0,059	0,072	0,075	0,071	0,076	0,068	0,071	0,061	0,054	0,040	0,647
6	13,75	0,056	0,072	0,076	0,072	0,077	0,070	0,071	0,063	0,054	0,039	0,650
7	16,50	0,052	0,072	0,077	0,072	0,076	0,069	0,071	0,064	0,054	0,039	0,646
8	19,25	0,049	0,071	0,077	0,072	0,076	0,069	0,071	0,064	0,054	0,040	0,643
9	22,00	0,043	0,071	0,077	0,073	0,078	0,069	0,072	0,065	0,054	0,039	0,641
10	24,75	0,037	0,071	0,077	0,074	0,078	0,070	0,072	0,066	0,054	0,039	0,638
11	27,50	0,029	0,071	0,078	0,074	0,078	0,070	0,073	0,066	0,055	0,039	0,633
12	30,25	0,016	0,067	0,078	0,074	0,079	0,071	0,074	0,066	0,054	0,039	0,618
13	33,00	0,006	0,067	0,079	0,076	0,080	0,071	0,075	0,067	0,054	0,039	0,614
14	35,75	0,002	0,067	0,080	0,077	0,080	0,072	0,075	0,066	0,054	0,039	0,612
15	38,50	0,001	0,066	0,081	0,077	0,082	0,072	0,076	0,068	0,055	0,039	0,617
16	41,25	0,001	0,058	0,082	0,078	0,083	0,074	0,076	0,068	0,056	0,039	0,615
17	44,00	0,001	0,038	0,082	0,080	0,085	0,075	0,077	0,070	0,058	0,040	0,606
18	46,75	0,001	0,010	0,080	0,084	0,088	0,079	0,079	0,071	0,059	0,041	0,592
19	49,50	0,001	0,001	0,066	0,089	0,092	0,082	0,086	0,076	0,064	0,042	0,599
20	52,25	0,001	0,001	0,001	0,013	0,084	0,101	0,116	0,110	0,098	0,055	0,580

TABELA 7 - Quantidade média aplicada de cloreto (g), entre os instantes de coleta, para vazão de derivação de 186 l/h e tempo de fertirrigação de 80 minutos.

Ponto	Instante de coleta de amostras (minutos)											Total
	2,10	4,47	7,13	10,22	13,87	18,33	24,08	32,18	46,05	80,00		
Distância (m)	Intervalo entre os instantes (horas)											
	0,0350	0,0395	0,0443	0,0515	0,0608	0,0743	0,0958	0,1350	0,2312	0,5658		
1	0,00	0,118	0,116	0,117	0,115	0,122	0,120	0,120	0,110	0,088	0,061	1,087
2	2,75	0,116	0,116	0,116	0,115	0,122	0,120	0,119	0,109	0,089	0,060	1,082
3	5,50	0,116	0,117	0,116	0,116	0,122	0,120	0,119	0,107	0,090	0,060	1,083
4	8,25	0,116	0,118	0,116	0,117	0,122	0,120	0,122	0,106	0,088	0,060	1,085
5	11,00	0,115	0,117	0,116	0,119	0,122	0,120	0,123	0,108	0,088	0,060	1,088
6	13,75	0,116	0,118	0,116	0,118	0,122	0,120	0,123	0,108	0,088	0,059	1,088
7	16,50	0,117	0,118	0,116	0,119	0,121	0,121	0,120	0,108	0,087	0,060	1,087
8	19,25	0,117	0,118	0,116	0,120	0,121	0,120	0,120	0,109	0,090	0,059	1,039
9	22,00	0,117	0,117	0,116	0,123	0,120	0,120	0,121	0,110	0,091	0,059	1,091
10	24,75	0,117	0,118	0,114	0,123	0,120	0,120	0,120	0,109	0,090	0,059	1,090
11	27,50	0,116	0,119	0,114	0,123	0,120	0,122	0,118	0,109	0,091	0,059	1,091
12	30,25	0,114	0,118	0,113	0,123	0,120	0,122	0,118	0,109	0,090	0,058	1,085
13	33,00	0,112	0,118	0,112	0,123	0,119	0,121	0,117	0,109	0,090	0,058	1,079
14	35,75	0,106	0,117	0,114	0,124	0,120	0,122	0,118	0,108	0,092	0,059	1,080
15	38,50	0,091	0,116	0,114	0,124	0,122	0,124	0,118	0,109	0,092	0,061	1,071
16	41,25	0,058	0,118	0,115	0,125	0,121	0,122	0,118	0,113	0,092	0,060	1,042
17	44,00	0,011	0,118	0,117	0,127	0,120	0,125	0,118	0,114	0,093	0,060	1,003
18	46,75	0,002	0,118	0,121	0,128	0,119	0,127	0,121	0,115	0,095	0,060	1,006
19	49,50	0,002	0,121	0,122	0,128	0,121	0,131	0,123	0,121	0,099	0,061	1,029
20	52,25	0,002	0,002	0,099	0,140	0,137	0,150	0,143	0,147	0,121	0,071	1,012

TABELA 8 - Quantidade média aplicada de cloreto (g), entre os instantes de coleta, para vazão de derivação de 93 l/h e tempo de fertirrigação de 160 minutos.

Ponto	Distância (m)	Instante de coleta de amostras (minutos)										Total
		4,22	8,92	14,27	20,43	27,73	36,65	48,17	64,37	92,10	160,00	
		Intervalo entre os instantes (horas)										
		0,0703	0,0783	0,0892	0,1027	0,1217	0,1487	0,1920	0,2700	0,4622	1,1317	
1	0,00	0,220	0,215	0,211	0,202	0,199	0,199	0,175	0,170	0,148	0,164	1,903
2	2,75	0,220	0,215	0,210	0,200	0,198	0,198	0,176	0,169	0,147	0,163	1,896
3	5,50	0,218	0,215	0,209	0,200	0,197	0,198	0,175	0,168	0,146	0,163	1,889
4	8,25	0,218	0,215	0,208	0,199	0,196	0,197	0,174	0,168	0,146	0,162	1,883
5	11,00	0,216	0,214	0,208	0,199	0,195	0,196	0,174	0,168	0,145	0,162	1,877
6	13,75	0,216	0,214	0,206	0,198	0,194	0,195	0,174	0,168	0,144	0,161	1,870
7	16,50	0,216	0,216	0,206	0,197	0,196	0,196	0,174	0,169	0,144	0,160	1,874
8	19,25	0,215	0,215	0,206	0,197	0,194	0,196	0,173	0,169	0,143	0,159	1,867
9	22,00	0,214	0,217	0,205	0,196	0,194	0,196	0,174	0,169	0,144	0,158	1,867
10	24,75	0,214	0,217	0,204	0,195	0,192	0,196	0,173	0,169	0,142	0,158	1,860
11	27,50	0,220	0,218	0,204	0,194	0,192	0,196	0,173	0,168	0,142	0,157	1,864
12	30,25	0,220	0,216	0,204	0,193	0,191	0,195	0,172	0,168	0,142	0,156	1,857
13	33,00	0,224	0,216	0,206	0,196	0,190	0,194	0,172	0,168	0,144	0,156	1,866
14	35,75	0,224	0,214	0,206	0,196	0,189	0,195	0,171	0,169	0,143	0,155	1,862
15	38,50	0,225	0,213	0,206	0,196	0,189	0,194	0,175	0,170	0,143	0,154	1,865
16	41,25	0,225	0,212	0,206	0,196	0,188	0,195	0,175	0,170	0,142	0,154	1,863
17	44,00	0,228	0,214	0,205	0,197	0,187	0,196	0,176	0,170	0,144	0,153	1,870
18	46,75	0,226	0,213	0,206	0,196	0,191	0,196	0,182	0,170	0,146	0,156	1,882
19	49,50	0,211	0,216	0,216	0,199	0,196	0,197	0,187	0,170	0,149	0,155	1,896
20	52,25	0,008	0,208	0,228	0,208	0,210	0,215	0,210	0,183	0,157	0,162	1,789

4.3.3.1. VAZÃO DE DERIVAÇÃO DE 372 l/h E TEMP PO DE FERTIRRIGAÇÃO DE 40 MINUTOS

Os valores obtidos na análise de variância de quantidades totais de cloreto estão apresentados na Tabela 9.

Observando-se esta análise, verifica-se que houve efeito significativo de tratamentos (distância do gotejador ao início da linha).

A análise de regressão indicou que as equações linear e quadrática foram significativas ao nível de 1% de probabilidade, com coeficientes de determinação de 88,6% e 6,5%, respectivamente.

Como o coeficiente de determinação para a equação linear foi elevado e muito maior que o coeficiente da equação quadrática, considerou-se que a variação da quantidade de cloreto aplicado em função das distâncias dos gotejadores ao início da linha, comportou-se segundo a equação de regressão linear.

TABELA 9 - Análise de variância de quantidade total de cloreto em diferentes pontos na linha de gotejadores, com vazão de derivação de 372 l/h e tempo de fertirrigação de 40 minutos.

FONTE DE VARIAÇÃO	SOMA DE QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	VALOR DE F	r ²
LINEAR	$2,45053 \cdot 10^{-2}$	1	$2,45053 \cdot 10^{-2}$	155,48 **	88,6 %
QUADRÁTICA	$1,79018 \cdot 10^{-3}$	1	$1,79018 \cdot 10^{-3}$	11,36 **	6,5 %
CÚBICA	$4,34023 \cdot 10^{-5}$	1	$4,34023 \cdot 10^{-5}$	0,28 ns	0,2%
DESVIO DA REGRESSÃO	$1,30808 \cdot 10^{-3}$	16	$8,17550 \cdot 10^{-5}$	0,52 ns	4,7 %
BLOCOS	$3,72715 \cdot 10^{-2}$	2	$1,86358 \cdot 10^{-2}$	118,24 **	
TRATAMENTOS	$2,76470 \cdot 10^{-2}$	19	$1,45511 \cdot 10^{-3}$	9,23 **	
RESÍDUO	$5,98907 \cdot 10^{-3}$	38	$1,57607 \cdot 10^{-4}$		
TOTAL	$7,09076 \cdot 10^{-2}$	59			

CV = 2,00 %

Média Geral = 0,627667 g

Regressão linear: $\hat{y} = 0,694257 - 2,54892 \cdot 10^{-3} x$

Regressão quadrática: $\hat{y} = 0,683749 - 1,27514 \cdot 10^{-3} x - 2,43786 \cdot 10^{-5} x^2$

ns = não significativo estatisticamente.

** = significativo estatisticamente a 1% de probabilidade.

Na Figura 15 estão apresentados os valores médios observados e curva de regressão para a equação linear.

Analisando-se a Figura 15, verifica-se que, embora a inclinação da curva seja pequena, ela indica que as quantidades de cloreto diminuíram continuamente do início para o final da linha.

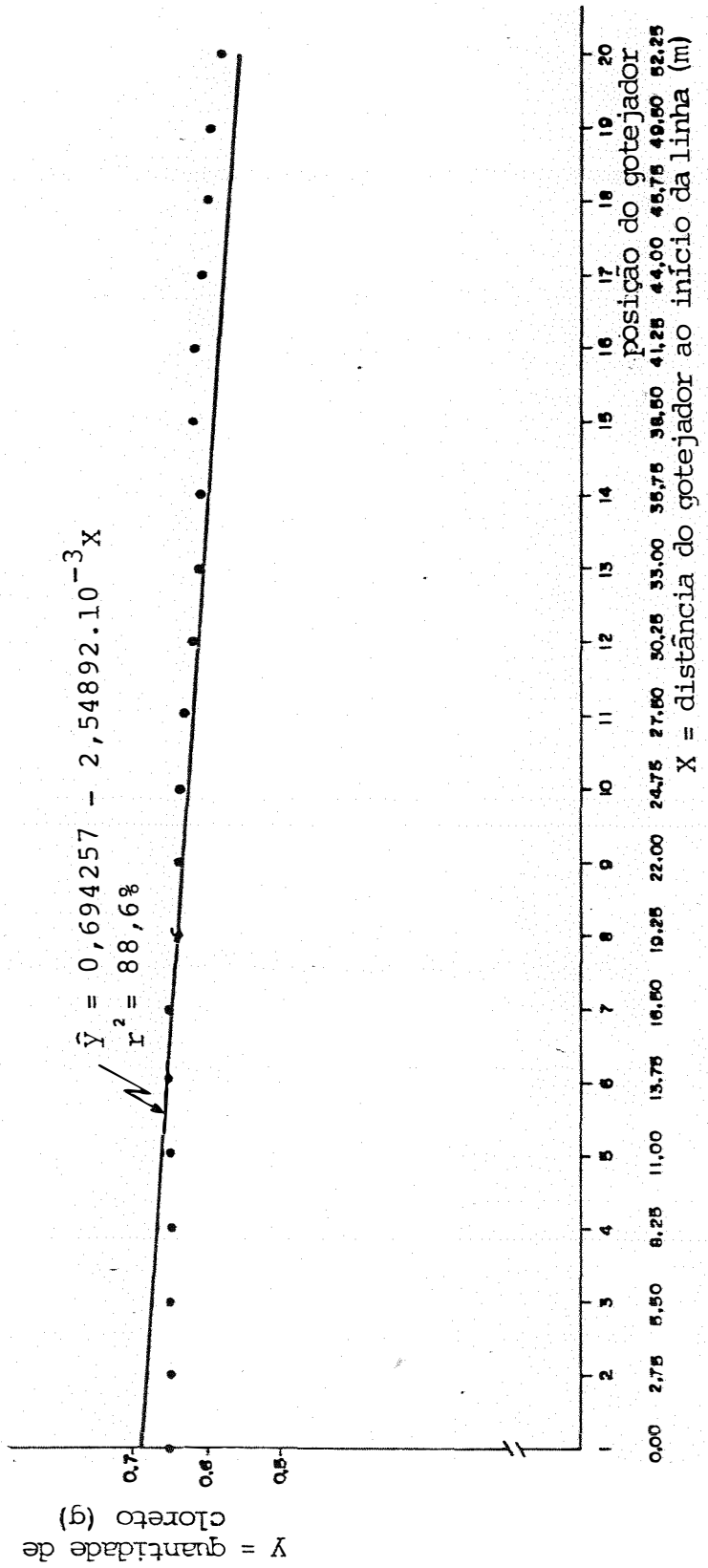


FIGURA 15. Curva e equação de regressão para quantidade aplicada de cloreto versus distância, com vazão de derivação de 372 l/h e tempo de fertirrigação de 40 minutos.

Na Tabela 10 estão apresentadas as médias de totais de cloreto aplicado para os diversos pontos ao longo da linha de gotejadores, bem como o resultado do teste de Tukey e o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen.

Observando-se a Tabela 10, verifica-se que o teste de Tukey revelou diferenças estatísticas entre as quantidades de cloreto aplicadas aos diversos pontos. Porém, as médias do ponto 1 ao 16 não diferiram entre si, e também, a uniformidade de aplicação, medida pelo Coeficiente de Christiansen, foi bastante alta (98,8%).

4.3.3.2. VAZÃO DE DERIVAÇÃO DE 186 l/h E TEMPO DE FERTIRRIGAÇÃO DE 80 MINUTOS

Os valores obtidos na análise de variância para esta aplicação estão apresentados na Tabela 11.

Observando-se esta análise, verifica-se que houve efeito significativo de tratamentos.

O desdobramento desse efeito indicou que as equações de regressão de primeiro e segundo grau foram significativas ao nível de 1% de probabilidade, com coeficientes de determinação de 58,6% e 26,5%, respectivamente.

Uma vez que a equação linear apresentou maior coeficiente de determinação, considerou-se que a variação da quantidade de cloreto aplicado comportou-se conforme a equação de regressão linear apresentada.

TABELA 10 - Quantidade média aplicada de cloreto (g), para diversos pontos na linha de gotejadores, com vazão de derivação de 372 l/h e tempo de fertirrigação de 40 minutos.

TRATAMENTO		MÉDIA	
posição na linha	distância (m)	observada	esperada
1	0,00	0,6517 A	0,6942
2	2,75	0,6460 A	0,6872
3	5,50	0,6477 A	0,6802
4	8,25	0,6497 A	0,6732
5	11,00	0,6470 A	0,6662
6	13,75	0,6500 A	0,6592
7	16,50	0,6463 A	0,6522
8	19,25	0,6450 AB	0,6452
9	22,00	0,6407 AB	0,6382
10	24,75	0,6393 AB	0,6312
11	27,50	0,6330 ABC	0,6242
12	30,25	0,6190 ABCD	0,6172
13	33,00	0,6143 ABCDE	0,6101
14	35,75	0,6133 ABCDE	0,6031
15	38,50	0,6177 ABCDE	0,5961
16	41,25	0,6160 ABCDE	0,5891
17	44,00	0,6067 BCDE	0,5821
18	46,75	0,5927 DE	0,5751
19	49,50	0,5977 CDE	0,5681
20	52,25	0,5797 E	0,5611
Média		0,6277	0,6277
D.M.S. 5%		0,0389	

Coefficiente de Uniformidade de Christiansen 98,8%

médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si a 5% de probabilidade.

TABELA 11 - Análise de variância de quantidade total de cloreto em diferentes pontos na linha de gotejadores, com vazão de derivação de 186 l/h e tempo de fertirrigação de 80 minutos.

FONTE DE VARIAÇÃO	SOMA DE QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	VALOR DE F	r ²
LINEAR	$3,19401 \cdot 10^{-2}$	1	$3,19401 \cdot 10^{-2}$	525,03 **	58,6 %
QUADRÁTICA	$1,44373 \cdot 10^{-2}$	1	$1,44373 \cdot 10^{-2}$	237,32 **	26,5 %
CÚBICA	$5,82213 \cdot 10^{-5}$	1	$5,82213 \cdot 10^{-5}$	0,96 ns	0,1 %
DESVIO DE REGRESSÃO	$8,10685 \cdot 10^{-3}$	16	$5,06678 \cdot 10^{-4}$	8,33 **	14,9 %
BLOCOS	$1,04012 \cdot 10^{-1}$	2	$5,20060 \cdot 10^{-2}$	854,87 **	
TRATAMENTOS	$5,45425 \cdot 10^{-2}$	19	$2,87066 \cdot 10^{-3}$	47,19 **	
RESÍDUO	$2,31171 \cdot 10^{-3}$	38	$6,08345 \cdot 10^{-5}$		
TOTAL	$1,60866 \cdot 10^{-1}$	59			

CV = 0,73 % Média Geral = 1,06845 g

Regressão linear: $\hat{y} = 1,4447x - 2,91001 \cdot 10^{-3} x$

Regressão quadrática: $\hat{y} = 1,11463 + 7,07348 \cdot 10^{-4} x - 6,92317 \cdot 10^{-5} x^2$

ns = não significativo estatisticamente.

** = significativo estatisticamente a 1% de probabilidade

Na Figura 16 estão apresentados os valores médios observados e curva de regressão para a equação linear.

Analisando-se a Figura 16, verifica-se que se melhantemente ao obtido para o tempo de fertirrigação de 40 minutos, embora a inclinação da curva seja pequena, as quantidades de cloreto diminuíram continuamente do início até o final da linha.

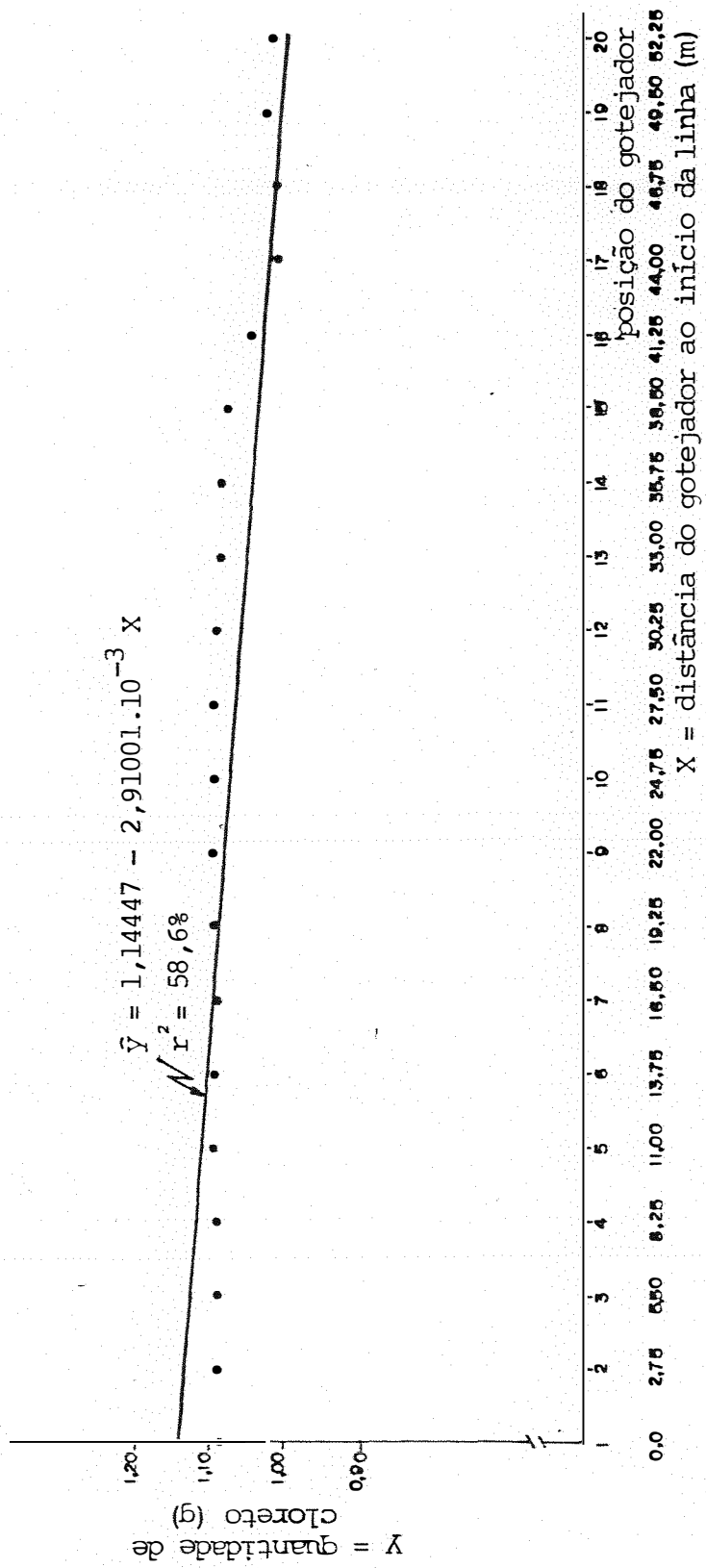


FIGURA 16. Curva e equação de regressão para quantidade aplicada de cloreto versus distância, com vazão de derivação de 186 l/h e tempo de fertirrigação de 80 minutos.

Na Tabela 12 estão apresentadas as médias de totais de cloreto aplicado, bem como o resultado do teste de Tukey e o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen.

Analisando-se a Tabela 12, verifica-se que o teste de Tukey revelou que há diferenças significativas entre médias. Porém, semelhantemente ao tempo de aplicação de 40 minutos, as médias do ponto 1 ao ponto 15 não diferiram entre si. O Coeficiente de Uniformidade de Christiansen foi também bastante elevado (97,3%), revelando alta uniformidade de aplicação.

4.3.3.3. VAZÃO DE DERIVAÇÃO DE 93 l/h E TEMPO DE FERTIRRIGAÇÃO DE 160 MINUTOS

Os resultados obtidos na análise de variância para esta aplicação estão apresentados na Tabela 13.

Por meio desta análise de variância, observa-se que houve efeito significativo de tratamentos e as equações de regressão foram significativas para o primeiro, segundo e terceiro grau.

Tal como obtido para os tempos de fertirrigação de 40 e 80 minutos, para o tempo de 160 minutos, a equação de regressão do primeiro grau apresentou maior coeficiente de determinação.

TABELA 12 - Quantidade média aplicada de cloreto (g), para diversos pontos na linha de gotejadores, com vazão de derivação de 186 l/h e tempo de fertirrigação de 80 minutos.

TRATAMENTO		MÉDIA	
posição na linha	distância (m)	observada	esperada
1	0,00	1,0863 A	1,1445
2	2,75	1,0820 A	1,1365
3	5,50	1,0833 A	1,1285
4	8,25	1,0860 A	1,1205
5	11,00	1,0880 A	1,1125
6	13,75	1,0873 A	1,1045
7	16,50	1,0867 A	1,0965
8	19,25	1,0890 A	1,0885
9	22,00	1,0913 A	1,0724
10	24,75	1,0910 A	1,0724
11	27,50	1,0903 A	1,0644
12	30,25	1,0850 A	1,0564
13	33,00	1,0797 A	1,0484
14	35,75	1,0797 A	1,0404
15	38,50	1,0710 A	1,0324
16	41,25	1,0427 B	1,0244
17	44,00	1,0037 D	1,0164
18	46,75	1,0057 CD	1,0084
19	49,50	1,0287 BC	1,0004
20	52,25	1,0117 CD	0,9924
Média		1,0684	1,0684
D.M.S. 5%		0,0242	

Coefficiente de Uniformidade de Christiansen 97,3%

médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si a 5% de probabilidade.

TABELA 13 - Análise de variância de quantidade total de cloreto aplicado em diferentes pontos na linha de gotejadores, com vazão de derivação de 93 l/h e tempo de fertirrigação de 160 minutos.

FONTE DE VARIÇÃO	SOMA DE QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	VALOR DE F	r ²
LINEAR	$7,86072 \cdot 10^{-3}$	1	$7,86072 \cdot 10^{-3}$	143,94 **	25,4 %
QUADRÁTICA	$7,07415 \cdot 10^{-4}$	1	$7,07415 \cdot 10^{-4}$	12,95 **	2,3 %
CÚBICA	$4,70949 \cdot 10^{-3}$	1	$4,70949 \cdot 10^{-3}$	86,24 **	15,2 %
DESVIO DE REGRESSÃO	$1,76825 \cdot 10^{-2}$	16	$1,10516 \cdot 10^{-3}$	20,24 **	57,1 %
BLOCOS	$3,81470 \cdot 10^{-2}$	2	$1,90735 \cdot 10^{-2}$	349,26 **	
TRATAMENTOS	$3,09601 \cdot 10^{-2}$	19	$1,62948 \cdot 10^{-3}$	29,84 **	
RESÍDUO	$2,07520 \cdot 10^{-3}$	38	$5,46105 \cdot 10^{-5}$		
TOTAL	$7,11823 \cdot 10^{-2}$	59			

CV = 0,40 % Média Geral = 1,8698 g

Regressão linear: $\hat{y} = 1,90752 - 1,44363 \cdot 10^{-3} X$

Regressão cúbica: $\hat{y} = 1,97192 - 0,017506 X + 7,64573 \cdot 10^{-4} X^2 - 9,55978 \cdot 10^{-6} X^3$

** significativo estatisticamente a 1% de probabilidade.

Assim, considerou-se que a variação da quantidade de cloreto, em relação à distância do gotejador ao início da linha, obedeceu um modelo linear, segundo a equação de regressão apresentada. Também, embora o coeficiente angular desta equação seja pequeno, ele indica que as quantidades de cloreto diminuíram continuamente do início até o final da linha.

Na Figura 17 estão apresentados os valores médios observados e curva de regressão para a equação linear

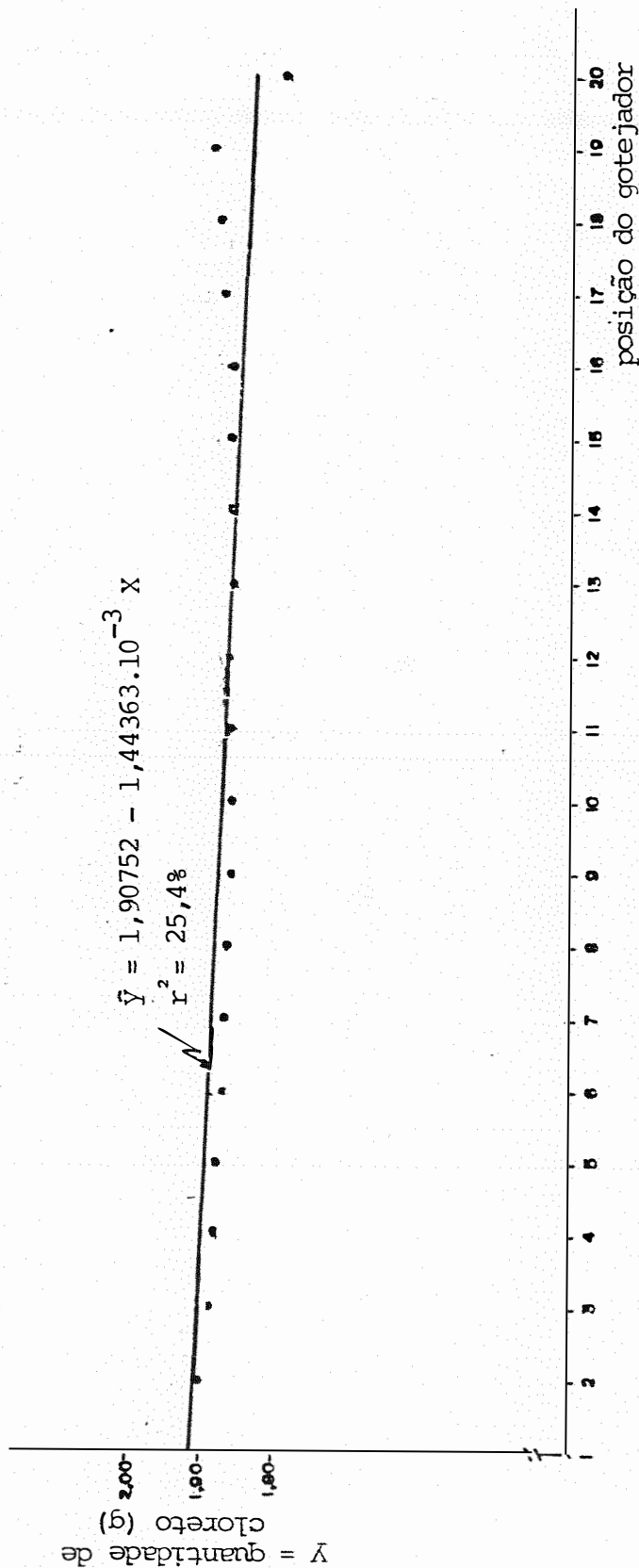


FIGURA 17. Curva e equação de regressão para quantidade aplicada de cloreto versus distância, com vazão de derivação de 93 l/h e tempo de feir irrigação de 160 minutos.

Na Tabela 14 estão apresentadas as médias de totais de cloreto aplicado, o resultado do teste de Tukey e o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen.

Analisando-se a Tabela 14 pode ser observado que o teste de Tukey revelou diferenças significativas entre médias.

Porém, tal como nas aplicações de 40 e 80 minutos, a maioria das médias não diferiram entre si, o que pode ser constatado entre os tratamentos 5 a 17. O Coeficiente de Uniformidade de Christiansen foi também bastante elevado (97,3%), indicando alta uniformidade de aplicação.

4.4. INJEÇÃO COM BOMBA

4.4.1. TAXA DE INJEÇÃO DA BOMBA

Segundo instruções do fabricante (ASBRASIL, 1985), a frequência do pistão da bomba pode ser de um a doze golpes por minuto, injetando aproximadamente 0,5 l/golpe, correspondendo 30 a 360 l/hora, respectivamente.

No presente trabalho, as medições feitas para determinação dos volumes de ejeção e injeção resultaram em 1,39 e 0,5566 l/golpe, respectivamente, com uma relação de 2,5/1.

Conhecido o volume de injeção e tendo-se estabelecido que com a bomba injetora seriam realizadas fertirrigações com uma única vazão de injeção (372 l/h, durante 40 minutos), regulou-se para 11,15 golpes/min a frequência do pistão da bomba.

TABELA 14 - Quantidade média aplicada de cloreto (g), para diversos pontos na linha de gotejadores, com vazão de derivação de 93 l/h e tempo de fertirrigação de 160 minutos.

TRATAMENTO		MÉDIA	
Posição na linha	distância (m)	observada	esperada
1	0,00	1,9030 A	1,9075
2	2,75	1,8960 AB	1,9035
3	5,50	1,8903 ABC	1,8996
4	8,25	1,8830 ABCD	1,8956
5	11,00	1,8770 BCDE	1,8916
6	13,75	1,8717 CDE	1,8877
7	16,50	1,8700 CDE	1,8837
8	19,25	1,8640 DE	1,8797
9	22,00	1,8640 DE	1,8758
10	24,75	1,8590 E	1,8718
11	27,50	1,8623 DE	1,8678
12	30,25	1,8563 E	1,8638
13	33,00	1,8650 DE	1,8599
14	35,75	1,8620 DE	1,8559
15	38,50	1,8657 DE	1,8519
16	41,25	1,8643 DE	1,8480
17	44,00	1,8720 CDE	1,8440
18	46,75	1,8823 ABCD	1,8400
19	49,50	1,8980 AB	1,8361
20	52,25	1,7900 F	1,8321
Média		1,8698	
D.M.S. 5%		0,0229	
Coeficiente de Uniformidade de Christiansen 97,3%			

médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si a 5% de probabilidade.

4.4.2. TEORES DE CLORETO

Os teores médios de cloreto obtidos nas amostras coletadas nos 20 pontos ao longo da linha de gotejadores, para os dez instantes de coleta, estão apresentados na Tabela 15.

Analisando-se esta tabela, verifica-se que até os três primeiros instantes de coleta pode-se identificar o avanço da solução fertilizante para a extremidade final da linha de gotejadores.

Semelhantemente à injeção de solução com derivação de fluxo, o tempo para alcance da extremidade da linha pela solução deu-se após 4 minutos, indicando que a velocidade de caminamento da mesma independeu do tipo de injeção.

Após esse tempo (4 minutos), verifica-se que até o final da injeção de fertilizante pela bomba (40 minutos), a concentração de cloreto manteve-se praticamente constante no decorrer do tempo e ao longo da linha de gotejadores, sendo semelhante à concentração prevista na mesma no final da aplicação, ou seja, 317,8 ppm.

Desse modo, diferentemente do obtido com injeção por derivação de fluxo, não se constataram maiores teores de cloreto para os pontos finais da linha de gotejadores, indicando que não ocorreu acúmulo nessa região. Essa diferença de comportamento provavelmente se deu devido à solução injetada na rede pela bomba não sofrer variação de concentração durante a aplicação e devido injeção de solução em menor concentração.

TABELA 15 - Teor $\frac{1}{2}$ médio de cloreto (ppm), obtido com taxa de injeção de 372 l/h, durante 40 minutos, com bomba injetora.

Ponto	Distância (m)	Instante de Coleta									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		Tempo (minutos)									
		1	2	4	8	16	24	32	40	42	44
1	0,00	187	294	301	302	285	312	309	310	20*	20*
2	2,75	165	298	304	302	289	312	312	308	40	20*
3	5,50	138	301	304	302	293	312	312	310	41	20*
4	8,25	114	291	304	299	292	312	312	310	43	20*
5	11,00	84	274	304	303	292	312	312	310	45	20*
6	13,75	67	289	307	303	292	311	312	313	49	20*
7	16,50	45	284	309	303	290	311	310	313	54	20*
8	19,25	34	283	307	303	292	311	309	313	61	20*
9	22,00	20*	277	307	300	292	311	309	313	68	20*
10	24,75	20*	255	307	300	305	311	305	311	76	20*
11	27,50	20*	247	307	300	305	311	305	311	99	20*
12	30,25	20*	217	307	300	305	311	310	313	124	20*
13	33,00	20*	169	304	299	305	311	316	310	162	20*
14	35,75	20*	115	302	299	305	312	316	310	234	20*
15	38,50	20*	44	302	299	305	312	316	310	293	26
16	41,25	20*	20*	302	299	305	312	312	310	316	40
17	44,00	20*	20*	294	299	305	312	312	310	318	46
18	46,75	20*	20*	286	299	305	312	314	310	320	69
19	49,50	20*	20*	189	299	305	314	314	307	320	127
20	52,25	20*	20*	20*	219	305	314	311	307	320	308

$\frac{1}{2}$ teor da solução no tanque = 601 ppm

* teor natural da água

4.4.3. QUANTIDADE APLICADA DE CLORETO

Da mesma maneira realizada para derivação de fluxo (item 4.3.3.), calcularam-se as quantidades aplicadas de cloreto entre instantes consecutivos para cada ponto de coleta.

Estas quantidades, resumidas como médias de três repetições, estão apresentadas a seguir na Tabela 16.

As quantidades totais de cloreto, para cada ponto amostrado na linha de gotejadores, foram analisadas através dos testes F e Tukey e regressões, conforme apresentado na Tabela 17.

Através dessa tabela, verifica-se que houve efeito significativo de tratamentos.

O desdobramento desta significância revelou efeito linear e cúbico, com coeficientes de determinação de 80,4% e 8,9%, respectivamente.

Como o coeficiente da equação linear foi muito maior que o coeficiente da equação cúbica, considerou-se que a quantidade aplicada de cloreto em relação à posição na linha de gotejadores, comportou-se segundo a equação de regressão de primeiro grau.

TABELA 16 - Quantidade média aplicada de cloreto (g), entre instantes de coleta, com bomba injetora de fertilizantes, à taxa de injeção de 372 l/h e tempo de fertirrigação de 40 minutos.

Ponto	Distância (m)	Instante de coleta de amostras (minutos)										Total
		1	2	4	8	16	24	32	40	42	44	
		Intervalo entre os instantes (horas)										
		0,0167	0,0167	0,0333	0,0667	0,1333	0,1333	0,1333	0,1333	0,0333	0,0333	
1	0,00	0,011	0,017	0,035	0,070	0,131	0,144	0,142	0,142	0,002	0,002	0,696
2	2,75	0,009	0,017	0,035	0,069	0,132	0,143	0,143	0,141	0,004	0,002	0,695
3	5,50	0,008	0,017	0,035	0,069	0,134	0,142	0,142	0,141	0,005	0,002	0,695
4	8,25	0,006	0,016	0,034	0,068	0,133	0,142	0,142	0,141	0,005	0,002	0,689
5	11,00	0,005	0,016	0,034	0,069	0,132	0,141	0,141	0,140	0,005	0,002	0,685
6	13,75	0,004	0,016	0,035	0,068	0,132	0,140	0,140	0,141	0,005	0,002	0,683
7	16,50	0,002	0,016	0,034	0,068	0,130	0,140	0,139	0,140	0,006	0,002	0,577
8	19,25	0,002	0,016	0,034	0,068	0,130	0,139	0,138	0,140	0,007	0,002	0,676
9	22,00	0,001	0,015	0,034	0,067	0,130	0,138	0,137	0,139	0,008	0,002	0,671
10	24,75	0,001	0,014	0,034	0,066	0,135	0,138	0,135	0,138	0,008	0,002	0,671
11	27,50	0,001	0,014	0,034	0,066	0,134	0,137	0,134	0,137	0,011	0,002	0,670
12	30,25	0,001	0,012	0,034	0,066	0,134	0,136	0,136	0,037	0,014	0,002	0,672
13	33,00	0,001	0,009	0,033	0,065	0,133	0,136	0,138	0,136	0,018	0,002	0,671
14	35,75	0,001	0,006	0,033	0,065	0,133	0,136	0,138	0,135	0,025	0,002	0,674
15	38,50	0,001	0,002	0,033	0,065	0,132	0,135	0,137	0,134	0,032	0,003	0,674
16	41,25	0,001	0,001	0,032	0,064	0,131	0,135	0,134	0,134	0,034	0,004	0,670
17	44,00	0,001	0,001	0,032	0,064	0,131	0,134	0,134	0,133	0,034	0,005	0,669
18	46,75	0,001	0,001	0,030	0,064	0,130	0,134	0,134	0,132	0,034	0,007	0,667
19	49,50	0,001	0,001	0,020	0,064	0,130	0,134	0,134	0,131	0,034	0,014	0,663
20	52,25	0,001	0,001	0,002	0,046	0,129	0,133	0,132	0,132	0,034	0,033	0,643

TABELA 17 - Análise de variância de quantidade total de cloreto aplicado em diferentes pontos na linha de go tejadores, com bomba injetora de fertilizantes.

FONTE DE VARIAÇÃO	SOMA DE QUADRADOS	GRAUS DE LIBERDADE	QUADRADO MÉDIO	VALOR DE F	r ²
LINEAR	$7,44140 \cdot 10^{-3}$	1	$7,44140 \cdot 10^{-3}$	203,93 **	80,4 %
QUADRÁTICA	$3,51154 \cdot 10^{-5}$	1	$3,51154 \cdot 10^{-5}$	0,96 ns	0,4 %
CÚBICA	$8,24265 \cdot 10^{-4}$	1	$8,24265 \cdot 10^{-4}$	22,60 **	8,9 %
DESVIO DA REGRESSÃO	$9,59037 \cdot 10^{-4}$	16	$5,99398 \cdot 10^{-5}$	1,64 ns	10,4 %
BLOCOS	$6,29616 \cdot 10^{-3}$	2	$3,14808 \cdot 10^{-3}$	86,27 **	
TRATAMENTOS	$9,26018 \cdot 10^{-3}$	19	$4,87378 \cdot 10^{-4}$	13,36 **	
RESÍDUO	$1,38664 \cdot 10^{-3}$	38	$3,64905 \cdot 10^{-5}$		
TOTAL	$1,69430 \cdot 10^{-2}$	59			

CV = 0,89 % Média Geral = 0,676233 g

Regressão linear: $\hat{y} = 0,712929 - 0,0014046 X$
Regressão cúbica: $\hat{y} = 0,737113 - 7,79081 \cdot 10^{-3} X + 3,13521 \cdot 10^{-4} X^2 - 4,00027 \cdot 10^{-6} X^3$

ns = não significativo estatisticamente.

** = significativo estatisticamente a 1% de probabilidade.

Na Figura 18 estão apresentadas a curva de regressão e a equação linear calculada.

Analisando-se a Figura 18, verifica-se que semelhantemente ao obtido para as aplicações com derivação de fluxo, a quantidade de cloreto resultante da aplicação com bomba injetora pôde ser representada por uma equação do primeiro grau. Embora a inclinação da curva seja pequena, também se nota que a quantidade aplicada diminuiu continuamente do início para o final da linha.

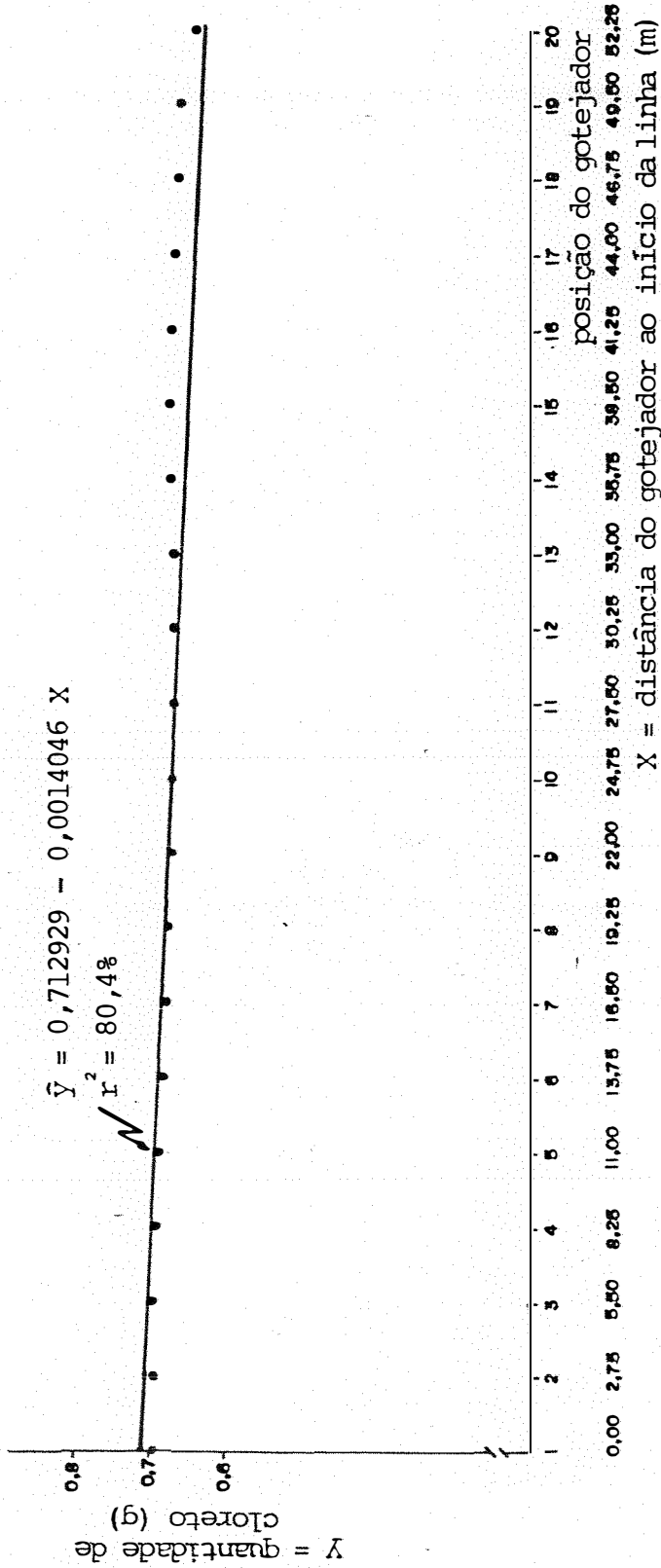


FIGURA 18. Curva e equação de regressão entre quantidade aplicada de cloreto versus distância, com bomba injetora de fertilizantes, para taxa de injeção de 372 l/h e tempo de aplicação de 40 minutos.

Na Tabela 18 estão apresentadas as médias de totais de cloreto aplicado, o resultado do teste de Tukey e o Coeficiente de Uniformidade de Christiansen.

Analisando-se a Tabela 18, verifica-se que, tal como ocorrido para as aplicações com derivação de fluxo, o teste de Tukey indicou diferenças significativas entre as médias de quantidades de cloreto aplicado aos diversos pontos. Porém, a uniformidade de aplicação medida pelo Coeficiente de Christiansen foi muito alta (99,4%), indicando que a aplicação foi uniforme.

4.5. COMPARAÇÃO ENTRE APLICAÇÃO COM DERIVAÇÃO DE FLUXO E COM BOMBA INJETORA

Os dados e análises de quantidades aplicadas de cloreto, quando observados conjuntamente, para as três aplicações com derivação de fluxo e com bomba injetora, conforme pode-se verificar pelas Tabelas 10, 12, 14 e 18 e Figuras 15 a 18, mostram que foram semelhantes, ou seja: a uniformidade de aplicação, avaliada pelo Coeficiente de Uniformidade de Christiansen, foi sempre alta, sendo maior ou igual a 97,3%; para todas as aplicações, as equações de regressão indicaram que a quantidade de cloreto diminuiu do início para o final da linha.

TABELA 18 - Quantidade média de cloreto (g) aplicado com bomba injetora de fertilizantes, em diversos pontos da linha de gotejadores.

TRATAMENTO		MÉDIA	
posição na linha	distância (m)	observada	esperada
1	0,00	0,6960 A	0,7129
2	2,75	0,6973 A	0,7091
3	5,50	0,6957 A	0,7052
4	8,25	0,6900 AB	0,7013
5	11,00	0,6857 ABC	0,6975
6	13,75	0,6837 ABC	0,6936
7	16,50	0,6787 ABCD	0,6898
8	19,25	0,6757 BCD	0,6859
9	22,00	0,6720 BCD	0,6820
10	24,75	0,6717 BCD	0,6782
11	27,50	0,6710 CD	0,6742
12	30,25	0,6723 BCD	0,6704
13	33,00	0,6717 BCD	0,6666
14	35,75	0,6740 BCD	0,6627
15	38,50	0,6743 BCD	0,6588
16	41,25	0,6720 BCD	0,6550
17	44,00	0,6697 CD	0,6511
18	46,75	0,6687 CD	0,6473
19	49,50	0,6613 DE	0,6433
20	52,25	0,6433 E	0,6395
Média		0,6762	0,6762
D.M.S. 5%		0,0187	

Coefficiente de Uniformidade de Christiansen 99,4%

médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si a 5% de probabilidade.

As máximas reduções percentuais foram estimadas relacionando-se a diferença de quantidade aplicada no início e no final da linha, dividida pela média de aplicação. Estes valores, para injeção com derivação de fluxo (vazões de 372, 186 e 93 l/h) e com bomba injetora (vazão de 372 l/h), foram 21,2%; 14,2%; 4,0% e 10,8%, respectivamente.

Uma das causas dessas reduções de cloreto aplicado é a diminuição de vazão dos gotejadores ao longo da linha, em consequência de perda de carga, conforme pode ser verificado nas Figuras 11 e 12. Estimando-se do mesmo modo realizado para quantidade de cloreto, a máxima redução de vazão é de 8,2%.

O decréscimo da quantidade aplicada de cloreto com o aumento do comprimento da linha de gotejadores, pode também ser explicado devido ao tempo de avanço da solução fertilizante do início até o final da mesma.

Verificando-se as Tabelas 2, 3, 4 e 15, observa-se que este tempo foi aproximadamente cinco minutos. Desse modo, durante as fertirrigações, os pontos finais receberam solução fertilizante por menor tempo em comparação aos pontos iniciais.

Essas máximas reduções diminuíram com o aumento do tempo de fertirrigação para injeção com derivação de fluxo, uma vez que o tempo de avanço representa menor fração do tempo de fertirrigação quando aumenta-se este último.

Com 372 l/h a redução foi 21,2% com derivação de fluxo, diminuindo para 10,8% quando usou-se a bomba, pois para essa, além da concentração ser mantida constante, terminada a aplicação continuou-se a fertirrigação durante 4 minutos, havendo um recesso de cloreto na linha nesse período.

Na Figura 19 estão apresentadas as curvas e equações de regressão de quantidades aplicadas de cloreto, para os sistemas utilizados de injeção de fertilizante.

Para se verificar possíveis diferenças entre os dois sistemas de injeção, as equações de regressão foram comparadas pelo teste t, confrontando-se os coeficientes angulares e as quantidades de cloreto aplicadas ao longo da linha, não sendo constatadas diferenças significativas entre os parâmetros testados, ao nível de 5% de probabilidade. Isso indicou que as quantidades aplicadas de cloreto, bem como o decréscimo das mesmas com o aumento do comprimento da linha de gotejadores, foram semelhantes para os dois sistemas utilizados.

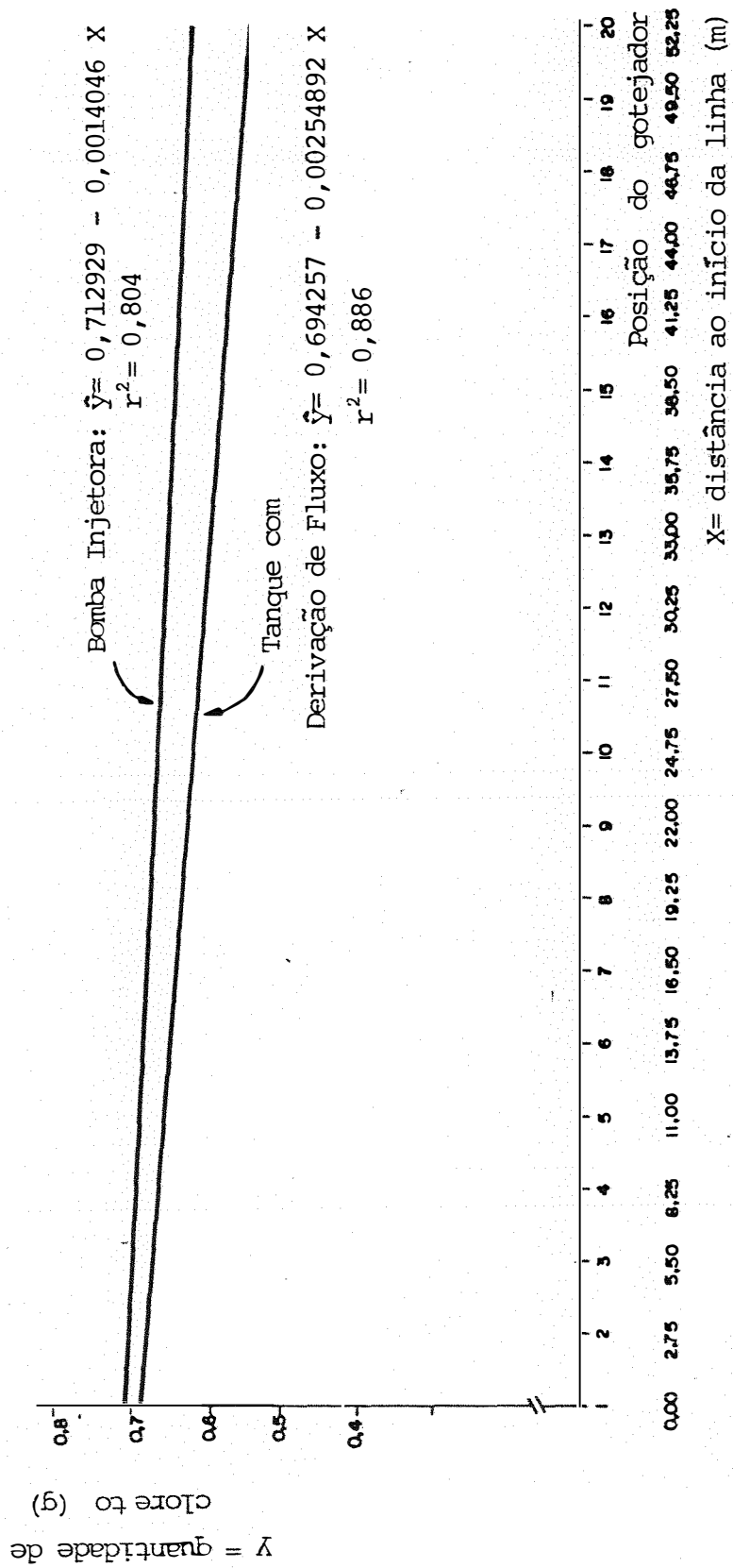


FIGURA 19. Curvas e equações de regressão entre distância e quantidade de cloreto, aplicada com derivação de fluxo e bomba injetora, com vazão de 372 ℓ/h e tempo de fertirrigação de 40 minutos.

5. CONCLUSÕES

Utilizando-se tanque de derivação de fluxo e bomba injetora de fertilizantes para injeção de solução de KCl e empregando-se o íon cloreto como traçador, no estudo da distribuição espacial e temporal do mesmo pelo sistema de irrigação, foram obtidas as seguintes conclusões:

- a) A equação determinada para estimar a vazão derivada através do tanque de fertilizantes segue o modelo: $q = K.H^{0,5}$, sendo:

q = vazão derivada (l/h);

H = diferença de pressão (kPa).

Essa equação expressa o Teorema de Torricelli, indicando que a vazão é proporcional à raiz quadrada da diferença de pressão, sendo que K assumirá diferentes valores em função da instalação do tanque à rede de irrigação.

- b) A redução da concentração do íon cloreto no tanque de fertilizantes, em relação à sua concentração inicial no mesmo, apresentou modelo exponencial, segundo a equação

$$Y = 100 \cdot e^{-V/v}, \text{ sendo:}$$

Y = concentração relativa de cloreto (%);

e = base do logaritmo neperiano;

V = volume derivado através do tanque;

v = volume do tanque.

- c) A pressão de serviço na linha de gotejadores ocorreu em posição correspondente a 39% do seu comprimento. Do início da linha até essa posição a perda de carga representou 75% da perda de carga total;
- d) O íon cloreto aplicado com sistema de derivação de fluxo, usando-se vazões de 93, 186 e 372 ℓ/h e aplicação com bomba injetora com vazão de 372 ℓ/ha , teve a mesma velocidade de avanço na linha de gotejadores;
- e) A distribuição de cloreto ao longo da linha de gotejadores, aplicado com derivação de fluxo e com bomba injetora, pôde ser representada por uma equação do primeiro grau, indicando que as quantidades de cloreto diminuem continuamente do início para o final da linha;
- f) Não houve diferença de comportamento entre aplicação com tanque de derivação de fluxo e bomba injetora, uma vez que as quantidades de cloreto distribuídas e as reduções dessas quantidades ao longo da linha de gotejadores não diferiram entre os dois sistemas, testados com injeção de 372 ℓ/h e tempo de aplicação de 40 minutos;

- g) Para injeção com derivação de fluxo, as diferenças entre quantidade de cloreto distribuído no início e no final da linha de gotejadores reduziram com aumento do tempo de aplicação, sendo de 21,2%, 14,2% e 4,0% para os tempos de 40, 80 e 160 minutos, respectivamente. Isso indicou que tempos de aplicação mais longos levam a menores diferenças entre quantidades de fertilizante distribuído aos diversos pontos da linha;
- h) A uniformidade de distribuição de cloreto aplicado pela linha de gotejadores, injetado com tanque de derivação e com bomba injetora, avaliada pelo Coeficiente de Uniformidade de Christiansen foi elevada, sendo maior ou igual a 97,3%, revelando que o fertilizante aplicado à rede de irrigação propagou-se adequadamente pela mesma.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASBRASIL (Aspersão no Brasil S/A). Bomba injetora de fertilizantes ASBRASIL. Mimeografado. São Bernardo do Campo, 1985, 1p.
- BOAZ, M. & HALEVY, I. Trickle irrigation. **Newsletter Israel Agriculture**. State of Israel, Ministry of Agriculture. Jerusalem, p. 39-57, 1974.
- BRESSLER, E. Trickle-drip irrigation: principles and application to soil-water management. **Advance in Agronomy**, New York, 29: 344-393, 1977.
- CHRISTIANSEN, J.E. Irrigation by sprinkling. Agricultural Experimental Station, Berkeley, Bulletin nº 670, 1942. 124p.
- DIXON, J.W. & MASSEY JR., F.J. Introduction to statistical analysis. Tokyo, McGraw-Hill Kogakusha Ltdª, 3.ed., 1969. p. 207-210.
- F.A.O. (Food Agricultural Organization). **Localized irrigation**. Irrigation and drainage paper, Rome, nº 36, 1980. 201p.

- FINKEL, H.J. **CRC Handbook of Irrigation Thecnology.** Boca Raton, Florida, vol. 1, 1982. 369p.
- FREY, D. Quimigacion. Fertilización y control de malezas y plagas com el agua de riego. **Agricultura de las Americas, Kansas, 30** (12): 14, 16, 18, 1981.
- FRIZZONE, J.A.; ZANINI, J.R.; DIAS PAES, L.A.; NASCIMENTO, V. M. **Fertirrigação mineral.** Ilha Solteira, UNESP, Boletim Técnico 2, 1985. 3lp.
- GOLDBERG, D.; GORNAT, B.; RIMON, D. **Drip irrigation: principles, design and agricultural practices.** Israel, Drip Irrigation Scientific Publications, 1976. 296p.
- GOLDBERG, D. & SHMUELI, M. Drip irrigation - A method used under arid and desert conditions of high water and soil salinity. **Transactions of the ASAE, Michigan, 13:** 38-41, 1970.
- GROBBELAAR, H.L. & LOURENS, F. **Fertilizer applications with drip irrigation.** In: INTERNATIONAL DRIP IRRIGATION CONGRESS. Proceedings, San Diego, p. 405-410, 1974.
- HAGIN, J. & TUCKER, B. **Fertilization of dryland and irrigated soils.** New York, 1982. 188p.
- HOLMAN, H. Fertilizer and chemical injection for irrigation systems. **Citrus & Vegetable Magazine, Tampa, 41** (7): 26-28, 46-48, 1978.

KELLER, J. & KARMELI, D. **Trickle irrigation design.** California, Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975. 133p.

KENNEDY, J.W. Your irrigation system has a larger role than applying water. *Irrigation Farmer*, Melbourne, 11 (3), p.2, 1984.

POMPA, P.G. **La técnica y la tecnología del riego por aspersión.** Madrid, Ministerio de Agricultura, p. 214-221, 1974.

RAPOSO, J.R. **A rega por aspersão.** Lisboa, Livraria Clássica Editora, 1979. 339p.

ROLSTON, D.E.; RAUSCHKOLB, R.S.; PHENE, C.J.; MILLER, R.J.; URIU, K.; CARLSON, R.M.; HENDERSON, D.W. Applying nutrients and other chemicals to trickle-irrigated crops. University of California, Division of Agricultural Science, Bulletin 1893, 14p, 1981.

SHANI, M. **La fertilización combinada con el riego.** Israel, Ministerio de Agricultura, 1981. 36p.

SOIL CONSERVATION SERVICE - USDA. **National Engineering Handbook.** Section 15, Chapter 11 - Sprinkler Irrigation, Washington, 1968. 83p.

WIERSMA, J.L. Sprinkler irrigation system + fertilizer = fertigation. **Farm & Home**, South Dakota Research, 20 (1): 5-8, 1969.

WOODWARD, G.D. **Sprinkler irrigation**. New York, Sprinkler Irrigation Association, 1959. 377p.

ZAGATTO, E.A.G.; JACINTO, A.O.; REIS, B.F.; KRUG, F.J.; BERGAMIN FILHO, H.; PESSENDA, L.C.R.; MORTATTI, J.; GINÉ, M. F. **Manual de análises de plantas e águas empregando sistemas de injeção em fluxo**. Piracicaba, CENA-USP, 1981, 45p.