

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMATIVA DO TEMPO DE
FERTIRRIGAÇÃO

MARCUS VINICIUS ARAUJO MELLO DE OLIVEIRA

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU-SP
Fevereiro – 2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMATIVA DO TEMPO DE
FERTIRRIGAÇÃO

MARCUS VINICIUS ARAUJO MELLO DE OLIVEIRA

Orientador: Prof. Dr. Roberto Lyra Villas Bôas

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP - Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Área de Concentração Irrigação e Drenagem.

BOTUCATU-SP
Fevereiro – 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E
TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

O48m Oliveira, Marcus Vinicius Araujo Mello de, 1976-
Modelo matemático para estimativa do tempo de fertir-
rigação / Marcus Vinicius Araujo Mello de Oliveira. - Bo-
tucatu : [s.n.], 2006.

xi, 90 f. : il. color., gráfs., tabs.

Tese (Doutorado) -Universidade Estadual Paulista, Fa-
culdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2005

Orientador: Roberto Lyra Villas Bôas

Inclui bibliografia

1. Fertirrigação. 2. Irrigação. 3. Irrigação por goteja-
mento. I. Villas Bôas, Roberto Lyra. II. Universidade Es-
tadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botu-
catu). Faculdade de Ciências Agrônomicas. III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

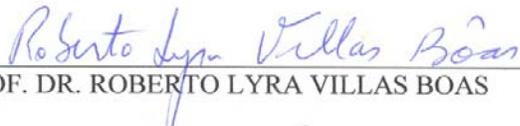
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "MODELO MATEMÁTICO PARA ESTIMATIVA DO TEMPO
DE FERTIRRIGAÇÃO"

ALUNO: MARCUS VINICIUS ARAUJO MELLO DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: PROF. DR. ROBERTO LYRA VILLAS BOAS

Aprovado pela Comissão Examinadora:



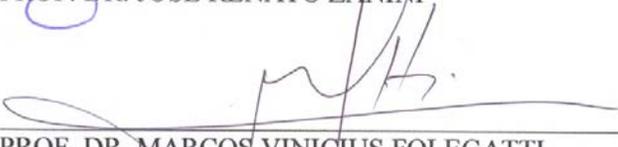
PROF. DR. ROBERTO LYRA VILLAS BOAS



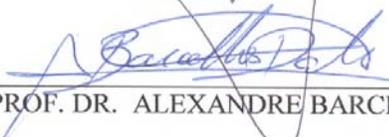
PROF. DR. JOÃO CARLOS CURY SAAD



PROF. DR. JOSÉ RENATO ZANINI



PROF. DR. MARCOS VINICIUS FOLEGATTI



PROF. DR. ALEXANDRE BARCELLOS DALRI

Data da Realização: 20 de fevereiro de 2006.

*A Deus por me dar perseverança e fé durante toda essa
caminhada*

Ofereço

*Aos meus queridos pais Adão e Lourdes,
Aos meus amados avós Dermeval e Dalva, Luiz e Ozília,
Aos meus grandes irmãos Dermeval Luiz e Gustavo,
Às minhas queridas tias,
Aos meus estimados primos e primas,
Aos meus sobrinhos safados,*

Dedico e agradeço

“Obrigado pela força, obrigado pela confiança, obrigado por todo amor e apoio em todos os momentos de minha vida. Especialmente a meus pais, muito obrigado por toda educação, todas as vitórias que ocorrerem em minha vida, podem ter certeza, vocês são os maiores responsáveis!”

AGRADECIMENTOS

Ao Professor e orientador Roberto Lyra Villas Bôas, por todo apoio, confiança e amizade durante toda minha estada em Botucatu.

Ao Professor João Carlos Cury Saad, pelo especial apoio e incentivo durante todo curso.

A todos bons professores, que desde o começo de minha caminhada na Agronomia em Lavras, de alguma forma, ajudaram no aprimorar de minha formação.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas – Unesp, através do curso de pós-graduação em Agronomia – Irrigação e Drenagem, por ter sido minha morada durante todos esses anos, e pela oportunidade de realização dos cursos de mestrado e doutorado.

Ao curso de pós-graduação em Agronomia – Irrigação e Drenagem da Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz” - USP, instituição na qual cursei a maioria dos créditos do curso de doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

À Citrovita Agropecuária que nos permitiu realizar parte do estudo, e a todo seu corpo técnico.

Agradeço a todas as pessoas que de alguma forma colaboraram na realização deste trabalho.

A todos os amigos de Botucatu, que certamente fizeram minha vida mais completa. Em especial agradeço a Fernanda Nascimento, Alexandre Dalri (TP), Flávio

Pereira, Wagner Vilella, Rodrigo e Luciana Trigueiro, Rodolfo (Taubaté), Leandro (Vaca), Luiza Duenhas, Fábio Baio e Elka, Silas, Patrick Shimidt, Cláudio Marcio, Ivo e Lauter.

A toda turma do GEMFER, pela convivência principalmente durante a organização dos simpósios de gramado e compostagem.

Aos grandes amigos da república “Deus Quis” em Piracicaba, muitos dos quais também amigos de Lavras, ou melhor, amigos de toda vida: Adriano (Mim), Anderson (Folha), Daniel, Robson Barizon, João e Marcelo.

A todos bons amigos de Piracicaba, muitos desde os tempos de UFLA, em especial: Carla, Priscilla (Pisqui), Ana Paula (Fliper), Bel, Dri, Nildo, Daniel Sarmento, Thiago (Cabeça), Lucimeire Pilon, Janaína Magalhães, Cláudia Milene, Rodrigo Otávio (Anão), Rafael (Maionese), Dieme Bento e Jonas (JJ).

Aos amigos Marcos Vinicius (Mudo), Fábio (Zebra), Guilherme Bretas (Boca) e Aline, Túlio Ferreira, Marco Aurélio (Fuça), Arnaldo e Gisele pela constante força e convivência.

A todos amigos não citados, mas que com certeza são figuras muito importantes na minha vida.

SUMÁRIO

	Página
1. RESUMO	1
2. SUMMARY	3
3. INTRODUÇÃO.....	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
4.1 Irrigação localizada	8
4.2 Emissores em irrigação localizada	9
4.3 Aspectos e fatores inerentes ao dimensionamento de sistemas de irrigação localizada..	11
4.4 Fertirrigação.....	14
4.5 Operação da irrigação-fertirrigação e a distribuição espacial e temporal de fertilizantes	15
4.6 Modelagem em irrigação	18
5. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
5.1 Desenvolvimento do modelo.....	21
5.1.1 Parâmetros do modelo	22
5.2 Levantamento de dados	30
5.2.1 Sistema de irrigação I	30
5.2.2 Sistema de irrigação II.....	33
5.3 Validação do modelo.....	41
5.4 Coleta das amostras de solo.....	41
5.5 Análise das amostras	42
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
6.1 Análise dos dados coletados e estimados	43
6.1.1 Sistema de irrigação I	44
6.1.2 Sistema de irrigação II.....	53
6.1.2.1 .. Simulação da operação do sistema de irrigação II com 10 minutos de atraso na frente de fertilizante (FF).....	59
6.2 GERFERTI – Gerenciamento da fertirrigação	64
6.3 Distribuição de $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ e K^+ no perfil do solo.....	71

6.4 Comparação entre os valores de condutividade elétrica (EC) e concentração de K (mg L ⁻¹)	75
6.5 Considerações finais.....	79
7. CONCLUSÕES.....	81
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

LISTA DE TABELAS

		Página
1	Volume (L) de solução injetada nos diferentes tratamentos.....	32
2	Detalhamento da linha principal e derivação relativa ao posicionamento do bloco A.....	38
3	Detalhamento da linha principal e derivação relativa ao posicionamento do bloco B.....	39
4	Detalhamento da linha principal e derivação relativa ao posicionamento do bloco C.....	40
5	Visualização da tela do modelo com valores seqüenciais de concentração de potássio (mg L^{-1}).....	44
6	Coeficientes das equações de regressão polinomial de 2º grau ($y=ax^2+bx+c$) representativas da dinâmica do K na tubulação durante o processo de fertirrigação, para o Sistema de Irrigação.....	49
7	Correlação entre os valores de concentração de K (mg L^{-1}) mensurados em campo e gerados pelo modelo proposto para o Sistema de Irrigação I ($y=ax+b$).....	52
8	Erros obtidos a partir dos valores de concentração de K (mg L^{-1}) estimados e mensurados em campo para o Sistema de Irrigação I.....	53
9	Coeficientes das equações de regressão polinomial de 2º grau ($y=ax^2+bx+c$) representativas da dinâmica do K na tubulação durante o processo de fertirrigação, para o Sistema de Irrigação II.....	54
10	Correlação entre os valores de concentração de K (mg L^{-1}) mensurados em campos e gerados pelo modelo proposto para o Sistema de Irrigação II ($y=ax+b$)..	58
11	Erros obtidos a partir dos valores de concentração de K (mg L^{-1}) estimados e mensurados em campo para o Sistema de Irrigação II.....	59
12	Correlação entre os valores de concentração de K (mg L^{-1}) mensurados em	

campos e gerados pelo modelo proposto para o Sistema de Irrigação II, quando a Fa é atrasada em 10 minutos ($y=ax+b$).....	63
13 Erros obtidos a partir dos valores de concentração de K (mg L^{-1}) estimados e mensurados em campo para o Sistema de Irrigação II, quando a Fa é atrasada em 10 minutos ($y=ax+b$).....	64
14 Correlação ($y=ax+b$) entre os valores de K (mg L^{-1}) obtidos via fotometria de chama, e os valores de condutividade elétrica das amostras coletadas no Sistema de Irrigação II.....	79

LISTA DE FIGURAS

		Página
1	Exemplificação do esquema de distribuição temporal das variáveis do modelo, para um dado momento de funcionamento do sistema de irrigação.....	23
2	Representação (localização temporal) esquemática de diferentes variáveis do modelo para dois pontos (a) e (b) de um dado sistema de irrigação.	24
3	Variáveis componentes do modelo. Exemplificação para uma linha lateral aleatória.	25
4	Relação entre o tempo bruto e o tempo líquido de funcionamento de um sistema de irrigação.....	27
5	Representação (localização) esquemática de diferentes variáveis do modelo para um dado sistema de irrigação.	27
6	Fluxograma do modelo desenvolvido.....	29
7	Croqui do bloco A do Sistema de Irrigação II.....	34
8	Croqui do bloco B do Sistema de Irrigação II.	35
9	Croqui do bloco C do Sistema de Irrigação II.	36
10	Curvas de distribuição da concentração de K (mg L^{-1}), para o tempo de 25 minutos de injeção no Sistema de Irrigação I.....	45
11	Curvas de distribuição da concentração de K (mg L^{-1}), para o tempo de 20 minutos de injeção no Sistema de Irrigação I.....	46
12	Curvas de distribuição da concentração de K concentração de K (mg L^{-1}), para o tempo de 15 minutos de injeção no Sistema de Irrigação I.....	47
13	Curvas de distribuição da concentração de K (mg L^{-1}), para o tempo de 10 minutos de injeção no Sistema de Irrigação I.....	48
14	Curvas de distribuição da concentração de K (mg L^{-1}), para o bloco operacional A do Sistema de Irrigação II.....	55
15	Curvas de distribuição da concentração de K (mg L^{-1}), para o bloco operacional B do Sistema de Irrigação II.....	56

16	Curvas de distribuição da concentração de K (mg L^{-1}), para o bloco operacional C do Sistema de Irrigação II.....	57
17	Curvas de distribuição da concentração de K (mg L^{-1}), para o bloco operacional B do Sistema de Irrigação II, com atraso de 10 minutos na Fa estimada.....	60
18	Curvas de distribuição da concentração de K (mg L^{-1}), para o bloco operacional C do Sistema de Irrigação II, com atraso de 10 minutos na Fa estimada.....	61
19	Tela de apresentação do modelo matemático.....	65
20	Entrada de dados referentes ao sistema de irrigação.....	66
21	Entrada de dados referentes a linha principal do sistema de irrigação.....	67
22	Entrada de dados referentes a linha de derivação do sistema de irrigação.....	68
23	Entrada de dados referentes à operação de fertirrigação.....	69
24	Tela de apresentação das respostas geradas pelo modelo.....	70
25	Gráfico referente ao PE mais extremo.....	70
26	Isolinhas de distribuição da concentração de $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ (mg L^{-1}) abaixo de emissores localizados nos blocos A, B e C amostrados no Sistema de Irrigação II.....	73
27	Isolinhas de distribuição da concentração de K^+ (mg L^{-1}) abaixo de emissores localizados nos blocos A, B e C amostrados no Sistema de Irrigação II.....	74
28	Concentração de K (mg L^{-1}) e EC (mS cm^{-1}), na solução de fertilizantes, para o bloco A do Sistema de Irrigação II.....	76
29	Concentração de K (mg L^{-1}) e EC (mS cm^{-1}), na solução de fertilizantes, para o bloco B do Sistema de Irrigação II.....	77
30	Concentração de K (mg L^{-1}) e EC (mS cm^{-1}), na solução de fertilizantes, para o bloco C do Sistema de Irrigação II.....	78

1. RESUMO

O sistema de produção agrícola, assim como outros sistemas produtivos, demanda um entendimento das suas diferentes interfaces, resultando tanto no desenvolvimento de novas tecnologias, como no aperfeiçoamento das tecnologias existentes. Dentro desse enfoque, fatores relativos à fertirrigação, bem como ao gerenciamento do sistema agrícola irrigado fertirrigado devem ser melhor estudados e compreendidos. O tempo de funcionamento de um sistema de irrigação - fertirrigação, leva em consideração duas situações distintas de manejo: a) quando não existe lâmina de irrigação a ser reposta pelo sistema de irrigação, e b) quando existe uma lâmina de irrigação a ser reposta, superior à lâmina mínima que é aplicada quando o sistema é acionado visando somente a fertirrigação. Na primeira situação, o tempo de funcionamento do sistema de irrigação-fertirrigação tem que ser o mais breve possível; enquanto na segunda, a operação de injeção dos fertilizantes tem que ser localizada dentro do tempo total de funcionamento do sistema, de forma que o fertilizante aplicado não fique localizado fora da área de alcance do sistema radicular. Dentro desse contexto, o presente trabalho teve o objetivo de desenvolver um modelo matemático que auxiliasse no gerenciamento do tempo de funcionamento do sistema de irrigação - fertirrigação. Foram consideradas variáveis do modelo, parâmetros presentes em plantas hidráulicas de sistemas de irrigação, como: comprimentos e diâmetros das linhas principal, derivação e lateral. As vazões nas diferentes partes do sistema de irrigação, e aspectos relativos a solução de fertilizantes injetada, como: volume de solução e quantidade de fertilizante fornecido também foram considerados. A validação do trabalho foi realizada

comparando dados da dinâmica temporal e espacial do K em dois sistemas de irrigação, um experimental e um comercial. A partir do modelo obtido, desenvolveu-se um aplicativo computacional denominado “Gerferti – Gerenciamento da Fertirrigação”, o qual permite que o usuário tenha a resposta quanto ao tempo mais adequado de funcionamento do sistema de irrigação, quando em fertirrigação, de forma rápida e simples. Como conclusões do trabalho tem-se que o modelo desenvolvido permitiu indicar de forma adequada o tempo de funcionamento do sistema de irrigação, quando em operação de fertirrigação; e que áreas extensas irrigadas por sistemas de irrigação localizada apresentam diferenças significativas quanto ao tempo de deslocamento da frente de fertilizante (FF) no sistema, e conseqüentemente há o deslocamento diferenciado dos fertilizantes no bulbo úmido nas diferentes partes do sistema.

Palavras-chaves: fertirrigação, irrigação por gotejamento, manejo da fertirrigação.

Mathematical model for estimate of fertigation time. Botucatu, 2006. 90p. Tese (Doutorado em Agronomia/Irrigação e Drenagem) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: MARCUS VINICIUS ARAUJO MELLO DE OLIVEIRA

Adviser: ROBERTO LYRA VILLAS BÔAS

2. SUMMARY

The agricultural production system, as well as others productive systems, demand an agreement of its different interfaces, resulting on the development of new technologies, as the improvement of established technologies. Considering this approach, fertigation factors, as well as the management of the irrigated–fertigated agricultural system, must be better studied and understood. The operation time of an irrigation-fertigation system, has to consider two distinct management situations: a) when there is no irrigation depths to be applied by the irrigation system, and b) when an irrigation depth exists to be restituted, superior to minimum depth that is applied when the only aims the fertigation practice. In the first situation, the operation time of the irrigation-fertigation system has to be as brief as possible; while in the second, the operation of fertilizers injection has to be placed during the total time of system operation, as applied fertilizer is not located below root system depth. In this context, the present work had the objective of developing a mathematical model that assisted in management operation time of agricultural system, irrigated by trickle irrigation, and where the fertigation is practiced. It has been considered variables of the model, parameters of hydraulical irrigation systems designs, as: lengths and diameters of the mainline, derivation and lateral lines. Relative flows in the different parts of irrigation system, and aspects about fertilizer solution, as: volume of solution and amount of fertilizer supplied also had been considered. The validation of the model was carried out by comparing the temporal and spatial dynamics of K in two irrigation systems, an experimental and a commercial one. From the resulting model, it was developed a computational applicatory called "Gerferti - Fertigation Management", which allows the user to know about the most adequate operation time of the irrigation system, when using fertigation, in a fast and simple way. As conclusions of this work, the developed model allowed to indicate the most adequate operation time of irrigation

system, when in fertigation; and that extensive areas irrigated by trickle irrigation systems presented significant differences on the water advance time (F_a) in the hydraulical net of the system, and consequently occurred differentiated advance of fertilizers in the soil under a punctual source in different system locations.

Keywords: fertigation, trickle irrigation, fertigation management.

3. INTRODUÇÃO

O sistema agrícola de produção, assim como outros sistemas produtivos que fazem parte da realidade econômico-social e ambiental de um país, demanda um entendimento das suas diferentes interfaces, acarretando desenvolvimento de novas tecnologias, bem como aperfeiçoamento das tecnologias existentes.

De acordo com a ANA (Agência Nacional de Águas), o Brasil possui a segunda maior área potencialmente irrigada do mundo, 55 milhões de hectares, sendo que dos 45,5 milhões de hectares atualmente cultivados, somente 6,2% são irrigados. Até o ano de 2025 é previsto que a demanda mundial de alimentos dobre, o que determina a necessidade de ampliação da área agrícola, e/ou aumento da eficiência da produção de alimento por área cultivada. Sabendo que 50% da população mundial depende de produtos produzidos sob irrigação, e que a agricultura responde por cerca de 70% do consumo mundial de água, existe também a necessidade do aumento da eficiência agrícola do uso da água.

Dentro desse enfoque, a fertirrigação - técnica amplamente definida como a aplicação de fertilizantes junto à água de irrigação - tem exercido papel relevante na obtenção de maiores produtividades, bem como no uso mais racional dos insumos, o que possibilita aumento da competitividade comercial dos produtos agrícolas, e a minimização dos impactos ambientais decorrentes da atividade produtiva. Os bons resultados decorrentes do emprego da técnica podem também ser relacionados ao desenvolvimento social de diversas

regiões, como nos perímetros irrigados do nordeste brasileiro, o que possibilita a fixação do homem ao campo.

Dos vários métodos de irrigação que podem ser adotados na agricultura irrigada, os sistemas de irrigação localizada têm apresentado um notável crescimento de área, uma vez que possibilitam, quando dimensionados corretamente, dentre outros aspectos, o uso mais eficiente da água disponível para irrigação. Em contrapartida, o montante de capital investido por unidade de área irrigada, é superior ao demandado por outros métodos de irrigação, o que acarreta a necessidade de um gerenciamento mais minucioso da irrigação e da fertirrigação. O conhecimento do binômio irrigação-fertirrigação torna-se primordial para que sejam alcançados os níveis produtivos esperados.

Fatores relativos ao dimensionamento do sistema de irrigação, como o comprimento de linhas laterais, a distância do ponto de injeção da solução de fertilizantes até os diferentes pontos do sistema, bem como o comportamento dos fertilizantes no solo; e principalmente as relações da planta com a água, fertilizantes, solo e atmosfera têm que ser estudados de forma constante para o gerenciamento mais correto da irrigação-fertirrigação. No que se refere às operações de fertirrigação em si, aspectos relativos ao tempo e forma de injeção dos fertilizantes, qualidade dos fertilizantes utilizados, tempo de funcionamento do sistema de irrigação enquanto em operação de fertirrigação, dentre inúmeros fatores, devem ser também analisados para o gerenciamento mais adequado da atividade.

O tempo de funcionamento de um sistema de irrigação, no qual seja adotada a fertirrigação, tem que levar em consideração duas situações distintas de funcionamento: a) quando não existe lâmina de irrigação a ser repostada pelo sistema de irrigação, e b) quando existe lâmina de irrigação a ser repostada, superior à lâmina mínima que é aplicada quando o sistema é acionado visando somente a fertirrigação. Na primeira situação, o tempo de funcionamento do sistema de irrigação-fertirrigação tem que ser o mais breve possível; na segunda, a operação de injeção dos fertilizantes tem que ser localizada dentro do tempo total de funcionamento do sistema, de forma que o fertilizante aplicado não seja deslocado para fora da área de alcance do sistema radicular, ou mesmo, para que esse não fique localizado na superfície do bulbo úmido, não sendo também aproveitado pelas plantas.

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo matemático que auxiliasse no gerenciamento do tempo de funcionamento do sistema de irrigação-fertirrigação.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Irrigação localizada

O objetivo principal de qualquer sistema de irrigação é suprir a demanda hídrica das culturas, sendo que os sistemas de irrigação localizada determinam uma área molhada menor, quando comparado com outros métodos de irrigação, o que acaba por proporcionar uma menor evaporação direta da água do solo (PIZARRO, 1996).

A aplicação de água é feita por meio de tubos perfurados com orifícios de diâmetro reduzidos ou por meio de gotejadores e microaspersores denominados emissores, dos mais diferentes tipos, modelos e características. O gotejamento e microaspersão são sistemas muito difundidos, tendo sido o primeiro introduzido no Brasil em 1972, e o segundo mais recente em 1982 (BERNARDO et al., 2005).

Como os sistemas de irrigação por superfície e por aspersão, a irrigação localizada apresenta pontos favoráveis e desfavoráveis. O dimensionamento e manejo adequados, muitas vezes possibilitam que os pontos favoráveis se sobreponham aos desfavoráveis (SCHWANKL, 1996). As principais vantagens são: maior eficiência no uso da água, maiores produtividades, melhor qualidade dos produtos, maior eficiência da adubação, maior eficiência do controle fitossanitário, não interfere nas práticas culturais, adaptação à diferentes tipos de solos e topografia, utilização de águas salinas ou solos salinos e economia de mão de obra (BERNARDO et al., 2005). Como desvantagens tem-se a grande possibilidade

de entupimento dos emissores, a distribuição do sistema radicular concentrada no bulbo úmido, que facilita o tombamento em regiões com ventos e o alto custo dos equipamentos (SCHWANKL, 1996).

A partir da chegada da água pressurizada à área a ser irrigada, as partes componentes dos sistemas de irrigação localizada podem receber diferentes nomenclaturas. Keller & Bliesner (2000) caracterizam as partes componentes como: cabeçal de controle, linhas principais, linhas de distribuição (derivação), linhas laterais, emissores e possíveis válvulas, sensores e controladores que têm a função de monitorar e controlar pressão, vazão, tempo de funcionamento e outros fatores necessários para o funcionamento adequado do sistema. Uma subunidade do sistema de irrigação, de acordo com esses autores é composta pelas linhas de distribuição (derivação) e linhas laterais. Pizarro (1996) adota para as linhas de derivação a nomenclatura secundária e terciária de acordo com sua posição dentro de uma unidade de irrigação, de forma que as linhas secundárias são aquelas que abastecem as linhas terciárias, as quais têm a função de distribuir a água até as linhas laterais.

Keller & Bliesner (2000) indicam que as partes mais importantes do cabeçal de controle são os injetores de químicos no sistema, os controladores de vazão e pressão, e os elementos responsáveis pela filtragem. Bernardo et al. (2005) relatam que o posicionamento do cabeçal de controle dentro da área irrigada deve possibilitar menor custo, pela otimização da quantidade de tubulação a ser adquirida, e facilitar a distribuição dos fertilizantes e o controle do sistema no campo.

4.2 Emissores em irrigação localizada

De forma geral são denominados gotejares as peças responsáveis por dissipar a de pressão disponível ao longo das linhas laterais, e aplicar vazões pequenas e constantes. A aplicação de água ao solo, na irrigação por gotejamento, é sob a forma de “ponto fonte”, ficando a superfície do solo com uma área molhada com forma circular e o seu volume molhado com forma de bulbo (BERNARDO et al., 2005), comumente denominado bulbo úmido. Quando os pontos de gotejamento são próximos uns dos outros, forma-se uma faixa molhada contínua. Segundo Keller e Karmeli (1975) os gotejadores podem se conectar de três

formas as linhas laterais: sobre a linha, na linha e no prolongamento da lateral. Bernardo et al. (2005) indicam que os principais tipos de gotejadores são: microtubos, gotejadores de longo percurso integrado, gotejador de orifício, tubos perfurados e microgotejadores.

Pizarro (1996) denomina microaspersores os emissores que pulverizam água em irrigação localizada. De acordo com o autor, esses emissores são indicados para solos muito permeáveis, nos quais o bulbo úmido tem alcance lateral pequeno em relação ao seu desenvolvimento vertical. Quando comparado com a dinâmica da água sob gotejamento, a irrigação via microaspersão é menos influenciada pela condutividade hidráulica dos solos em que seu uso é indicado. A área molhada pelos microaspersores apresenta-se em forma de discos ou faixas molhadas em baixo da copa das árvores (BERNARDO et al., 2005).

A relação entre a vazão dos emissores e pressão pode ser expressa pela Equação 1 (KELLER & BLIESNER, 2000).

$$q = K_d H^x \quad (1)$$

Em que:

q = vazão do emissor ($L h^{-1}$);

K_d = coeficiente de descarga, constante de proporcionalidade característico do emissor;

H = pressão de trabalho do emissor (mca);

x = expoente de descarga .

O valor do expoente de descarga x caracteriza a relação entre a pressão de serviço do emissor e a vazão do emissor. Quanto menor o valor de x, menor será a sensibilidade de variação da vazão devido a variações de pressão. Gotejadores autocompensantes teoricamente perfeitos possuem expoente de descarga 0. Os menores valores de x são encontrados nos gotejadores autocompensantes.

A localização dos emissores nas linhas laterais, e das próprias linhas laterais levam em consideração características de solo e cultivo. Keller & Bliesner (2000) citam as seguintes características: porcentagem de área sombreada pela cultura em relação a área total, porcentagem de área molhada em relação a área total, distância entre emissores ou pontos de emissão, espaçamento de plantio entre linhas e entre plantas e a largura da faixa molhada.

4.3 Aspectos e fatores inerentes ao dimensionamento de sistemas de irrigação localizada

A concepção de um sistema de irrigação pode ser dividida em duas etapas de estudo. Uma prévia que pode ser denominada “dimensionamento agrônômico” ou “projeto agrônômico”, na qual são levantados, calculados e definidos pontos essenciais ao adequado dimensionamento hidráulico do projeto, conforme demonstrado por Pizarro (1996). Ainda de acordo com o mesmo autor são estudados no dimensionamento agrônômico aspectos referentes a natureza química e física do solo de cultivo, a necessidade hídrica da cultura, a frequência e tempo de irrigação das subunidades de irrigação, o número de emissores por planta, a vazão do emissor a ser utilizado e a disposição dos emissores.

As variações de vazão dos emissores devidas a variações microdimensionais de fabricação são avaliadas pelo coeficiente da variação de fabricação CVF. Quanto maiores os valores de CVF, maior a dispersão da vazão em torno da média, reduzindo a uniformidade de distribuição de água dos emissores. O CVF apresenta distribuição normal (PIZARRO, 1996).

O dimensionamento hidráulico de um sistema de irrigação tem que considerar as variações máximas de pressão e vazão admitidas em uma subunidade do sistema de irrigação. Segundo Bernardo et al. (2005), existem diferentes metodologias para definir a variação de pressão no setor ou subunidade de irrigação, indicando que alguns autores recomendam a variação máxima de 30% da pressão de operação do emissor, sendo em torno de 20% na linha lateral e de 10% na linha de derivação. Os limites admitidos para as variações de pressão e vazão são calculados, principalmente em função do coeficiente de uniformidade de irrigação (CU) pretendida no projeto. Hanson (1996) explica que o CU na fase de projeto para uma linha lateral deve ser de no mínimo de 90% para que no campo seja obtido um CU entre 80 e 90%. Keller e Karmeli (1974) demonstram as primeiras fórmulas para o cálculo da CU. Karmeli e Keller (1975), desenvolveram a Equação 2 para o cálculo da CU, que é indicada por Cuenca (1989), Pizarro (1996), Keller & Bliesner (2000), Bernardo et al.(2005). A Equação 2 é usada no cálculo do CU em fase de projeto.

$$CU = \left(1 - \frac{1,27CVF}{\sqrt{e}}\right) \frac{q_{ns}}{q_a} \quad (2)$$

Em que:

CU = coeficiente de uniformidade de projeto, em decimal;

CVF = coeficiente de variação de fabricação, em decimal;

e = número de emissores por planta;

q_{ns} = menor valor de vazão na subunidade de irrigação ($L h^{-1}$);

q_a = valor médio de vazão dos emissores ($L h^{-1}$).

Para testes de campo a estimativa de CU pode ser calculada pela Equação 3 (KELLER & BLIESNER, 2000).

$$CU' = 100 \frac{q'_n}{q_a} \quad (3)$$

Em que:

CU' = uniformidade de emissão, em campo (%);

q'_n = média das 25% menores medidas de vazão coletadas em campo ($L h^{-1}$);

q_a = média de todas as medidas de vazão coletadas em campo ($L h^{-1}$).

Na avaliação de campo devem ser mensuradas as vazões e pressões em quatro pontos da linha lateral, ou seja, do primeiro gotejador, do gotejador situado a 1/3 do comprimento, do gotejador situado a 2/3 do comprimento e do último gotejador. As linhas laterais selecionadas para determinação, ao longo da linha de derivação, devem ser a primeira linha lateral, a linha lateral situada a 1/3, a situada a 2/3 e a última linha lateral. Contudo, em decorrência do pequeno número de pontos determinados em cada linha lateral, principalmente quando são utilizadas laterais de grande comprimento, recomenda-se a determinação das vazões em oito emissores por lateral, localizados no início, a 1/7, 2/7, 3/7, 4/7, 5/7, 6/7 do início da lateral e no último emissor; sendo analisadas quatro laterais, selecionadas com o mesmo critério anterior (BERNARDO, 1995).

Bernardo (1995) cita que sendo conhecidas as vazões dos gotejadores, pode ser calculada a uniformidade de distribuição do sistema, por meio de várias fórmulas.

Pinto et al. (1988) relatam que em trabalhos comparativos entre vários métodos propostos para determinar a uniformidade de aplicação de água na irrigação

localizada, foi concluído que para a irrigação por gotejamento, o método que obteve melhores resultados foi o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC).

Bernardo (1995) recomenda que para simplificar o trabalho e tempo necessários à realização dos testes de campo, a determinação do CUC (coeficiente de uniformidade de Christiansen) seja feita por linha lateral, tomando, ao acaso, quatro linhas laterais em cada unidade operacional. A estimativa do CUC do sistema será a média dos CUC das linhas, tornando menos laboriosa a determinação e com resultados confiáveis. O coeficiente de uniformidade de Christiansen adaptado para avaliação da aplicação de fertilizante, pode ser definido pela Equação 4 relatada por Sampaio et al. (1996):

$$\text{CUC} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - q_m|}{n \cdot q_m} \right) \times 100 \quad (4)$$

Em que:

CUC = coeficiente de uniformidade de aplicação do fertilizante (%);

q_i = quantidade de fertilizante aplicada pelo emissor (mg);

q_m = quantidade aplicada média de fertilizante (mg);

n = número de observações (gotejadores).

A Associação Brasileira de Norma Técnica (ABNT) indica 85% como o valor mínimo de CU para sistemas de irrigação localizada.

Segundo Coelho (1990), quanto maior a uniformidade de distribuição de água menor será a queda de produção da cultura. O mesmo autor trabalhando com aspersão convencional verificou que valores de CUC superiores a 80% determinam uma variabilidade pequena em termos de queda de produção e em valores inferiores a 80% existe uma maior variabilidade em queda de produção. As culturas em estudo foram batata, feijão e trigo.

De acordo com Azevedo Netto et al. (1998) a hidrodinâmica, que tem como objeto de estudo o movimento dos fluidos, tem na equação da continuidade (Equação 5) umas das cinco equações necessárias para o perfeito entendimento desse movimento. Azevedo Netto et al. (1998) indicam ainda que a equação da continuidade é de grande importância em todos os problemas da hidrodinâmica.

$$Q = AV \quad (5)$$

Em que:

Q = vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

V = velocidade média na seção ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);

A = área da seção de escoamento (m^2).

4.4 Fertirrigação

Segundo López Cadahia (2001) dentro do conceito de agricultura irrigada sustentável, a fertirrigação é o sistema mais racional de aplicação de fertilizantes, respeitando o ambiente dentro da chamada agricultura sustentável. Ainda segundo esse autor, a fertirrigação é considerada atualmente uma das mais importantes técnicas para aumento da produtividade na agricultura.

Villas Bôas et al. (1999) comentam que o uso da fertirrigação leva a uma amortização mais rápida do custo do equipamento de irrigação. Outras vantagens da fertirrigação são: aumento da produtividade das culturas, melhor qualidade do produto agrícola, melhor eficiência na recuperação dos nutrientes, perdas mínimas de nutrientes ocasionadas por lixiviação, controle da concentração de nutrientes na solução do solo, flexibilidade na escolha da época de distribuição do fertilizante em relação à exigência da cultura, baseada nos estágios de desenvolvimento fisiológico das mesmas e ainda permite um desenvolvimento agrícola mais sustentável (PAPADOPOULOS, 1999).

De acordo com López Cadahia (1998), a fertirrigação apresenta como inconvenientes a necessidade de pessoal especializado para manejo do sistema e maior custo inicial. A possível reação de materiais químicos na rede de irrigação ocasionando entupimento de emissores e a corrosão das partes metálicas do sistema que entram em contato direto com a solução de fertilizante, também podem ser citadas como limitações relacionadas a fertirrigação (HERNANDEZ, 1994)

Embora o emprego da fertirrigação no Brasil já esteja consolidado em diversas regiões e em grande número de espécies, seu principal problema está associado ao manejo incorreto, devido à falta de informações adequadas e/ou utilização empírica. A adoção

rápida desta técnica em muitas regiões fez com que a prática se adiantasse à investigação e com isso aparecessem os problemas. Infelizmente, este fato tem implicado em redução de produtividade e desestímulo ao uso da fertirrigação por parte de alguns produtores (VILLAS BÔAS et al., 2001)

Autores como Zanini (1987) e Villas Bôas et al.(2003) salientam a necessidade de realizar pesquisas sobre vários aspectos relacionados a fertirrigação, como forma de possibilitar a adoção correta da mesma, uma vez que o emprego eficiente da técnica leva em consideração aspectos relativos a planta, solo e sistema de irrigação. Desse modo, deve ser analisada, como forma de garantir a uniformidade de distribuição de água e nutrientes satisfatória, a interação entre sistema de irrigação, natureza e características dos fertilizantes solubilizados e as exigências da cultura a ser fertirrigada.

4.5 Operação da irrigação-fertirrigação e a distribuição espacial e temporal de fertilizantes

Soil Conservation Service –USDA (1968) e Shani (1981) citados por Zanini (1987), e Hanson (1996) comentam que o tempo de funcionamento de um sistema de irrigação quando em fertirrigação usualmente segue o modelo 1:2:1, ou seja, a operação de fertirrigação é dividida em três etapas, sendo que o tempo de cada etapa corresponde a 25%, 50% e 25% do tempo total de funcionamento do sistema, respectivamente. As três etapas podem ser assim descritas: a) etapa inicial: necessária para que a água chegue a todos os pontos do sistema de irrigação, e conseqüente estabilização da carga hidráulica no irrigação e umedecimento do solo; b) segunda etapa, que compreende o período de injeção da solução de fertilizante e c) terceira etapa, que tem início depois de encerrada a injeção, para a lavagem das tubulações e movimentação do produto até a profundidade desejada no solo. Fazendo referência ao tempo de injeção dos fertilizantes (etapa 2), Holman (1978) e Oliveira (2003) inferem que tempos maiores de injeção possibilitam melhor uniformidade de distribuição dos fertilizantes no campo, enquanto Sousa et al. (2003) concluíram que linhas laterais lavadas adequadamente (etapa 3), também possibilitam maiores uniformidades de distribuição.

A uniformidade de distribuição do fertilizante via fertirrigação é condicionada a uniformidade de distribuição de água (SOUSA & SOUSA, 1993), requerendo assim que os sistemas de irrigação que fazem uso da fertirrigação sejam dimensionados para funcionar com altos índices de uniformidade de distribuição de água. Desse modo, a quantidade aplicada de fertilizante é função do volume de água aplicado pelos emissores (KELLER & KARMELI, 1974).

Rolston et al. (1981) e Burt et al. (1995) relatam que a uniformidade de aplicação dos fertilizantes pode ser influenciada pela variação da concentração da solução no tanque de mistura, uma vez que a mistura pode não ser homogênea. Variações na taxa de injeção planejada e na vazão do sistema também influenciam a uniformidade de distribuição.

A injeção da solução de fertilizantes dentro das linhas de irrigação deve levar em consideração características do injetor de fertilizantes utilizado, como taxa de injeção, critério de proporcionalidade e concentração da solução de fertilizantes durante o período de injeção. Zanini (1987), Alves (1992) e Sampaio et al. (1997), em trabalhos que estudavam a aplicação do cloreto de potássio com bombas injetoras e tanques de derivação de fluxo, demonstraram que ambos injetores apresentam bom desempenho na distribuição do fertilizante. Oliveira et al. (2003) constataram que o uso de injetores venturi, bombas injetoras hidráulicas proporcionais e bombas injetoras elétricas não ocasionam diferença significativa na distribuição de fertilizantes em sistemas de irrigação localizada por gotejamento.

Souza et al. (1997) variando a taxa de injeção durante diferentes tempos de aplicação de fertilizante em um sistema de irrigação por gotejamento, concluíram que variações na taxa de injeção não interferiram na distribuição do potássio ao longo das laterais.

Sousa et al. (2000) trabalhando com um sistema de irrigação por gotejamento, no qual eram realizadas operações de fertirrigação, demonstraram que em um primeiro instante é encontrada maior condutividade elétrica nas partes terminais do sistema, divergindo de resultados encontrados por Zanini (1987), Alves (1992) e Sampaio et al. (1997); indicando que a uniformidade de distribuição de fertilizantes difere se o sistema for novo ou se já tiver sido usado em operações de fertirrigação, devido a resíduos de fertirrigações anteriores provocados pelo fluxo laminar de água no final das linhas laterais. A maior condutividade elétrica nas partes terminais das linhas laterais deve diminuir com o prosseguimento do

processo de fertirrigação, sendo que o tempo de estabilização da fertirrigação e queda da concentração varia com a distância do ponto de injeção e a concentração da solução inicial adotada.

O movimento de qualquer partícula dentro de uma tubulação depende do diâmetro do tubo e da partícula, da aceleração da gravidade e da massa específica da partícula. Entretanto, no caso de uma solução, dois processos são responsáveis pela transferência dos nutrientes: fluxo de massa e difusão (CRANCK, 1975). Em linhas laterais de sistemas de irrigação localizada, nas quais as extremidades estão submetidas a regime hidráulico laminar, a influência da difusão se torna maior do que em outras porções do sistema de irrigação.

Magalhães et al. (1996) estudando a uniformidade de distribuição de potássio e fósforo em um sistema de irrigação por gotejamento, mesuraram condutividade elétrica, concentração de K por fotometria de chama e pH das amostras coletadas; verificando a mesma tendência de distribuição para as medidas de condutividade elétrica e concentração dos fertilizantes. Concluíram ainda que para estes dois íons não houve diferença na velocidade de transporte no sistema, sendo predominante o fluxo massivo.

Sampaio et al. (1997) relatam que para avaliar a distribuição de fertilizantes em sistemas de irrigação, a maioria dos autores utiliza os mesmos coeficientes de uniformidade para a aplicação de água; sendo a variação na quantidade de adubo aplicado bastante semelhante à variação do volume de água coletado em cada emissor, dependendo assim do coeficiente de variação do emissor.

Alves (1992) sugere que em trabalhos cujo objetivo é estudar a distribuição espacial e temporal de um fertilizante em uma linha lateral, colete-se todo o volume aplicado por um emissor, a fim de inferir corretamente sobre a quantidade de nutriente aplicado.

4.6 Modelagem em irrigação

De acordo com Reynolds (1979) uma equação ou conjunto de equações que representam um processo são definidos como modelo. Segundo Leal & De-Polli (1999) citados por Figueredo Jr. (2004), modelo é a representação simplificada de um sistema, enquanto simulação é a arte de construir modelos matemáticos. Em ciência, modelos são ferramentas que ajudam a conceituar, integrar e generalizar o conhecimento científico por meio da simplificação da realidade, e que resulta em uma ferramenta de auxílio para simulação de diversos cenários. A modelagem é oriunda de uma área do conhecimento chamada de análise de sistemas (DOURADO NETO et al., 1998 e DETOMINI, 2004).

Melo Souza (2005) cita que a técnica de modelagem em agricultura pode ser útil para definir as prioridades de pesquisa, bem como para melhor entender as interações que ocorrem no sistema solo-planta-atmosfera. O modelo pode ser utilizado para estimar a importância e o efeito de certos parâmetros no intuito de definir os fatores a serem considerados. O modelador deve definir seus objetivos antes de iniciar o trabalho experimental, bem como desenvolver um modelo que atenda o objetivo proposto (DOURADO NETO et al., 1998).

Existem diversas classificações para diferenciar os modelos, uma delas os dividem em matemáticos e de simulação (FIGUEREDO Jr., 2004 e MELO SOUZA, 2005). Os primeiros referem-se a representações matemáticas de um fenômeno, enquanto os segundos englobam um ou mais modelos matemáticos, representando fenômenos mais complexos (BARROS, 1998).

Os modelos matemáticos podem ser empíricos, quando baseados em dados puramente observados, estocásticos, nos quais o processo é descrito pelas leis de probabilidade, e podem ser ainda mecanísticos, que consideram as leis físicas, químicas e biológicas no processo, sendo estes os mais versáteis dentre os tipos matemáticos (PAUTIAN et al., 1992 e DETOMINI, 2004).

Os modelos de simulação podem ser divididos em determinísticos e estocásticos. Sendo considerados determinísticos aqueles em que um conjunto de dados leva a

um resultado único, e estocásticos aqueles em que a incerteza é considerada em sua estrutura (ADDISCOTT, 1993).

O emprego da técnica computacional e o uso dos denominados modelos matemáticos foram estendendo-se, progressivamente, à maioria dos campos técnicos, encontrando um meio propício para a resolução dos problemas pertinentes às diversas disciplinas vinculadas à Engenharia Hidráulica (BALTRA, 1987). Segundo o mesmo autor, nos projetos de irrigação podem ser usados os modelos para otimização do uso dos recursos disponíveis (mão de obra, água e solo); previsão de colheitas; avaliação econômica; cálculos hidráulicos; previsões meteorológicas e impacto ambiental. O uso de modelos para simulações em computadores possibilita economia de tempo, trabalho e recursos para planejamento e tomada de decisões de manejo no setor agrícola (FIGUEREDO Jr., 2004).

Segundo Perin Filho (1995) modelos de simulação podem ser visualizados como um conjunto de variáveis e um conjunto de comandos, pois tratam-se de programas de computador. Os atributos das entidades e os níveis em que as atividades estão sendo desenvolvidas tornam-se variáveis (ou estruturas mais complexas) e as atividades e eventos tornam-se rotinas (seqüências de comandos). As variáveis podem ser classificadas como:

- a. variáveis de estado: o conjunto destas variáveis deve possuir informações suficientes para permitir a execução e o acompanhamento da simulação.
- b. variáveis independentes ou exógenas: seus valores são determinados externamente ao modelo. São utilizadas em conjunto com as variáveis de estado para dar andamento à simulação.
- c. variáveis de dependentes ou endógenas: seus valores são determinados internamente no modelo. São utilizadas em conjunto com as variáveis de estado para dar andamento à simulação.
- d. variáveis de desempenho: acumulam as observações de avaliação do comportamento do modelo e cada cenário. Estatísticas e histogramas são elaborados com base em tais variáveis.
- e. parâmetros: definem o cenário de cada simulação. São controlados externamente pelo usuário e portam-se como constantes durante o processo. Podem configurar uma variável específica do sistema. Também podem ser geradores de variáveis independentes.

A validação do modelo tem por objetivo comprovar que o sistema real é representado pelo modelo, com fidelidade suficiente para garantir a obtenção de soluções satisfatórias para o problema original. Normalmente, são utilizados cenários em que o comportamento real já é conhecido previamente e que pode ser comparado com o comportamento obtido com a simulação (PERIN FILHO, 1995).

Para avaliação dos modelos, autores como Turco & Fernandes (2003), Elias (2004) e Melo Souza (2005) utilizaram o erro quadrático médio (EQM) (Equação 6).

$$EQM = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (K - Ki)^2}{n} \right]^{0,5} \quad (6)$$

Em que:

K = dado observado;

Ki = dado estimado;

n = número total de observações.

Melo Souza (2005) indica ainda que o erro médio absoluto (EMA) pode ser usado para avaliação de modelos propostos (Equação 7).

$$EMA = \frac{\sum_{i=1}^n |Ki - K|}{n} \quad (7)$$

5. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia usada durante a condução do presente trabalho é demonstrada da seguinte forma: desenvolvimento do modelo, levantamento de dados e validação do modelo. Como forma de possibilitar melhor interface com o modelo proposto foi desenvolvido um aplicativo computacional denominado “Gerferti – Gerenciamento da Fertirrigação”.

5.1 Desenvolvimento do modelo

Tendo como subsídios aspectos relativos ao dimensionamento hidráulico de sistemas de irrigação e operações de fertirrigação, foi definido e elaborado um modelo para estimar o tempo mínimo de funcionamento de um sistema de irrigação localizada quando em fertirrigação. A subunidade operacional de irrigação mais restritiva quanto ao tempo de funcionamento do sistema, ou seja, a mais distante do cabeçal de controle, foi tomada como parâmetro para o desenvolvimento e aplicação do modelo; bem como a linha lateral de maior comprimento ou a mais distante do ponto de injeção dos fertilizantes dentro da subunidade operacional.

Todas as estimativas foram realizadas em função do tempo de caminhamento da água e, por conseguinte da solução de fertilizantes, no sistema de irrigação. Foram definidos parâmetros e variáveis para melhor entendimento da distribuição temporal e

espacial dos fertilizantes. Todos foram determinados em função dos trechos dos sistemas de irrigação, sendo foram denominados trechos os intervalos de tubulação nos quais foi verificada variação de diâmetro, ou ainda a presença de válvulas controladoras, no caso de linhas principais e de distribuição. Denominou-se trecho em linhas laterais o intervalo, ou espaçamento entre pontos de emissão.

O modelo foi codificado usando o software Microsoft Excel 2003 utilizando comandos em macros desenvolvidos em VBA (Visual Basic for Applications).

5.1.1 Parâmetros do modelo

O modelo tem como dados de entrada parâmetros existentes em projetos hidráulicos (plantas) de sistemas de irrigação localizada, bem como dados referentes às operações de fertirrigação, todavia de acordo com o cenário analisado pelo modelo, alguns parâmetros foram ou não empregados. Foram considerados os seguintes parâmetros como dados de entrada:

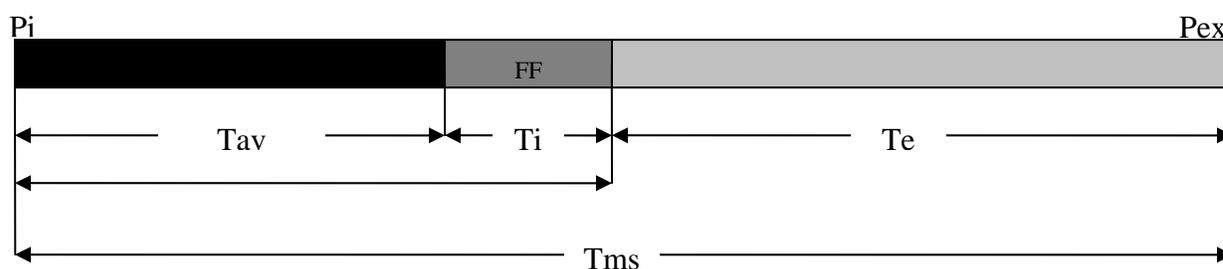
- | | |
|--|---|
| a. cotas altimétricas dos trechos estudados; | b. comprimento de linha lateral; |
| c. diâmetro das linhas laterais; | d. número de linhas laterais |
| e. espaçamento entre emissores | f. espaçamento entre linhas |
| g. vazão média dos emissores | h. equação do emissor |
| i. variação de pressão admissível | j. coeficiente de variação do emissor |
| k. número de emissores por ponto de emissão | l. vazão do sistema |
| m. taxa de injeção da solução de fertilizantes | n. capacidade máxima do tanque de fertilizantes |
| o. fertilizantes utilizados | p. quantidade de fertilizantes |

Seguindo o comentado por Perin Filho (1995), o modelo determinou variáveis em função dos dados relativos ao sistema de irrigação. Enumeram-se e caracterizam-se as seguintes variáveis componentes do modelo:

Tempo de injeção (Ti) – Tempo necessário para injetar todo o volume de solução de fertilizantes necessário.

Tempo de Espera (T_e) – Tempo residual necessário para frente de fertilizante (FF) alcançar determinado ponto do sistema, tomando como referência o tempo de avanço (T_{av}).

Frente de Fertilizante (FF) – Definiu-se como frente de fertilizante a solução de fertilizantes, quando dentro das tubulações do sistema de irrigação. O tempo de injeção (T_i) define o tempo que qualquer ponto do sistema fica sob influência da frente de fertilizante (FF). Pode-se exemplificar inferindo que todos os trechos do sistema receberam solução de fertilizante durante mesmo período de tempo, variando, contudo o momento de recebimento dentro da operação de fertirrigação. Na Figura 1 é exemplificada a distribuição das diferentes variáveis do modelo em um momento aleatório do processo de fertirrigação, e na Figura 2 são demonstrados diferentes variáveis do modelo para um cenário aleatório, 60 minutos após iniciada a operação de fertirrigação com T_i igual a 20 minutos, para dois pontos (a) e (b) localizados a 100 metros e 30 metros do cabeçal de controle, respectivamente.



Pi - ponto inicial do sistema (cabeçal de controle);

Pex - ponto mais extremo do sistema;

FF – frente de fertilizante;

T_{av} - tempo de avanço (min);

T_i – tempo de injeção (min);

T_e – tempo de espera (min);

T_{ms} – tempo mínimo de funcionamento do sistema

Figura 1: Exemplificação do esquema de distribuição temporal das variáveis do modelo, para um dado momento de funcionamento do sistema de irrigação.

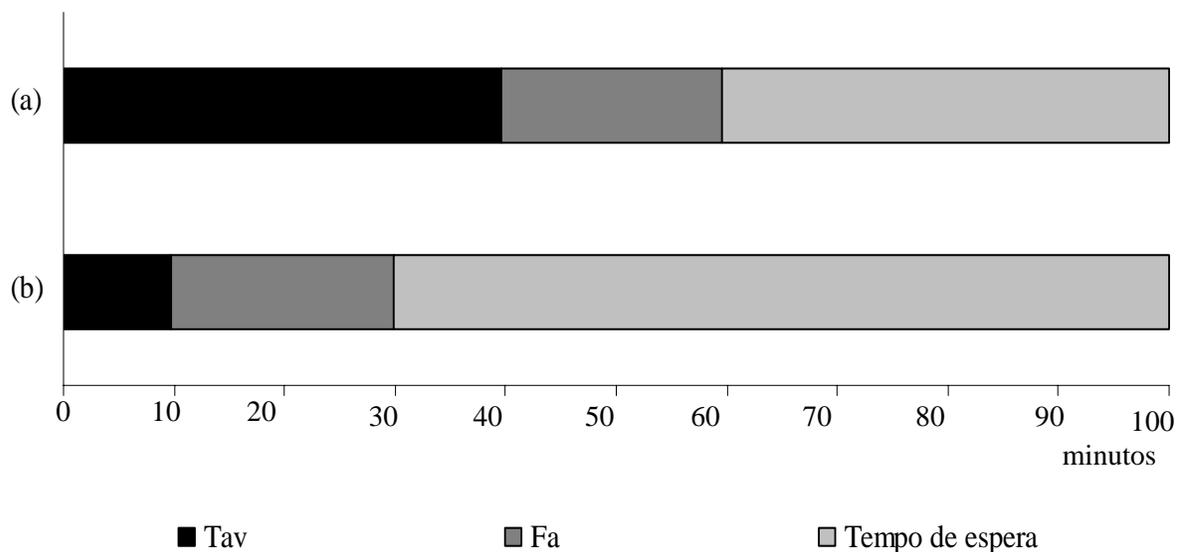


Figura 2: Representação (localização temporal) esquemática de diferentes variáveis do modelo para dois pontos (a) e (b) de um dado sistema de irrigação.

Tempo de atraso (Ta) – Intervalo de tempo necessário para que a solução de fertilizante avance entre dois trechos subsequentes do sistema de irrigação (Equação 8). Foi obtido a partir da equação da continuidade (Equação 5). Não é um valor acumulativo. O tempo de atraso (Ta), bem como os tempos máximos de fertirrigação (Tmax) e o tempo de avanço (Tav) são demonstrados graficamente na Figura 3.

$$Ta = \left(\frac{\pi CD^2}{4} \right) Q^{-1} \quad (8)$$

Em que:

Ta = tempo de atraso (s);

C = comprimento do trecho (m);

D = diâmetro da seção (m);

Q = vazão do trecho ($m^3 s^{-1}$).

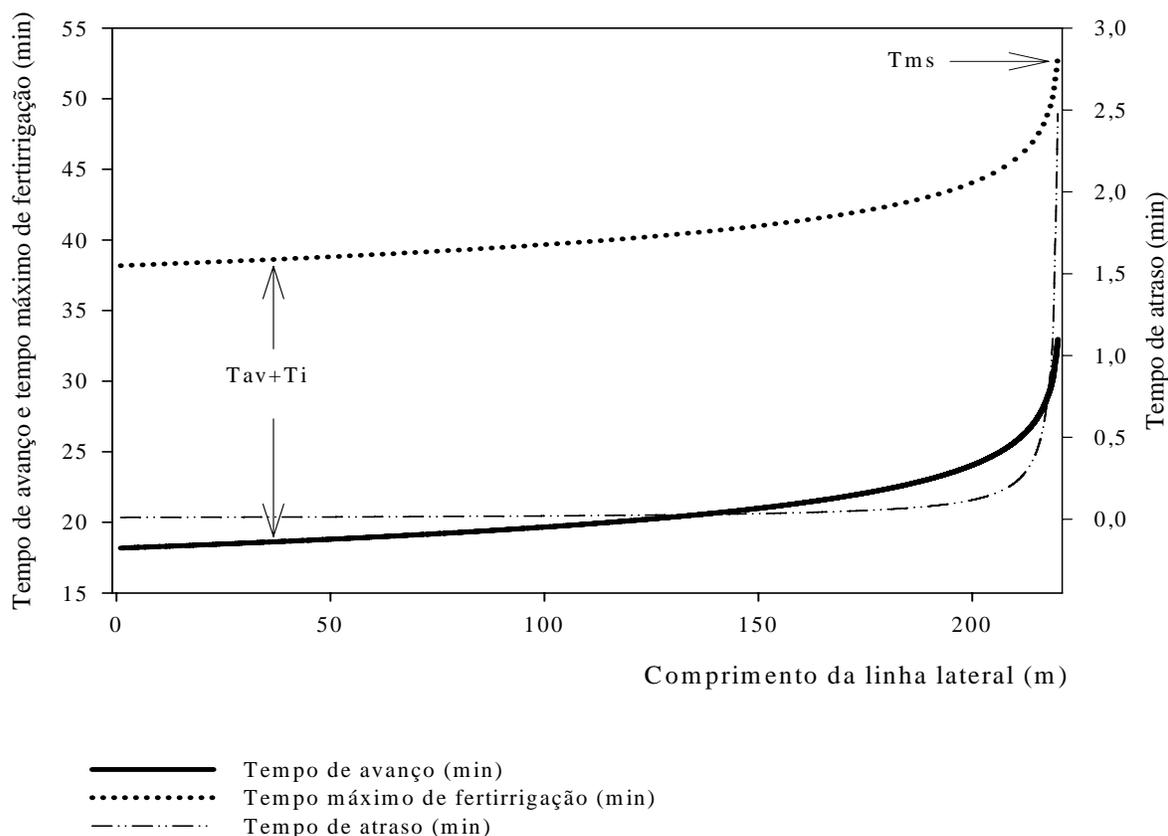


Figura 3: Variáveis componentes do modelo. Exemplificação para uma linha lateral aleatória.

Tempo de avanço (T_{av}) - Tempo necessário (Equação 9) para a solução de fertilizantes a partir do cabeçal de controle, alcançar determinado trecho do sistema de irrigação, ou até mesmo o final das linhas laterais. Foi obtido somando os valores dos tempos de atraso anteriores ao ponto de interesse. Teve como referência o momento inicial da injeção do fertilizante (nesse T_{av}=0 para todos os pontos do sistema). O ponto mais distante do cabeçal de controle estava sujeito ao maior tempo de avanço.

$$T_{av} = \sum_{i=1}^n T_{a_i} \quad (9)$$

Tempo máximo de fertirrigação (T_{max}) - Intervalo necessário para que, a partir do instante inicial da operação de injeção do fertilizante no sistema, seja finalizada a operação de fertirrigação para determinado trecho do sistema, não necessariamente para todo sistema de irrigação. Definiu-se que a operação de fertirrigação para determinado trecho do sistema é

finalizada após a passagem da frente de fertilizante (FF) dentro da tubulação. A Equação 10 demonstra como é composto o tempo máximo de fertirrigação (T_{max}).

$$T_{max} = T_{av} + T_i \quad (10)$$

Tempo mínimo de funcionamento do sistema (T_{ms}) – Intervalo de tempo necessário para que o ponto mais extremo do sistema atingisse T_{max} . Nesse instante, pode-se considerar que o sistema está completamente lavado, podendo ser desligado. Caso ocorra a necessidade de ministrar alguma lâmina extra de irrigação, deve ser considerado a necessidade hídrica da cultura e o caminhamento dos fertilizantes no bulbo úmido.

Tempo bruto de funcionamento do sistema de irrigação (T_b) – Tempo de funcionamento do sistema de irrigação a partir do momento que foi iniciada a injeção do fertilizante. O valor máximo do tempo bruto de funcionamento do sistema (T_b) é obtido quando a operação de fertirrigação é finalizada. Fez-se necessário para o cálculo das quantidades fornecidas de fertilizantes em cada ponto de emissão para diferentes momentos da operação de fertirrigação.

Tempo líquido de funcionamento do sistema de irrigação (T_L) – É a diferença entre o tempo bruto de funcionamento do sistema e a duração da frente de fertilizante para os diferentes trechos do sistema. O T_L (Equação 11) tem seu valor máximo igual ao tempo de exposição a frente de fertilizante (FF), que é igual ao tempo de injeção (T_i). Na Figura 4 é demonstrado graficamente o comportamento do tempo bruto (T_b) e do tempo líquido (T_L) de funcionamento de sistemas de irrigação. A Figura 5 ilustra a distribuição temporal de T_L e T_b para um determinado trecho de um sistema de irrigação aleatório, em que T_{ms} é de 50 minutos e T_i é igual a 25 minutos. As quatro situações (a), (b), (c) e (d) simulam quatro momentos para uma mesma situação. Assim como T_b , T_L é necessário para o cálculo das quantidades fornecidas de fertilizantes em cada ponto de emissão. T_b e T_L são parâmetros usados na análise da distribuição espacial e temporal do fertilizante nas linhas laterais.

$$T_L = T_b - T_{av} \quad (11)$$

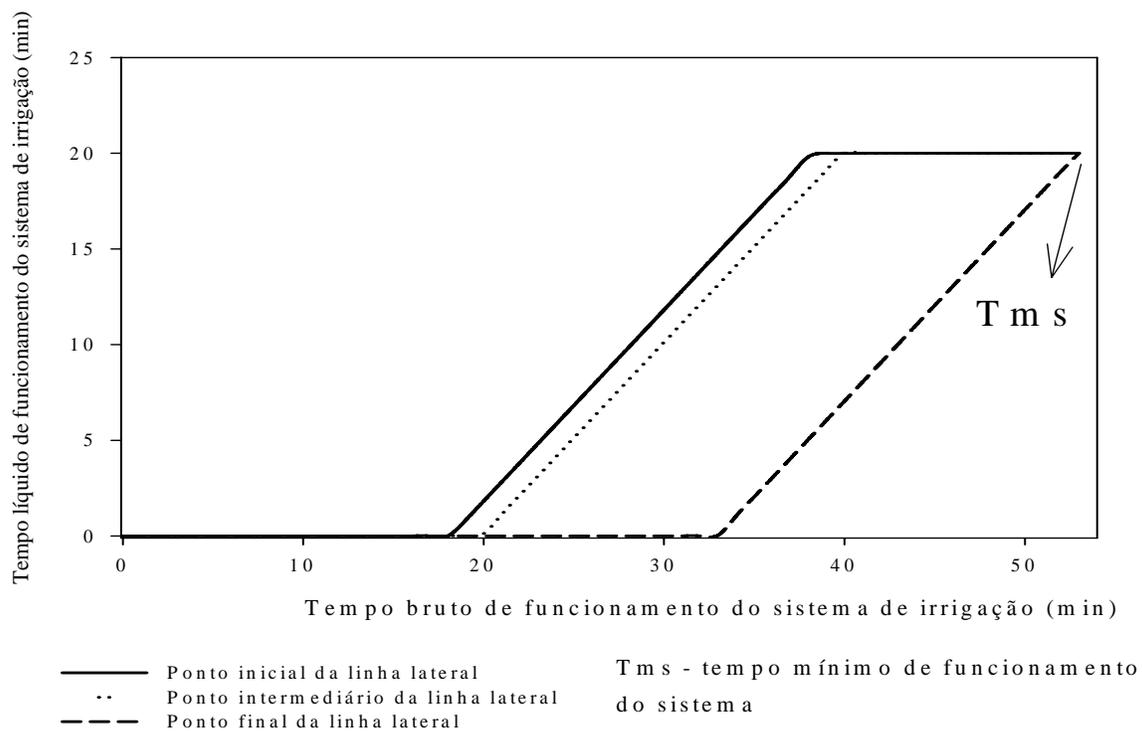


Figura 4: Relação entre o tempo bruto e o tempo líquido de funcionamento de um sistema de irrigação.

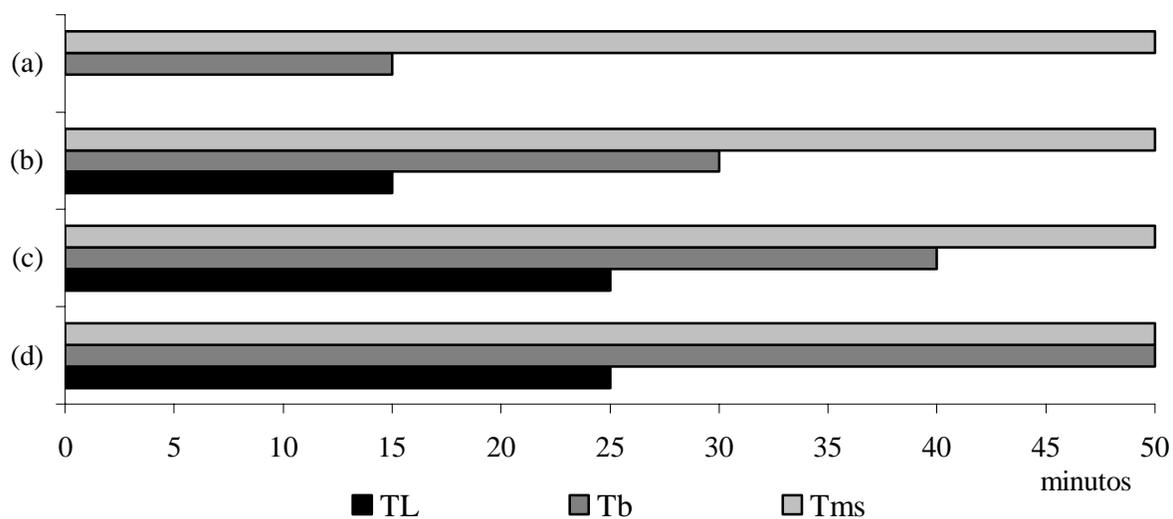


Figura 5: Representação (localização) esquemática de diferentes variáveis do modelo para um dado sistema de irrigação.

Fertilizante acumulado (Fert acm) – Quantidade total de fertilizante fornecido para cada momento de funcionamento do sistema, para os diferentes pontos de emissão. Foi obtido pela soma das quantidades fornecidas pela solução de fertilizantes e água de irrigação.

Fertilizante pontual (Fert pont) – Quantidade de fertilizante fornecido pontualmente para cada instante do funcionamento do sistema. Obtido pela diferença de dois valores seqüenciais de Fertilizante acumulado (Equação 12).

$$Fertpont = \Delta fertacm = fertacm_i - fertacm_{i-1} \quad (12)$$

A Figura 6 apresenta o fluxograma do modelo desenvolvido. As respostas a serem obtidas pelo sistema são principalmente o tempo mínimo de funcionamento do sistema (Tms) e a concentração do fertilizante no ponto de emissão.

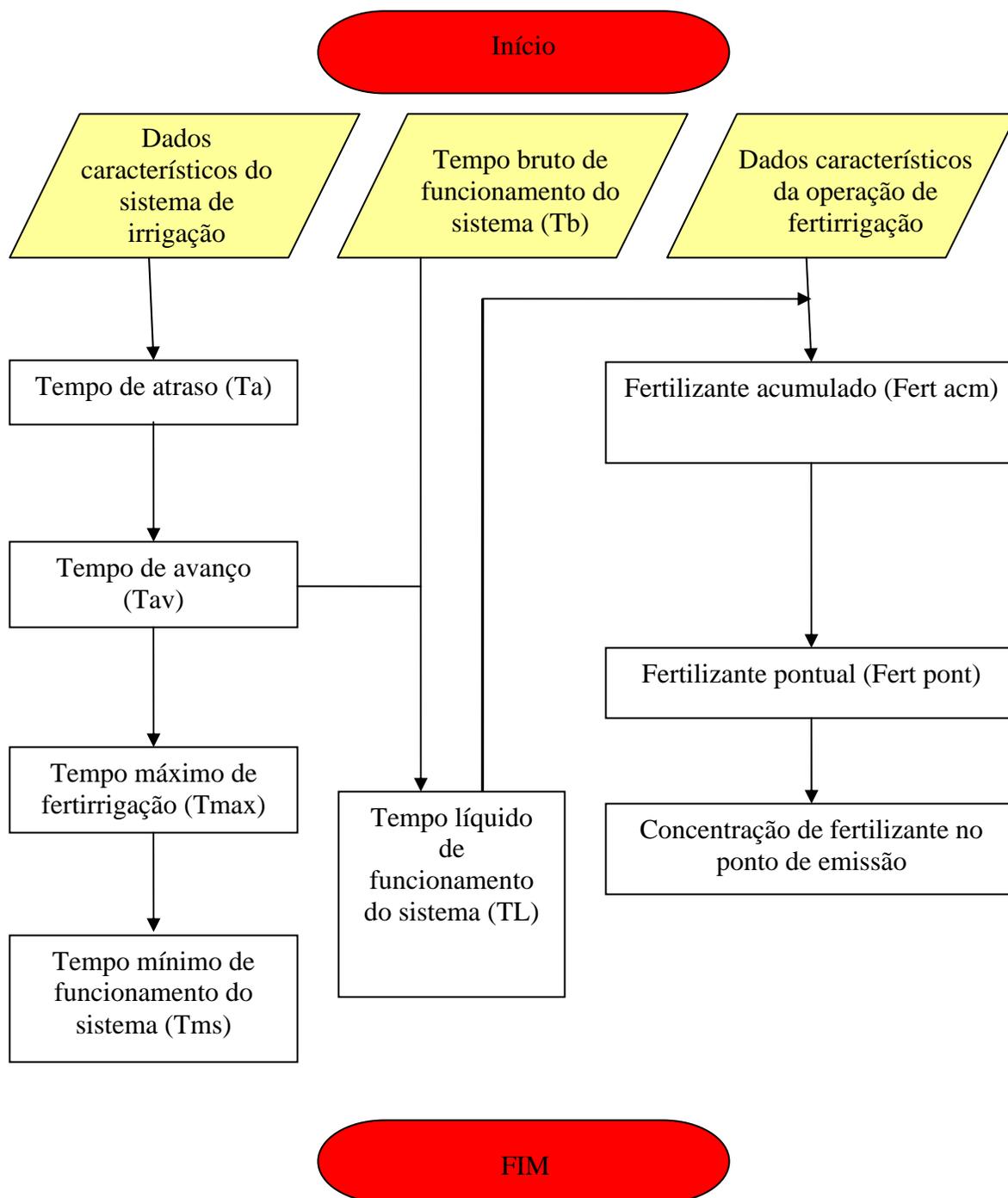


Figura 6: Fluxograma do modelo desenvolvido.

5.2 Levantamento de dados

Visando estudar a dinâmica da distribuição espacial e temporal da concentração de fertilizantes e da quantidade de fertilizantes fornecida por cada ponto de emissão do sistema durante o processo de fertirrigação, e promover a posterior validação do modelo proposto, foram estudados dois sistemas de irrigação em diferentes situações de uso.

5.2.1 Sistema de irrigação I

Foram obtidos dados em um sistema de irrigação localizada montado na área de experimentação do departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônomicas - Unesp, localizada no município de Botucatu – SP. A área ocupada pelo experimento era sistematizada, não havendo assim variações significativas de altura geométrica.

O sistema de irrigação foi dimensionado visando simular um setor de um pomar de citros, no qual foram instaladas seis linhas laterais de 200 metros cada. Para tanto foram utilizadas mangueiras de polietileno PN 30, marca Plasnova com diâmetro interno de 20 mm. Foram instaladas tomadas de pressão no início, no meio e no fim das linhas laterais amostradas durante os ensaios. O objetivo inicial de estudo desse sistema, que não foi o enfoque do presente trabalho, foi a comparação entre a variação da uniformidade de distribuição espacial e temporal dos fertilizantes quando aplicado por três diferentes injetores: um injetor tipo venturi, uma bomba injetora proporcional Dosmatic e uma bomba injetora elétrica Multifertic; sendo que os tratamentos eram constituídos de quatro tempos de injeção (10, 15, 20 e 25 minutos). Todavia, os valores mensurados de concentração e quantidade de fertilizante aplicado pelos tratamentos foram utilizados para validação do modelo proposto, que foi o enfoque do trabalho em questão.

Foi adotado o espaçamento de 7 x 5 m, compreendendo um total de quarenta pontos de emissão por linha lateral. Em cada ponto de emissão foi “derivada” uma mangueira de polietileno com 16,10 mm de diâmetro interno e 1,5 m de comprimento, na qual foram instalados quatro gotejadores autocompensantes marca Netafim modelo PCJ, com

vazão de 8 L h^{-1} . De acordo com dados obtidos em laboratório, esses gotejadores apresentavam coeficiente de descarga (Kd) igual a 8,10 e expoente de descarga (x) igual a 0,049. De acordo, com o fabricante a faixa pressão indicada para uso desses gotejadores era de 5 a 40 mca.

Nas linhas de derivação e na linha principal foram utilizadas tubulações de polietileno com diâmetro de $1 \frac{1}{2}$ polegada. Na linha principal, usou-se um regulador de pressão marca Netafim de $1 \frac{1}{2}$ polegada, com regulagem para 30 mca. Também foram instaladas tomadas de pressão antes e depois do regulador de pressão.

O cabeçal de controle foi disposto a 17,5 m do centro do sistema de irrigação, confeccionado com tubulação de PVC de 2 polegadas. Nesse foram instalados manômetro, registros, filtro e os injetores de fertilizantes. Foi utilizado um filtro de disco marca Arkall de 120 mesh nos ensaios com os injetores venturi e Multifertic; e posteriormente nos ensaios com a bomba injetora Dosmatic, de acordo com instruções do fabricante, fez-se necessário o uso de um filtro de 150 mesh.

Analisou-se a uniformidade de distribuição de água, utilizando-se como parâmetro o CUC (Coeficiente de Uniformidade de Christiansen), adotando como preconizado por Bernardo (1995) a coleta em oito pontos de cada linha lateral. Coletou-se durante 3 minutos o volume de cada gotejador, que foi de aproximadamente 400 mL, sendo que foram realizadas três repetições.

Nos ensaios de fertirrigação foi utilizado o fertilizante KCl branco. Após análise no laboratório de Fertilizantes e Corretivos do Departamento de Recursos Naturais / Ciência do Solo da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Unesp, constatou-se que esse fertilizante apresentava 62% de K_2O . A quantidade desse fertilizante a ser dissolvida em água para constituir solução, foi determinada de acordo com as recomendações de Raij et al. (1997) para citros; ficando estabelecida a dose de 260 g de KCl, em cada parcelamento da fertirrigação, para 0,7 ha irrigado pelo sistema.

Antes de cada fertirrigação o fertilizante era solubilizado em um determinado volume de água para cada tratamento (Tabela 1). Como forma de garantir melhor solubilização, fez-se uso de um agitador, com uma haste de 67 cm, com duas hélices de 4 cm, acoplada a um motor de 1 cv.

Tabela 1 Volume (L) de solução injetada nos diferentes tratamentos.

	10 minutos	15 minutos	20 minutos	25 minutos
	Vol. (L)	Vol. (L)	Vol. (L)	Vol. (L)
Injetor venturi	16	24	32	40
Bomba Multifertic	17	25	33	41
Bomba Dosmatic	16	24	32	41

A escolha das linhas laterais para avaliar a distribuição do fertilizante seguiu a metodologia proposta por Keller & Karmeli (1974), ou seja, foram analisadas a primeira linha lateral, a situada a 1/3 do comprimento, a situada a 2/3 e a última linha lateral. Conforme recomendado por Bernardo (1995), a amostragem de solução nas linhas laterais foi realizada no primeiro ponto de emissão e nos localizados a 1/7, 2/7, 3/7, 4/7, 5/7, 6/7 do comprimento da linha lateral e no último ponto de emissão.

O experimento foi composto por quatro tempos de injeção de fertilizante (10, 15, 20 e 25 minutos), ou seja, todo o fertilizante era aplicado nesses tempos, com quatro repetições. Durante cada tempo de injeção foram recolhidas sempre sete amostras por ponto de coleta, sendo que ficou estabelecido a divisão do tempo de injeção em cinco partes iguais, e mais duas de mesma duração, que compreenderiam o início do período de lavagem do sistema de irrigação. Exemplificando para o tempo de 25 minutos de injeção, foram coletadas amostras a 5, 10, 15, 20, 25 minutos, durante o período de injeção e mais duas amostras a 30 e 35 minutos após início da injeção correspondendo ao início do período de lavagem da tubulação.

Para cada intervalo coletou-se todo o volume de solução em garrafas tipo “pet” de 2 L, retirando-se uma subamostra em recipientes de plástico de 80 mL para ser levada ao laboratório. Em cada ponto de coleta encontravam-se duas garrafas “pet”, enquanto uma estava sendo cheia, era retirada a subamostra da outra, e assim sucessivamente.

Tendo em vista a coleta de solução simultânea em toda extensão do sistema, fizeram-se necessárias durante a condução do experimento dezesseis pessoas no mínimo, uma vez que cada pessoa ficou responsável por dois pontos de coleta situados em

duas linhas laterais adjacentes. Entretanto em algumas ocasiões por falta de pessoal, realizou-se primeiramente a análise de metade do sistema, com oito pessoas, e posteriormente fez-se a análise da outra metade. Partiu-se do princípio que se as condições de vazão e pressão estavam sendo controladas, e mostravam-se constantes, não haveria variações significativas da uniformidade de distribuição do fertilizante nas duas etapas de estudo do mesmo tempo de injeção.

5.2.2 Sistema de irrigação II

O segundo sistema de irrigação estudado (Figura 7 a 9) pertence a uma empresa agrícola citrícola localizada no município de Reginópolis – SP. O pomar planejado para se adequar ao sistema de irrigação foi plantado no espaçamento de 7,0 metros entre linhas de plantio e 4,0 metros entre plantas. Cada linha de plantio recebia uma linha lateral de irrigação, sendo essas implantadas com tubogotejadores da marca Netafim, modelo Ram 16Q, com espaçamento de 0,6 metro entre emissores, e vazão de $2,3 \text{ L h}^{-1}$. De acordo com a empresa fabricante esse tubo gotejador apresenta as seguintes dimensões: 0,9 mm - espessura de parede, 16 mm – diâmetro externo, 14,2 mm – diâmetro interno, 5 a 30 mca - faixa de variação de pressão admissível; e os gotejadores instalados dentro dos tubos gotejadores possuíam coeficiente de descarga (Kd) igual a 2,3 e expoente de descarga (x) igual a 0.

A área total irrigada pelo sistema era de 74,82 ha, dividida em três subunidades operacionais. O turno de rega para cada subunidade era de 1 dia com duração máxima de 03h23min, tendo o dia de trabalho a duração de 10h09min.

As medições foram realizadas na subunidade operacional, denominada “operação 3”, com uma área de 25,07 ha. A operação 3 é subdividida em dez blocos operacionais, que funcionavam simultaneamente, com vazão total de $138,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, aplicando uma lâmina média de $0,55 \text{ mm h}^{-1}$. Três blocos operacionais (A, B e C) foram escolhidos para serem analisados em função das suas distâncias ao cabeçal de controle, sendo amostrada uma linha lateral por bloco para coleta da solução de fertirrigação. Nessas eram coletadas amostras de solução nos pontos de emissão situados no início, meio e final da linha de plantio.

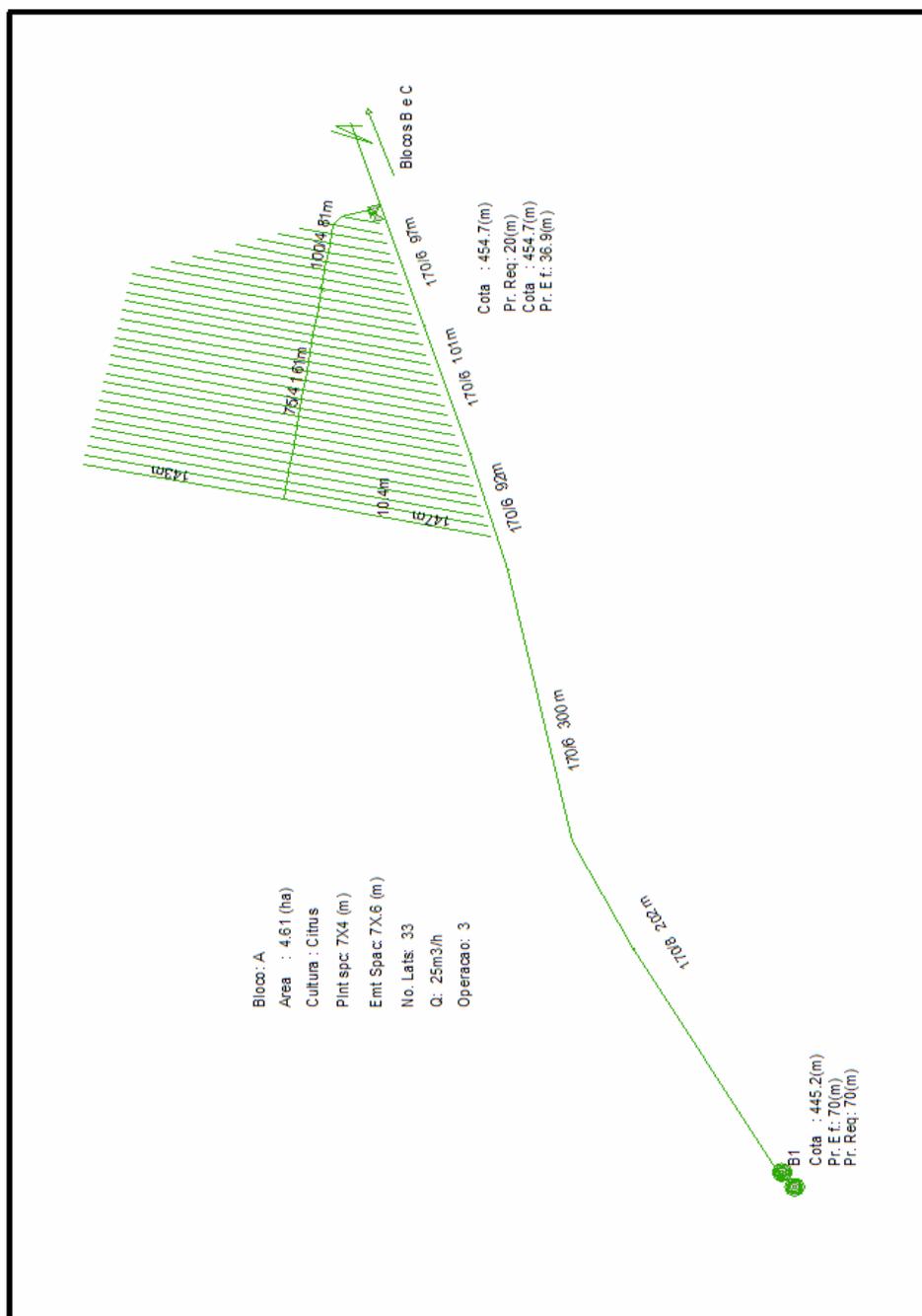


Figura 7: Croqui do bloco A do Sistema de Irrigação II.

A metodologia para recolhimento das amostras foi sempre a mesma, após iniciada a injeção era coletado todo o conteúdo de 5 minutos de vazão dos pontos de emissão amostrados, sendo retirada uma alíquota desse total em um recipiente de aproximadamente 80 mL. Esse processo era repetido até que no ponto extremo da linha de irrigação amostrada não houvesse mais a saída de solução de fertirrigação, que era monitorada com a leitura de condutividade elétrica (EC) realizada durante todo o processo. Os blocos mais extremos da operação começaram ter a solução coletada, também a partir do monitoramento da condutividade elétrica da solução de fertirrigação, como forma de racionalizar o número de amostras. Nota-se que diferente do Sistema de Irrigação I, o número de amostras por linha lateral foi menor, houve uma racionalização, uma vez que havia menos pessoas disponíveis para o levantamento dos dados em campo, e a observação dos dados obtidos no estudo do Sistema I demonstravam que para a aferição do modelo não era necessário que a amostragem fosse realizada conforme relatado para o sistema.

O bloco denominado bloco A com área de 4,62 ha, demandava uma vazão de $25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Localizado na porção mais próxima ao cabeçal de controle, era separado deste por uma linha lateral de 792 metros de comprimento. A linha de derivação que servia esse bloco apresentava o comprimento total de 262 metros. De acordo com dados do projeto esse bloco requeria que a válvula reguladora de pressão situada na entrada da linha de derivação trabalhasse com 16 mca. O detalhamento da linha principal e de derivação é apresentado na Tabela 2. Na linha de derivação existiam 33 saídas de linhas laterais, sendo que na maioria dos casos, cada saída atendia a duas linhas laterais, perfazendo um total de aproximadamente 66 linhas laterais. Foi analisada a linha lateral mais distante dentro desse bloco, a qual possuía 143 metros de comprimento, vazão de $0,548 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ e cotas inicial e final iguais a 442 metros e 444 metros, respectivamente.

Tabela 2: Detalhamento da linha principal e derivação relativa ao posicionamento do bloco A.

Trechos	Descrição	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Vazão (m ³ h ⁻¹)	Cotas (m)	
					Inicial	Final
1	LP ¹	202	170	138,0	446	446
2	LP ¹	300	170	138,0	446	446
3	LP ²	92	170	111,8	448	448
4	LP ²	101	170	111,8	450	450
5	LP ²	97	170	111,8	454	454
6	LD	81	100	25,0	454	452
7	LD	161	75	21,6	450	442

LP* – Linha principal

* - Trecho da linha principal (intervalos que apresentaram variação de vazão ou diâmetro)

LD – Linha de derivação

O bloco B com área igual a 7,54 ha foi escolhido por ser o que melhor caracterizava a metade do maior deslocamento da solução de fertilizante na operação 3, a partir do cabeçal de controle. A vazão e carga hidráulica, após a válvula reguladora, requeridas para esse bloco eram de 40,9 m³ h⁻¹ e de 19 mca, respectivamente. Nesse, a linha principal além dos trechos descritos para o bloco A, possuía ainda quatro trechos, tendo 1360 metros de comprimento total. A linha de derivação tinha 309 metros de comprimento total, contudo como foi amostrada a primeira linha lateral desse bloco, para efeito de aferição do modelo proposto considerou-se somente um trecho de 11 metros, de acordo com o apresentado na Tabela 3, que detalha as linhas principal e de derivação relativas ao posicionamento do bloco B. A linha lateral amostrada tinha 132 metros de comprimento, vazão de 0,506m³ h⁻¹ e cota de 438 metros.

Tabela 3: Detalhamento da linha principal e derivação relativa ao posicionamento do bloco B.

Trechos	Descrição	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Vazão (m ³ h ⁻¹)	Cotas (m)	
					Inicial	Final
1	LP ¹	202	170	138,5	445	446
2	LP ¹	300	170	138,5	446	448
3	LP ²	92	170	111,9	448	450
4	LP ²	101	170	111,9	450	454
5	LP ²	97	170	111,9	454	454
6	LP ³	116	170	86,8	454	452
7	LP ³	125	170	86,8	452	446
8	LP ³	85	170	86,8	446	440
9	LP ⁴	242	150	45,8	440	439
11	LD	11	150	45,8	439	438

LP* – Linha principal

* - Trecho da linha principal (intervalos que apresentaram variação de vazão ou diâmetro)

LD – Linha de derivação

O ponto mais extremo do sistema de irrigação para a operação de irrigação 3 era a linha lateral mais extrema presente no bloco C. A área total do bloco corresponde a 4,49 ha, que determinava uma vazão de 24,3 m³ h⁻¹ e demandava uma carga hidráulica de 12 mca após a válvula reguladora de pressão. A água de irrigação e solução de fertilizante era conduzida até esse ponto passando por 2420 metros de linha principal e 249 metros de linha de derivação. No bloco C foram contabilizadas 38 saídas para linhas laterais, o que determinava 76 linhas laterais aproximadamente. A linha lateral estudada tinha o comprimento de 92 metros, vazão de 0,353 m³ h⁻¹ e cota de 419 metros. A Tabela 4 demonstra o detalhamento das linhas principal e de derivação relativas ao bloco C.

Tabela 4: Detalhamento da linha principal e derivação relativa ao posicionamento do bloco C.

Trechos	Descrição	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Vazão (m ³ h ⁻¹)	Cotas (m)	
					Início	Fim
1	LP ¹	202	170	138,5	445	446
2	LP ¹	300	170	138,5	446	448
3	LP ²	92	170	111,9	448	450
4	LP ²	101	170	111,9	450	454
5	LP ²	97	170	111,9	454	455
6	LP ³	116	170	86,8	455	452
7	LP ³	125	170	86,8	452	446
8	LP ³	85	170	86,8	446	440
9	LP ⁵	27	125	45,8	440	440
10	LP ⁵	90	125	45,8	440	440
11	LP ⁵	82	125	45,8	438	438
12	LP ⁵	93	150	45,8	438	432
13	LP ⁵	93	150	45,8	432	428
14	LP ⁵	81	150	45,8	428	420
15	LP ⁵	58	150	45,8	420	420
16	LP ⁵	85	150	45,8	420	424
17	LP ⁵	143	150	45,8	424	428
18	LP ⁵	114	150	45,8	428	438
19	LP ⁶	141	125	24,3	438	440
20	LP ⁶	130	125	24,3	440	440
21	LP ⁶	165	125	24,3	440	444
22	LD	150	75	24,3	444	430
23	LD	99	50	10,6	430	420

LP* – Linha principal

* - Trecho da linha principal (intervalos que apresentaram variação de vazão ou diâmetro)

LD – Linha de derivação

A operação de fertirrigação para o Sistema de Irrigação II foi realizada seguindo o procedimento padrão estabelecido no planejamento da fazenda. De acordo com os dados fornecidos em cada operação de fertirrigação foram fornecidos 50 kg de Map, 230 kg de KCl e 550 kg de nitrato de amônio. O volume de solução injetado em média era de 1800 L, por meio de uma bomba de pistão acoplada a um trator. A taxa de injeção era de aproximadamente 5500 L h^{-1} , e o tempo médio de injeção era de 20 minutos.

5.3 Validação do modelo

A validação do modelo foi realizada a partir de observações comparativas entre os valores estimados e valores mensurados em campo para os dois sistemas de irrigação em questão. Como parâmetros de comparação, foram utilizados os erros quadráticos médios para cada observação (EQM) (Equação 16) e os erros absolutos médios (EMA) (Equação 17). Foram realizadas observações quanto a concentração das soluções coletadas, e quanto a quantidade de fertilizante fornecida nos pontos de emissão amostrados.

Fazendo uso do software Table Curve2D V5.01 foram obtidos os coeficientes de determinação (r^2) e os coeficientes de correlação (r). Quanto mais a equação ajustada se aproximou da reta 1:1, mais os valores estimados se aproximaram dos valores medidos, e quanto maior o valor de r^2 menor foi a dispersão dos pontos estimados. Assim como, quanto mais próximos de 1 estiverem os valores do coeficiente de correlação (r), maior será a correlação entre os valores estimados e reais.

5.4 Coleta das amostras de solo

Com o objetivo de estudar o deslocamento dos fertilizantes estudados nos bulbos úmidos em diferentes pontos do sistema de irrigação, foram coletadas 60 amostras de solo nos blocos A, B e C do Sistema de Irrigação II. A amostragem buscou refletir diferentes pontos do bulbo úmido, sendo coletadas amostras de 20 em 20 centímetros, tanto vertical como horizontalmente, até um limite de 80 cm, contado a partir do gotejador, tido como ponto 0. Foi retirado um total de 20 amostras por bulbo amostrado.

5.5 Análise das amostras

Procedeu-se a análise das amostras de solução de fertilizantes no Laboratório de Fertilizantes e Corretivos do Departamento de Recursos Naturais / Ciência do Solo. Os dados levantados no Sistema de Irrigação I e Sistema de Irrigação II tiveram a concentração de K_2O determinada via fotometria de chama. A análise via fotometria de chama demandou que as amostras, em quase sua totalidade, fossem diluídas. Como forma de verificar a correlação entre a concentração de fertilizantes e condutividade elétrica, as amostras relativas ao Sistema de Irrigação II tiveram seu valores de EC mensurados de forma direta, ou seja, foram medidos da forma como chegaram do campo.

As amostras de solo coletadas foram analisadas no Laboratório de Fertilidade e no Laboratório de Fertilizantes e Corretivos do Departamento de Recursos Naturais / Ciência do Solo, nos quais tiveram seus valores K^+ e $NO_3^- + NH_4^+$ mensurados, respectivamente.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Análise dos dados coletados e estimados

Conforme a metodologia descrita, as amostras coletadas durante os ensaios representavam uma subamostra de todos intervalos amostrais: 2, 3, 4 e 5 minutos para o Sistema de Irrigação I e 5 minutos para o Sistema de Irrigação II. Durante a elaboração do modelo matemático, buscou-se analisar a dinâmica da solução de fertilizantes em intervalos de um minuto após iniciado o processo de fertirrigação. Dessa forma, para ser realizada a comparação entre os resultados sugeridos pelo modelo e os dados obtidos em campo, houve a necessidade de serem feitas médias aritméticas dos valores pontuais do modelo que se relacionavam com o intervalo de tempo amostrado em campo. Exemplificando, para o ponto de emissão (Pe) 1, na Tabela 5 se houvesse a necessidade de ser comparada a concentração da amostra retirada entre o intervalo de 8 a 12 minutos do tempo bruto de funcionamento do sistema, o valor estimado seria $107,8 \text{ mg L}^{-1}$, obtido a partir da média dos valores estimados para o intervalo sugerido.

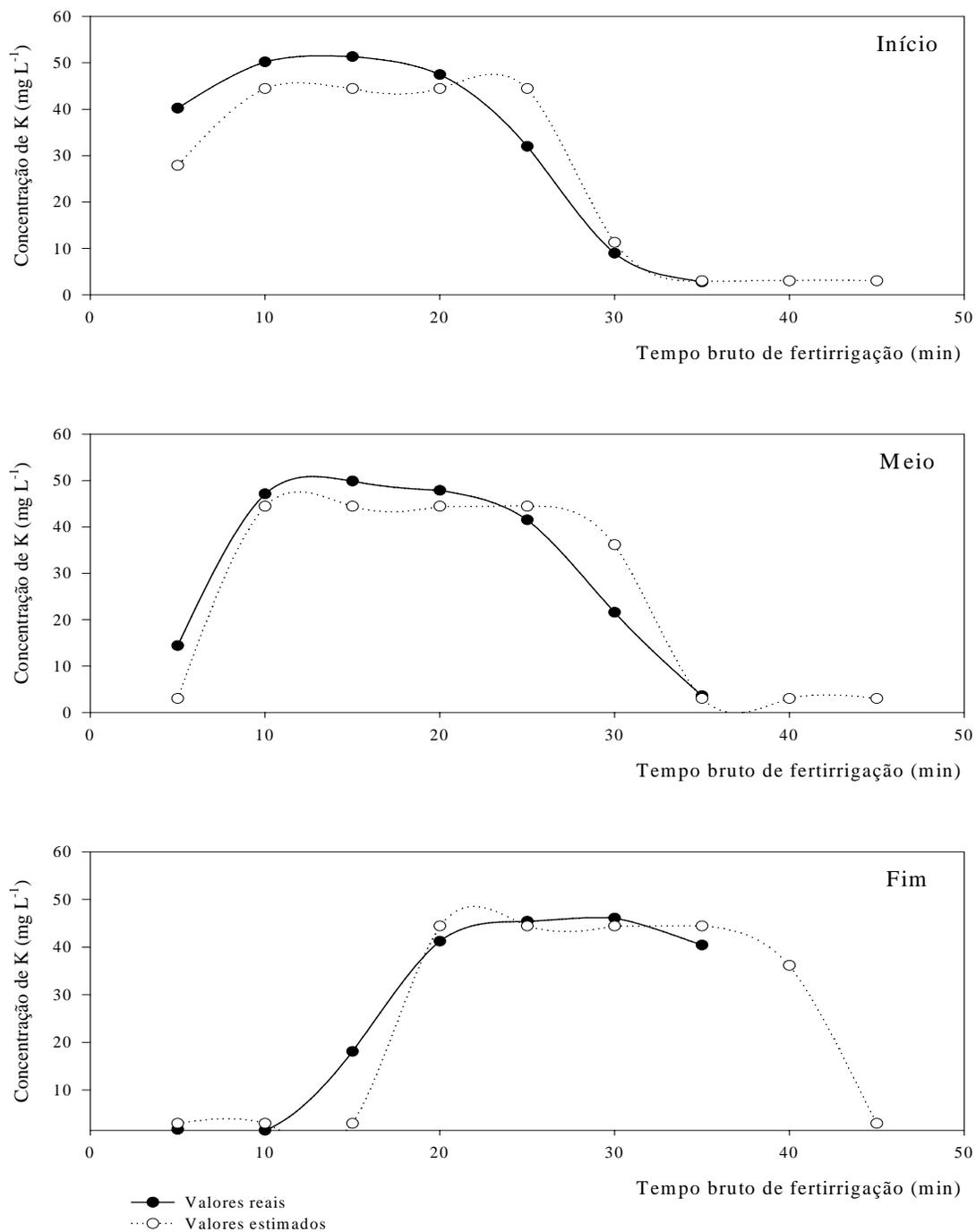


Figura 10: Curvas de distribuição da concentração de K (mg L⁻¹), para o tempo de 25 minutos de injeção no Sistema de Irrigação I.

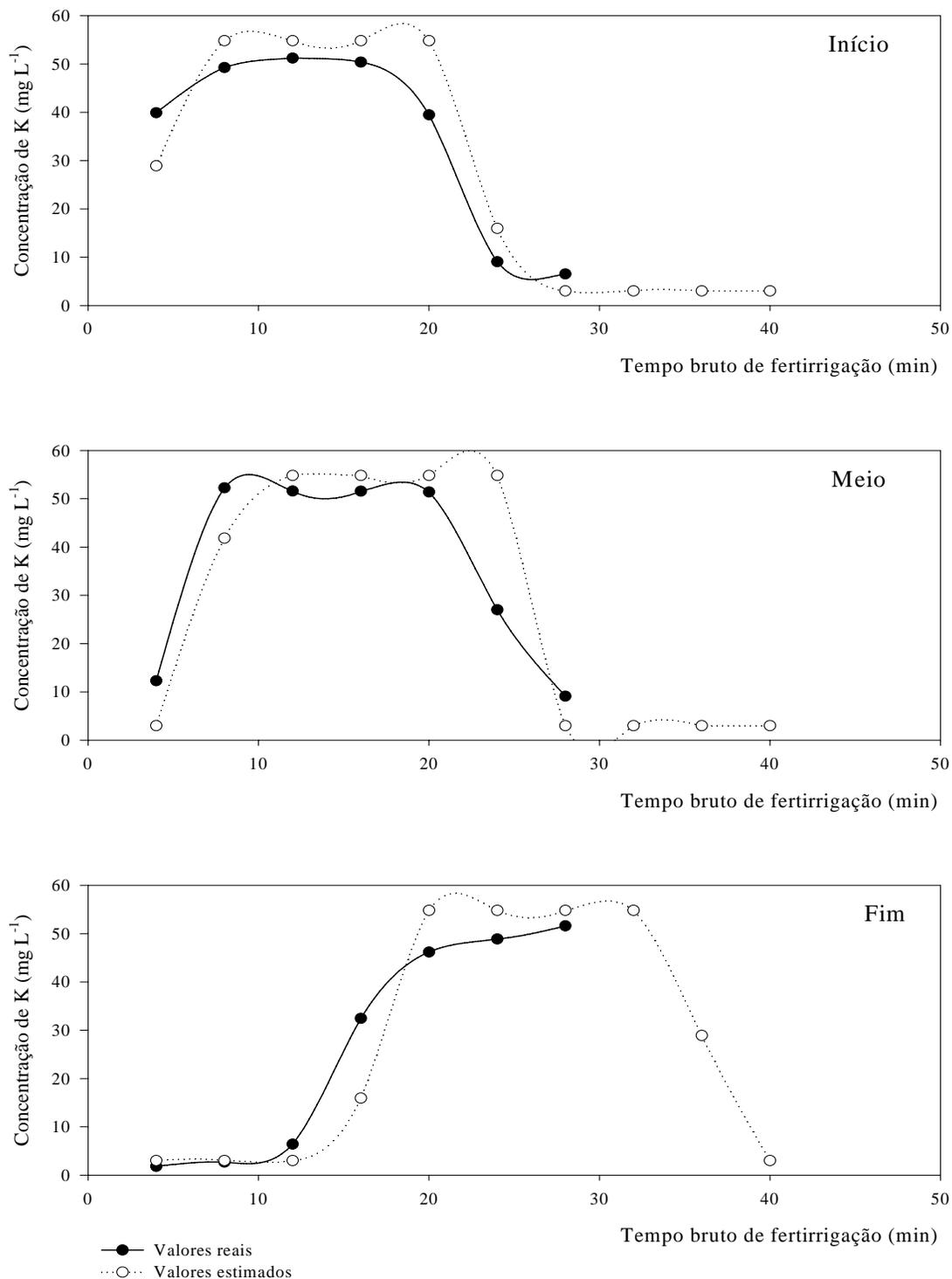


Figura 11: Curvas de distribuição da concentração de K (mg L⁻¹), para o tempo de 20 minutos de injeção no Sistema de Irrigação I.

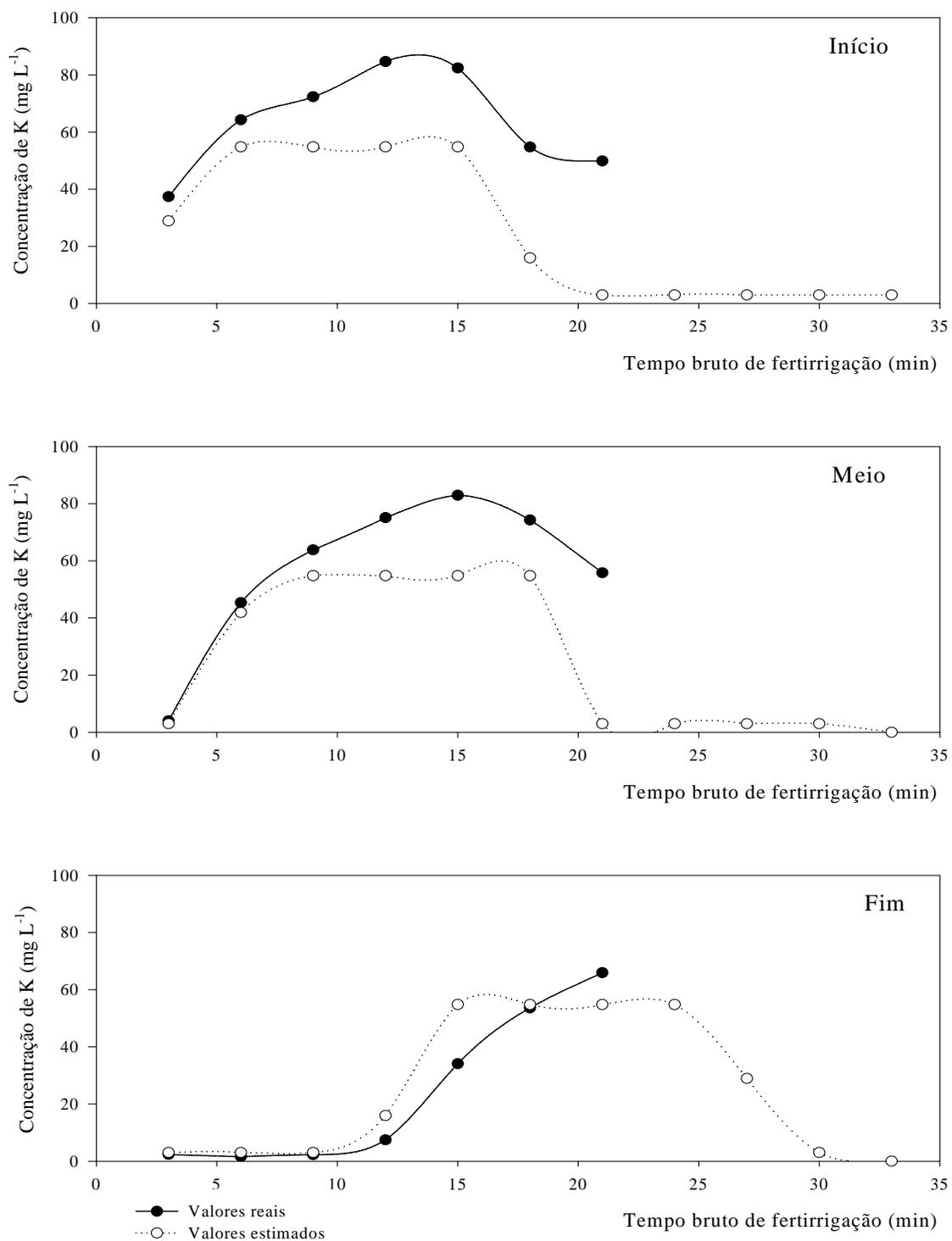


Figura 12: Curvas de distribuição da concentração de K concentração de K (mg L⁻¹), para o tempo de 15 minutos de injeção no Sistema de Irrigação I.

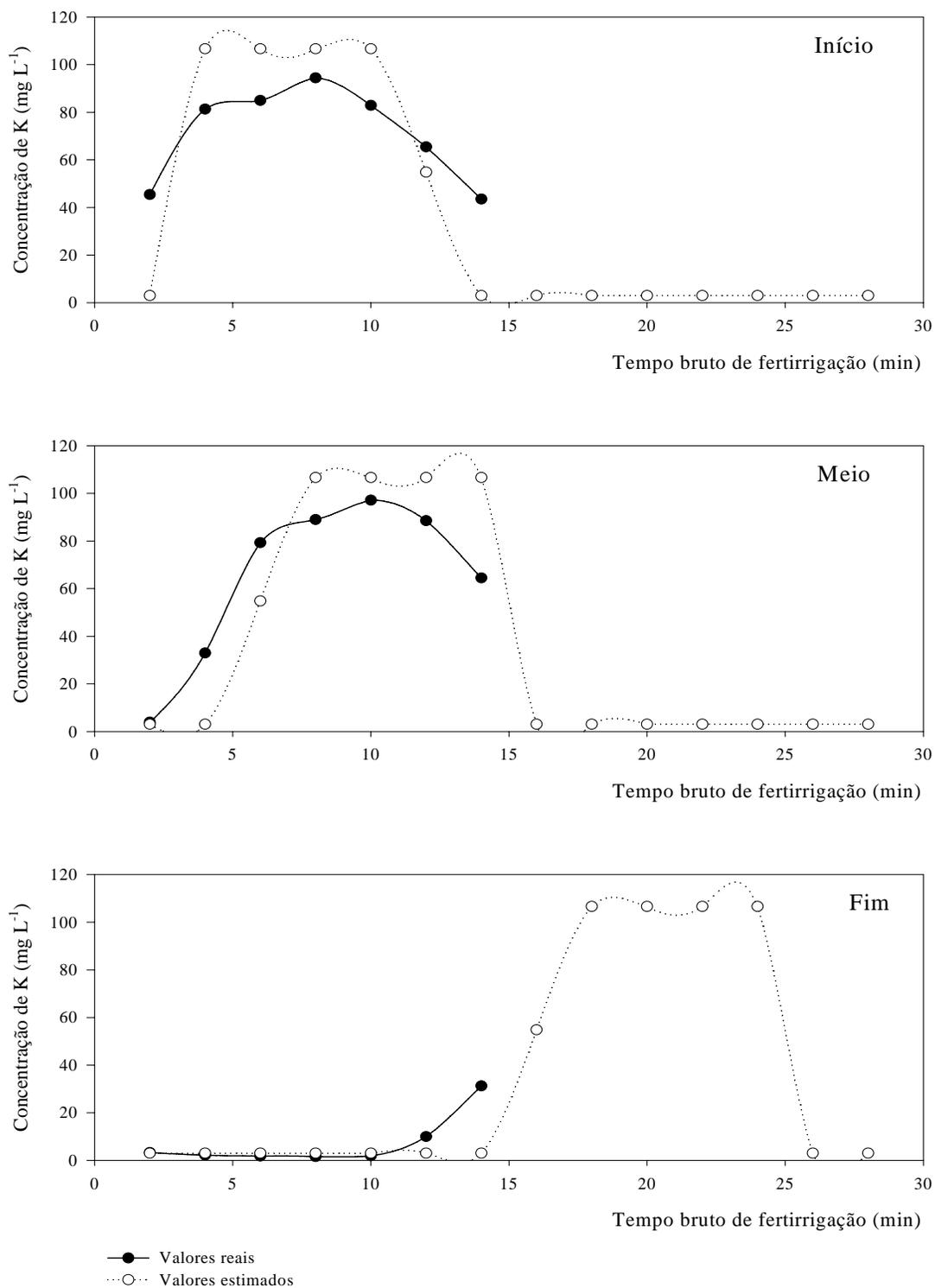


Figura 13: Curvas de distribuição da concentração de K (mg L^{-1}), para o tempo de 10 minutos de injeção no Sistema de Irrigação I.

A análise dos valores mensurados em campo indicou que a dinâmica da concentração de fertilizantes teve, em todas as situações, a mesma tendência de distribuição, ou seja, a concentração para todos os pontos do sistema de irrigação tende a ser uma curva polinomial de 2º grau, independente do tempo de injeção (Ti) dos fertilizantes. De acordo com a Tabela 6, que demonstra os coeficientes das equações polinomiais de 2º grau obtidos a partir dos dados de campo, mesmo o coeficiente de correlação (r) para o tempo de 10 minutos no ponto situado a 200 metros (posição final) do início da linha lateral teve o valor de 0,94, que pode ser considerado satisfatório, uma vez que nessa situação, findado o período de amostragem, a frente de fertilizante não havia alcançado seus valores médios, conforme demonstrado na Figura 13.

Tabela 6: Coeficientes das equações de regressão polinomial de 2º grau ($y=ax^2+bx+c$) representativas da dinâmica do K na tubulação durante o processo de fertirrigação, para o Sistema de Irrigação I.

Tempo de injeção (min)	Posição	a	b	c	r ²	r
25	5	-2,676*	13,768 nd	31,738	0,93	0,96
25	115	-4,473**	32,506*	-8,2845	0,93	0,96
25	200	-1,725 ^{ns}	22,107*	-26,127	0,89	0,94
20	5	-2,875**	16,14 ^{ns}	28,065	0,90	0,95
20	115	-4,855**	36,693**	-13,207	0,89	0,94
20	200	-0,244 ^{ns}	12,003 ^{ns}	-15,976	0,90	0,95
15	5	-4,363**	35,924**	7,2508	0,89	0,94
15	115	-5,254**	50,336**	-38,946	0,99	0,99
15	200	2,413**	-7,643**	6,1868	0,96	0,98
10	5	-5,194**	40,152**	14,415	0,95	0,97
10	115	-7,397**	67,917**	-51,549	0,97	0,98
10	200	1,846**	-11,214*	15,361	0,89	0,94

* - significativo a 5% de probabilidade; ** - significativo a 1% de probabilidade; ^{ns} – não significativo.
Sendo y – Conc de K (mg L⁻¹); e x – tempo bruto de fertirrigação (min)

Todavia, o período amostral foi muito curto para que em todos os pontos fossem visualizadas as fases inicial, intermediária e final da distribuição de fertilizantes, como é demonstrado na Figura 10 referente principalmente aos pontos situados a 200 metros do início das linhas laterais.

A estimativa dos valores via modelo matemático permitiu que fossem geradas curvas de distribuição da concentração de fertilizante para todos os tempos amostrados. A partir dessas, no ponto mais extremo do sistema no momento em que a concentração de K se iguala aos valores mensurados antes da chegada da frente de fertilizante, é obtido o tempo mínimo de funcionamento do sistema (Tms), um dos objetivos do presente trabalho. Essa verificação permite que o manejo do sistema seja mais exato quando comparado a indicação de 1:2:1, usualmente sugerida na literatura, como relatado por Zanini (1987) e Hanson (1996).

Alves (1992) sugere que em trabalhos que têm por objetivo estudar a distribuição espacial e temporal dos fertilizantes, colete-se totalmente o volume aplicado pelo emissor. Todavia, o uso das curvas de distribuição do fertilizante gerado pelo modelo, possibilitaria menor número de amostras a serem coletadas, uma vez que trabalhos dessa natureza podem gerar grande número de amostras, como observado por Oliveira (2002).

De acordo com as variáveis propostas na metodologia, como variáveis presentes na dinâmica da fertirrigação, o tempo mínimo de funcionamento do sistema (Tms) tem como parte constituinte o tempo de injeção (Ti), que determina a duração da frente de fertilizante (FF). Os diferentes tempos de injeção amostrados no Sistema de Irrigação I permitiram visualizar a relação entre essas variáveis. Nas figuras referentes a Ti igual a 25 minutos, para o ponto inicial da linha lateral, no intervalo de 25 a 30 minutos é finalizada a passagem da frente de fertilizante (FF), sendo alcançado o tempo máximo de fertirrigação (Tmax). Todavia, para o ponto mais extremo Tmax só foi obtido 45 minutos após ter sido iniciada a operação de fertirrigação, indicando o Tms. Os tempos de injeção de 25, 20, 15 e 10 minutos tiveram como Tms os intervalos de 45, 40, 35 e 30 minutos, respectivamente.

A variação de vazão nas linhas laterais, e a conseqüente redução da velocidade e do número de Reynolds, é observada na dinâmica apresentada nas Figuras 10 a 13. Para Ti igual a 25 minutos, nos pontos situados a 5 metros (início da linha lateral) e a 115 metros (meio da linha lateral) a diferença de Tmax foi de aproximadamente 5 minutos,

enquanto para o ponto localizado na extremidade final da linha lateral (200 metros) o T_{max} foi alcançado 45 minutos após ter sido iniciada a operação de fertirrigação, o que define uma variação de aproximadamente 10 minutos quando comparado ao ponto intermediário, e 15 minutos quando levado em consideração o ponto inicial. Tais observações estão de acordo com o relatado por Sousa et al. (2000) quando indicaram que nas partes terminais das linhas laterais o regime de escoamento preponderante é o laminar, condição na qual a influência do processo de difusão no transporte dos elementos presentes na solução de fertirrigação é mais expressiva, quando comparada as regiões do sistema caracterizados preponderantemente pelo regime turbulento.

Os dados gerados pelo modelo para a situação operacional do Sistema de Irrigação I tiveram na maioria dos casos uma alta correlação com os valores mensurados em campo (Tabela 7), uma vez que os valores de coeficiente de correlação (r) não se distanciaram do valor máximo 1. Nas situações em que o tempo de injeção foi mais longo (25 e 20 minutos), e, por conseguinte as amostras coletadas representavam de forma mais significativa toda a dinâmica do fertilizante tiveram maiores valores de correlação; enquanto para o tempo de injeção de 10 minutos no ponto situado a 200 m do início da linha lateral, situação que não permitiu visualizar toda a dinâmica do fertilizante, conforme apresentado na Figura 13, foi verificado o menor coeficiente de correlação (r) 0,33.

Tabela 7: Correlação entre os valores de concentração de K (mg L^{-1}) mensurados em campo e gerados pelo modelo proposto para o Sistema de Irrigação I ($y=ax+b$).

Tempo de injeção (min)	Distância (m)	a	b	r^2	r
25	5	3,516**	0,103	0,90	0,95
25	115	1,949**	0,922	0,89	0,94
25	200	8,064**	0,788	0,63	0,79
20	5	2,303**	1,029	0,93	0,96
20	115	2,013**	1,003	0,84	0,92
20	200	14,026*	0,714	0,43	0,66
15	5	0,554**	0,612	0,75	0,87
15	115	1,361**	0,651	0,78	0,88
15	200	13,882**	0,738	0,52	0,72
10	5	-3,257**	1,112	0,83	0,91
10	115	0,595 ^{ns}	1,098	0,88	0,94
10	200	43,387 ^{ns}	-1,909	0,11	0,33

* - significativo a 5% de probabilidade; ** - significativo a 1% de probabilidade; ^{ns} – não significativo.

y – Valores de K (mg L^{-1}) gerados pelo modelo

x – valores de K (mg L^{-1}) mensurados em campo

O erro quadrado médio (EQM) e o erro médio absoluto (EMA), utilizados para auxiliar a análise da correlação entre os valores mesurados e estimados, apresentados na Tabela 8, demonstram que as situações com menores valores de r^2 apresentaram desvios mais expressivos, fato observado principalmente nos erros referentes aos tempos de injeção 15 e 10 minutos. Conforme citado, foram coletadas 7 amostras para cada situação amostrada, assim o valor de “n”, referente ao número total de observações, conforme as Equações 16 e 17, foi determinado como 7, caso fossem considerados mais intervalos, a partir do modelo proposto, os erros seriam maiores. Esse fato foi expresso na situação do ponto extremo da linha lateral ao final de 10 minutos de injeção.

Tabela 8: Erros obtidos a partir dos valores de concentração de K (mg L^{-1}) estimados e mensurados em campo para o Sistema de Irrigação I.

Tempo injeção (min)	Distância (m)	EQM (mg k L^{-1})	EMA (mg k L^{-1})
25	5	8	6
	115	8	6
	200	6	4
20	5	8	7
	115	12	9
	200	8	6
15	5	29	26
	115	25	19
	200	9	6
10	5	28	25
	115	24	20
	200	11	6

EQM – erro quadrado médio

EMA – erro médio absoluto.

6.1.2 Sistema de irrigação II

Os valores de concentração de K (mg L^{-1}) mensurados para o Sistema de Irrigação II, assim como os do Sistema de Irrigação I, apresentaram como característica a tendência de distribuição polinomial de 2º grau (Figuras 14 a 16).

A metodologia utilizada para coleta das amostras permitiu visualizar a dinâmica completa da solução de fertilizante para todos os pontos amostrados, fato que gerou coeficientes de determinação (r^2) e correlação (r) demonstrados na Tabela 9. Nota-se que foram determinados menores valores de r^2 e r em comparação aos encontrados na análise do Sistema de Irrigação I, uma vez que em todos os pontos foram coletadas amostras de solução antes, ou após da chegada da frente de fertilizante (FF). Exemplificando, para o ponto situado no início da linha lateral, as amostras coletadas após o tempo máximo de fertirrigação (T_{max})

contribuíram para os menores valores de r^2 e r , fato também observado para os pontos situados no final das linhas laterais pela ação das amostras coletadas antes da chegada da frente de fertilizante (FF), ou seja, durante o tempo de avanço (T_{av}) para os pontos em questão.

Tabela 9: Coeficientes das equações de regressão polinomial de 2º grau ($y=ax^2+bx+c$) representativas da dinâmica do K na tubulação durante o processo de fertirrigação, para o Sistema de Irrigação II.

Tempo de injeção (min)	Dist. (m)	a	b	c	r^2	r
A	7	-0,62*	35,68*	-209,261	0,52	0,83
A	72	-0,68*	39,99*	-263,090	0,53	0,83
A	141	-0,55 ^{ns}	37,66*	-331,625	0,66	0,81
B	4	1,70*	-71,45*	4.233,242	0,46	0,95
B	66	1,08 ^{ns}	-116,85 ^{ns}	3.110,488	0,77	0,92
B	130	-1,77 ^{ns}	140,88 ^{ns}	-2.324,993	0,35	0,73
C	4	0,80 ^{ns}	-122,16 ^{ns}	4.627,619	0,88	0,96
C	46	0,65 ^{ns}	-105,16 ^{ns}	4.160,696	0,83	0,95
C	90	-1,89*	235,14*	-6.887,403	0,65	0,90

* - significativo a 5% de probabilidade; ** - significativo a 1% de probabilidade; ^{ns} – não significativo.
Sendo y – Conc de K (mg L^{-1}); e x – tempo bruto de fertirrigação (min).

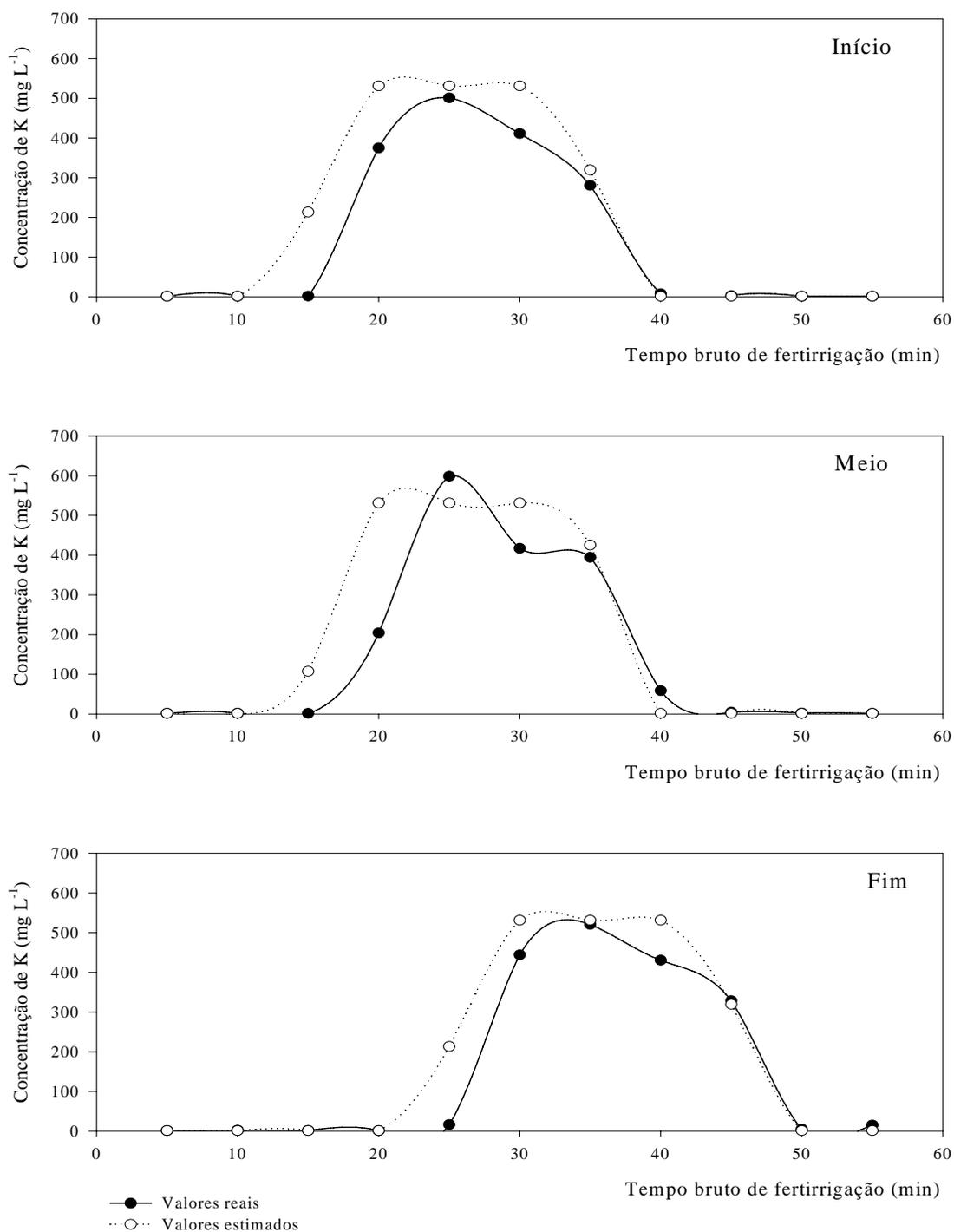


Figura 14: Curvas de distribuição da concentração de K (mg L^{-1}), para o bloco operacional A do Sistema de Irrigação II.

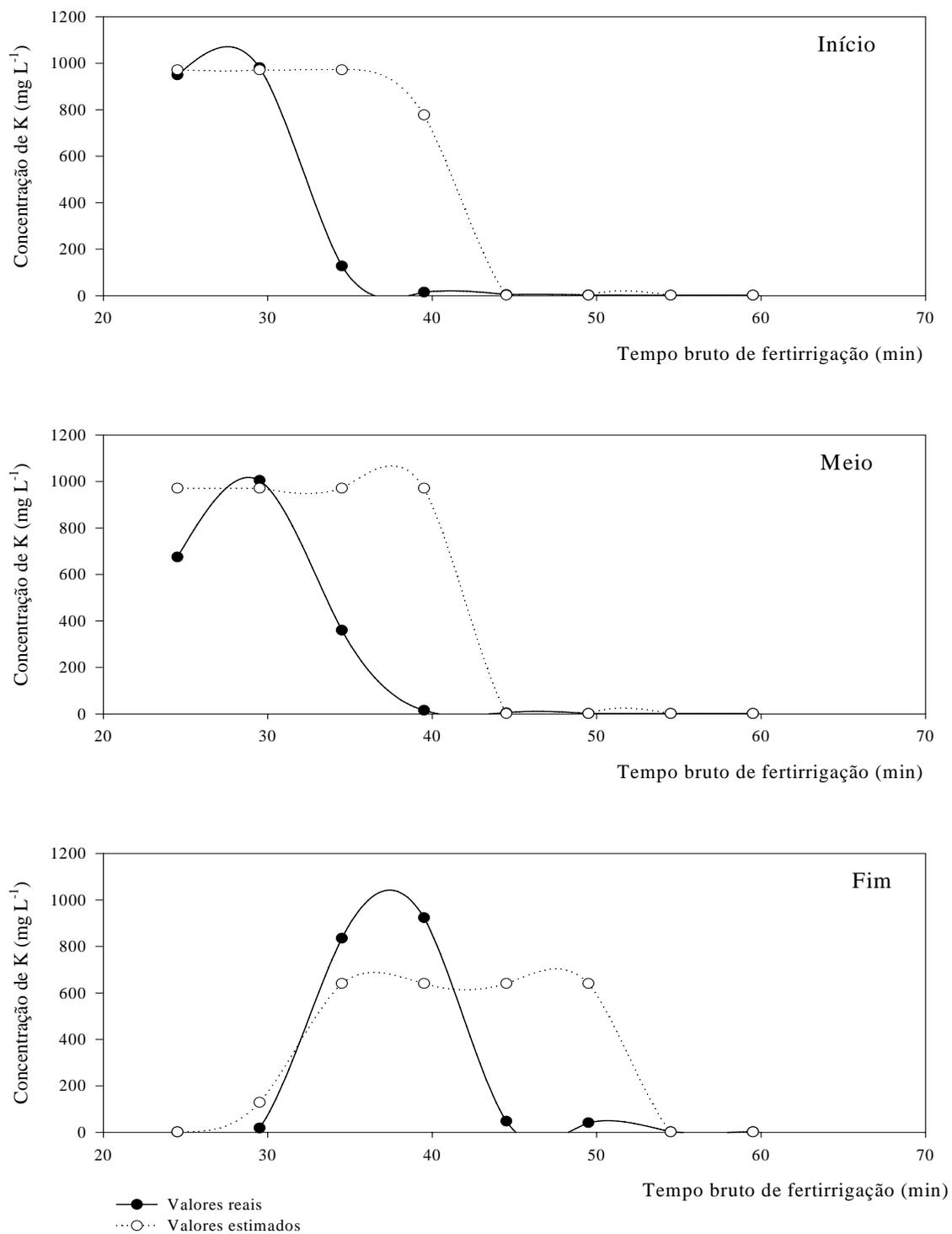


Figura 15: Curvas de distribuição da concentração de K (mg L⁻¹), para o bloco operacional B do Sistema de Irrigação II.

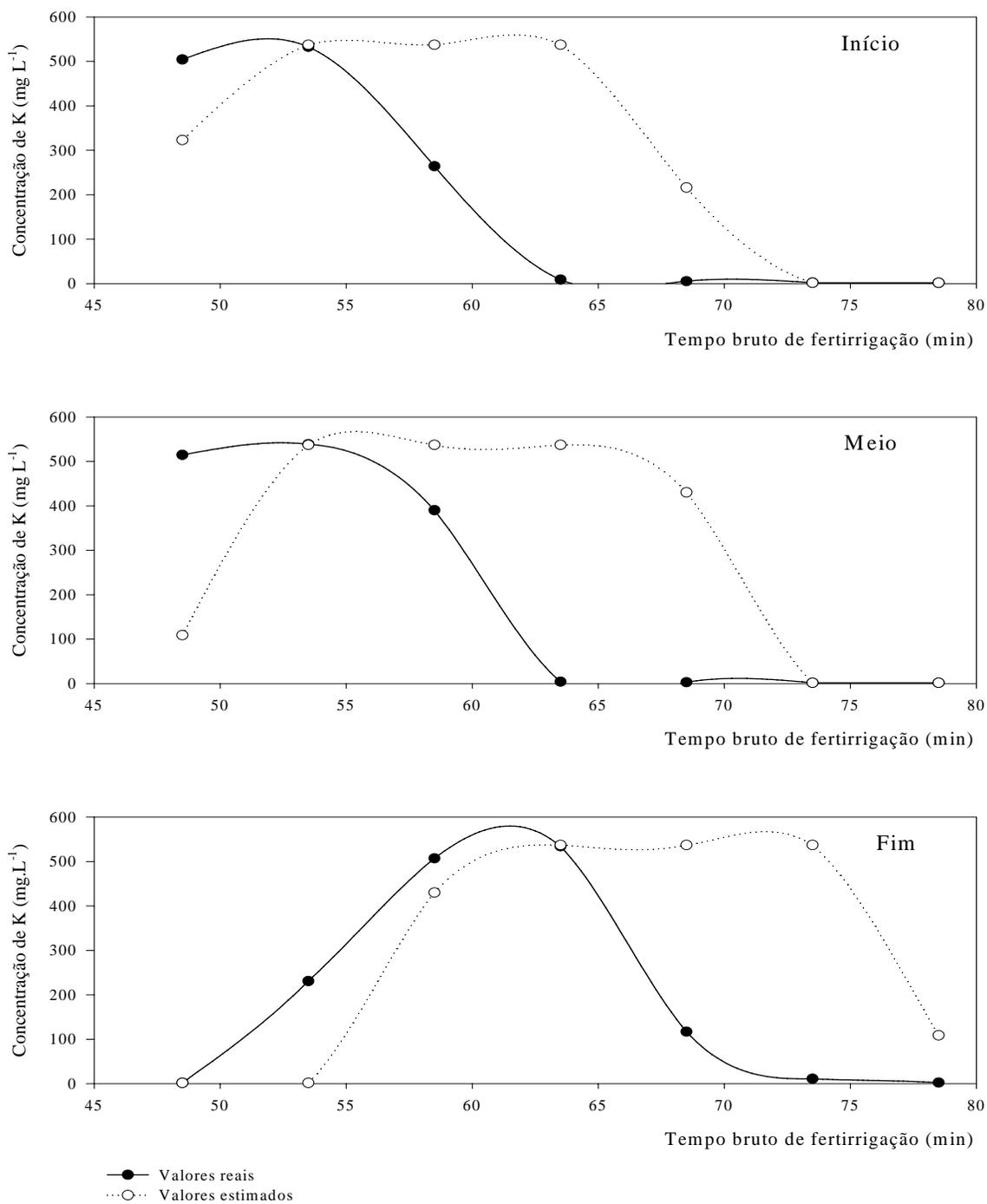


Figura 16: Curvas de distribuição da concentração de K (mg L^{-1}), para o bloco operacional C do Sistema de Irrigação II.

Os parâmetros utilizados para a validação do modelo proposto, realizada principalmente através da correlação entre os valores mensurados em campo e os calculados, são expressos nas Tabelas 10 e 11, que demonstram os coeficientes de determinação (r^2), correlação (r) e os erros quadrados médios (EQM) e absolutos médios (EMA).

Os valores referentes ao bloco A permitiram inferir que há boa correlação entre os valores reais e os estimados pelo modelo, assim como obtido para o Sistema de Irrigação I. Contudo, a análise dos resultados obtidos nos blocos B e C demonstrou que houve uma diferença de aproximadamente 10 minutos entre os valores estimados e os reais para os blocos em questão, o que acarretou em menores coeficientes de determinação (r^2), maiores desvios nos valores do coeficiente de correlação (r), e maiores EQM e EMA.

Tabela 10: Correlação entre os valores de concentração de K (mg L^{-1}) mensurados em campos e gerados pelo modelo proposto para o Sistema de Irrigação II ($y=ax+b$).

Bloco	Distância (m)	a	b	R^2	r
A	7	30,508**	1,134	0,91	0,95
A	72	36,292**	1,030	0,81	0,90
A	141	23,750**	1,060	0,93	0,96
B	4	258,437*	0,783	0,48	0,69
B	66	245,480*	0,934	0,49	0,70
B	130	220,659 ^{ns}	0,497	0,37	0,61
C	4	207,587 ^{ns}	0,531	0,29	0,54
C	46	250,694 ^{ns}	0,274	0,08	0,28
C	90	220,575 ^{ns}	0,434	0,15	0,39

* - significativo a 5% de probabilidade; ** - significativo a 1% de probabilidade; ^{ns} – não significativo.

y – Valores de K (mg L^{-1}) gerados pelo modelo

x – valores de K (mg L^{-1}) mensurados em campo

Tabela 11: Erros obtidos a partir dos valores de concentração de K (mg L^{-1}) estimados e mensurados em campo para o Sistema de Irrigação II.

Bloco	Distância (m)	EQM (mg k.L^{-1})	EMA (mg k.L^{-1})
A	7	88	51
A	72	113	64
A	141	72	39
B	4	402	205
B	66	415	238
B	130	324	223
C	4	248	171
C	46	305	216
C	90	273	195

EQM – erro quadrado médio

EMA – erro médio absoluto.

6.1.2.1 Simulação da operação do sistema de irrigação II com 10 minutos de atraso na frente de fertilizante (FF)

Conforme comentado na descrição do Sistema de Irrigação II, os blocos operacionais A, B e C se localizavam respectivamente na porção inicial, mediana e final do sistema de irrigação. Dessa forma, o deslocamento da água dentro do sistema de irrigação estava sujeito a diferentes oportunidades de diâmetro, e ou comprimento das tubulações para os blocos analisados. De acordo com a planta hidráulica, os blocos A, B e C apresentavam 7, 11 e 23 trechos diferentes de tubulação, respectivamente.

Foi realizada uma simulação da operação do Sistema de Irrigação II, atrasando em 10 minutos o deslocamento da frente de fertilizante (FF), para os blocos B e C (Figuras 17 e 18).

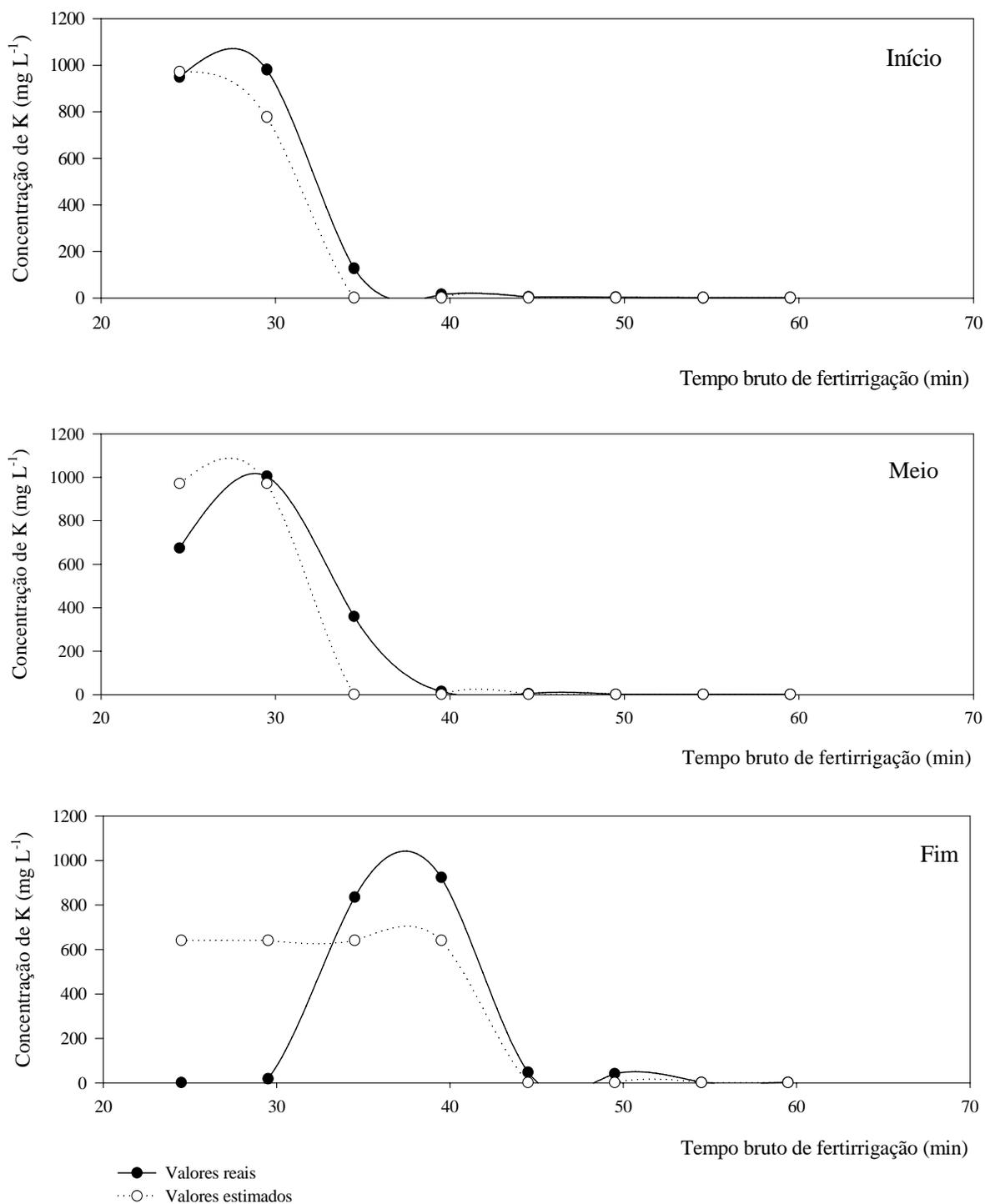


Figura 17: Curvas de distribuição da concentração de K (mg L⁻¹), para o bloco operacional B do Sistema de Irrigação II, com atraso de 10 minutos na Fa estimada.

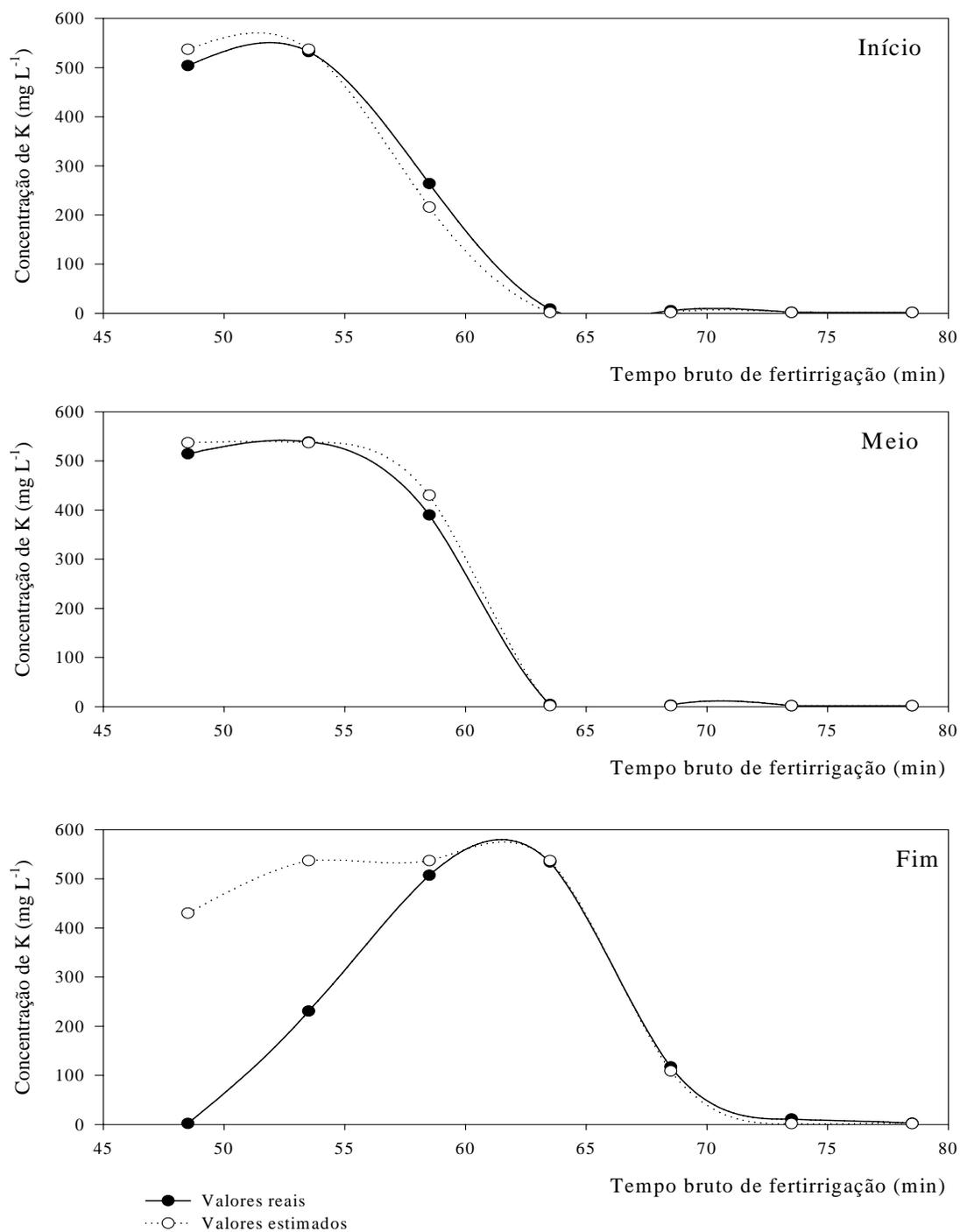


Figura 18: Curvas de distribuição da concentração de K (mg L^{-1}), para o bloco operacional C do Sistema de Irrigação II, com atraso de 10 minutos na Fa estimada.

Esse cenário sugere que o deslocamento da frente de fertilizante real foi mais rápida do que a calculada, ocasionando melhor correlação entre os valores estimados e os reais, o que permitiria melhor gerenciamento do sistema.

A variação entre os valores de concentração mensurados em campo e os calculados pelo modelo proposto para os blocos B e C foram provenientes, de possíveis variações de diâmetro e/ou comprimento das tubulações sugeridas na planta hidráulica do sistema, e as dimensões que realmente foram instaladas em campo. Tal fato possibilita sugerir que além da aferição da distribuição de carga hidráulica em diferentes pontos do sistema, e da vazão dos emissores, a velocidade de caminhamento da água, e conseqüentemente da solução de fertirrigação, seja considerada como parâmetro a ser aferido por ocasião da entrega técnica de sistemas de irrigação. O desvio encontrado no tempo de deslocamento da água não influiria na qualidade da irrigação, uma vez que a vazão dos emissores não apresentaria variação após a estabilização da carga hidráulica; contudo um manejo mais preciso da fertirrigação poderia não ocorrer.

Valores mais elevados dos coeficientes de determinação (r^2) e coeficientes de correlação (r) obtidos a partir do atraso de 10 minutos da frente de fertilizante (FF) para os dados gerados pelo modelo, expressos na Tabela 12, demonstram a melhor correlação entre os valores obtidos em campo e os calculados, quando comparados com os valores apresentado na Tabela 10. Os valores de EQM e EMA também tiveram seus valores corrigidos (Tabela 13), e assim como os valores obtidos para r^2 , demonstraram que os erros gerados na adoção do modelo, não influem na adoção do mesmo como ferramenta de manejo de sistema fertirrigados.

Tabela 12: Correlação entre os valores de concentração de K (mg L^{-1}) mensurados em campos e gerados pelo modelo proposto para o Sistema de Irrigação II, quando a Fa é atrasada em 10 minutos ($y=ax+b$).

Bloco	Distância (m)	a	b	r^2	r
B	4	0,917**	-19,018	0,97	0,98
B	66	1,062**	-30,208	0,88	0,94
B	130	0,482 ^{ns}	208,242	0,66	0,81
C	4	1,028**	-8,437	0,99	0,99
C	46	1,035**	0,734	0,99	0,99
C	90	0,808 ^{ns}	145,535	0,82	0,91

* - significativo a 5% de probabilidade; ** - significativo a 1% de probabilidade; ns – não significativo.

y – Valores de K (mg L^{-1}) gerados pelo modelo

x – valores de K (mg L^{-1}) mensurados em campo

Tabela 13: Erros obtidos a partir dos valores de concentração de K (mg L^{-1}) estimados e mensurados em campo para o Sistema de Irrigação II, quando a Fa é atrasada em 10 minutos ($y=ax+b$).

Bloco	Distância (m)	EQM (mg k.L^{-1})	EMA (mg k.L^{-1})
B	4	85	46
B	66	165	88
B	130	339	228
C	4	22	14
C	46	17	10
C	90	199	112

EQM – erro quadrado médio

EMA – erro médio absoluto.

6.2 GERFERTI – Gerenciamento da fertirrigação

Na Figura 19 exposta a tela de apresentação do aplicativo que possibilita acesso à planilha, bem como para a apresentação e instruções de uso da mesma .



Figura 19: Tela de apresentação do modelo matemático.

A primeira tela apresentada na planilha responsável pelo gerenciamento da fertirrigação é apresentada na Figura 20 na qual são inseridos os dados relativos ao sistema de irrigação. Nessa encontram-se os botões: *Adicionar Dados (LP)*, para entrada de dados relativos à linha principal, *Adicionar Dados (LD)* para entrada dos dados relativos à linha de derivação, e *Adicionar Dados Ferti*, para entrada dos dados relativos à fertirrigação propriamente dita.

- GERFERTI -

Planilha para auxílio da operação de fertirrigação em sistemas de irrigação localizada

Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências Agrômicas
Departamento de Recursos Naturais / Ciência do Solo

Marcus Vinicius AM de Oliveira
Roberto Lyra Villas Bôas

DADOS RELATIVOS AO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

Cultura irrigada	Cítrus	LINHA PRINCIPAL (LP)	Adicionar Dados (LP)
Área irrigada / fertirrigada (ha)	20	LINHA DE DERIVAÇÃO (LD)	Adicionar Dados (LD)
Vazão do sistema de irrigação (L.h ⁻¹)	155.000		

LINHA LATERAL (LL)

Diâmetro das linhas laterais (mm)	20	Dados Fertirrigação	Adicionar Dados Ferti
Espaçamentos entre pontos de emissão (m)	0,34		
Vazão nominal dos emissores (L.H ⁻¹)	2,30		
Número de emissores por ponto de emissão (PE)	1		
Comprimento da linha lateral mais distante (m)	92,00		
Carga hidráulica esperada no início da linha lateral (mca)	25,0		

Trecho da LL	Cota Inico	Cota Fim
25%	419	419
25-50%	419	419
50-75%	419	419
75-100%	419	419

Resultados

Figura 20: Entrada de dados referentes ao sistema de irrigação.

A introdução dos dados relativos às linhas principais e linhas de derivação, apresentados nas Figuras 21 e 22, é realizada a partir da análise da planta do sistema de irrigação estudado.

A primeira coluna dessas planilhas é denominada “Número trecho”. Nessa devem ser numerados todos os trechos das linhas principais e das linhas de derivação que conduzem a água até o ponto estudado. Determinou-se que trechos do sistema são os segmentos de tubulação que apresentaram algum tipo de variação no projeto de irrigação, seja comprimento, diâmetro ou cotas altimétricas.

A coluna denominada “Descrição” tem como objetivo auxiliar o usuário na caracterização do sistema de irrigação, cada usuário pode adotar a nomenclatura que desejar. Exemplificando, na Figura 21, referente à linha principal fez-se uso da seguinte nomenclatura: B1 – ponto de bombeamento, LP – trecho de tubulação da linha principal, Drv

– ponto de derivação, que vai determinar uma redução de vazão, expressa na coluna Vazão Derivada. No preenchimento da coluna referente à “vazão derivada”, devem ser completados somente os dados referentes ao ponto de derivação, ou seja, se não tiver derivação na linha principal, deve-se colocar somente a vazão inicial presente no ponto de bombeamento.

No preenchimento da planilha referente à linha de derivação (Figura 22) é necessário que seja preenchida a coluna denominada “Vazão Derivada”. Os valores obtidos para o preenchimento dessa coluna são obtidos a partir da redução de vazão em cada trecho da linha de derivação, que é resultante das vazões derivadas às linhas laterais presentes nos segmentos em questão.

Arquivo Editar Exibir Inserir Formatar Ferramentas Dados Janela Ajuda Adobe PDF

- GERFERTI -

Planilha para auxílio da operação de fertirrigação em sistemas de irrigação localizada

Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências Agrônomicas
Departamento de Recursos Naturais / Ciência do Solo

Marcus Vinicius AM de Oliveira
Roberto Lyra Villas Bôas

Ok

Detalhamento (trecho a trecho)		LINHA PRINCIPAL - ENTRADA DE DADOS					Vazão Derivada (m ³ .h ⁻¹)
Número Trecho	Descrição	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	COTAS Início	Fim		
	B1				445,2		138,5
1	LP	201	170	445,2	446		
2	LP	299	170	446	448		
	Drv						26,6
3	LP	92	170	448	450		
4	LP	101	170	450	454		
5	LP	97	170	454	454,7		
	Drv						25,1
9	LP	118	125	454,7	452		
10	LP	124	125	452	446		
11	LP	85	125	446	440		
	Drv						41
15	LP	27	125	440	440		
16	LP	90	125	440	440		
17	LP	82	125	438	438		
18	LP	92	125	438	432		
19	LP	92	125	432	428		
20	LP	82	125	428	420		
21	LP	58	125	420	420		
22	LP	85	125	420	424		
23	LP	143	125	424	428		
24	LP	114	125	428	438		
	Drv						21,5
25	LP	141	125	438	440		
26	LP	130	125	440	440		
27	LP	164	125	440	444		
	Drv/B						24,3

Figura 21: Entrada de dados referentes a linha principal do sistema de irrigação.

- GERFERTI -

Planilha para auxílio da operação de fertirrigação em sistemas de irrigação localizada

Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências Agrônomicas
Departamento de Recursos Naturais / Ciência do Solo

Marcus Vinicius AM de Oliveira
Roberto Lyra Villas Bôas

LINHA DE DERIVAÇÃO - ENTRADA DE DADOS

Ok

Detalhamento (trecho a trecho)				COTAS		Vazão Derivada (m ³ .h ⁻¹)	Vazão (m ³ .h ⁻¹)
Número Trecho	Descrição	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)	Início	Fim		
1	LD	149,9081	75	444	430		24,3
2	LD	91,7226	50	430	420	13,7	10,6

Fechar Janela

Figura 22: Entrada de dados referentes a linha de derivação do sistema de irrigação.

Os dados referentes à fertirrigação são inseridos na planilha apresentada na Figura 23. Existe a possibilidade de escolha entre potássio e nitrogênio como indicadores da dinâmica dos fertilizantes no sistema de irrigação. Em seguida dá-se a entrada das quantidades de fertilizantes a serem utilizados. De acordo com as características inseridas nos campos referentes a “volume de solução a ser preparada”, e na coluna referente a “quantidade” de fertilizante utilizada, será gerada uma informação na coluna “solubilidade”, onde aparecerá a mensagem “Ok” se não houver problema de solubilidade do fertilizante em questão e a mensagem “Problema” se a quantidade de fertilizante a ser diluída no tanque estiver acima do limite do produto. Quando houver a mistura de mais de um fertilizante o programa avaliará a solubilidade de cada fertilizante independente. Portanto, misturas de fertilizantes incompatíveis não serão consideradas.

- GERFERTI -

Planilha para auxílio da operação de fertirrigação em sistemas de irrigação localizada

Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências Agrônomicas
Departamento de Recursos Naturais / Ciência do Solo

Marcus Vinicius AM de Oliveira
Roberto Lyra Villas Bôas

Elemento Analisado

Nitrogênio Ok

Potássio

Fertilizante (s) Utilizado (s)	Quantidade (Kg)	Solubilidade
Nitrato de amônio		
Uréia		
Nitrato de cálcio		
Nitrato de Potássio		
Sulfato de amônio		
Cloreto de potássio	234	Ok
Sulfato de potássio		
MAP		

DADOS FERTIRRIGAÇÃO

INJEÇÃO DOS FERTILIZANTES

Taxa de injeção (L.h-1)	6.494
Tempo de injeção (min)	50
Capacidade máxima do tanque de diluição (L)	3.000
Volume de solução a ser preparada (L)	1.800
Concentração de K na água de irrigação (mg.L-1)	1,74
Concentração de N na água de irrigação (mg.L-1)	-

Concentração no tanque de diluição (mg.L-1)	68.900,00
Concentração máxima nos emissores (mg.L-1)	2887
Taxa de diluição	1/24
	4,19%

Figura 23: Entrada de dados referentes à operação de fertirrigação.

A partir do botão “*Resultados*” apresentado na Figura 20, é apresentada a tela com as respostas geradas pelo modelo (Figura 24). No campo “*Tempo de funcionamento do sistema de irrigação (min)*” é apresentada a resposta principal do modelo, que é o tempo mínimo de funcionamento do sistema (Tms). Como forma de melhor observar os resultados obtidos, podem ser gerados gráficos referentes aos diferentes pontos de emissão da linha lateral estudada, selecionando o ponto de emissão desejado na barra de rolagem apresentada na Figura 24. O gráfico referente ao ponto de emissão mais extremo (Figura 25), ponto de maior interesse, é obtido ao se pressionar o botão “*Curva PE mais extremo*”. Essas informações darão subsídio ao técnico gerenciador do sistema de irrigação decidir o tempo de funcionamento mais adequado.

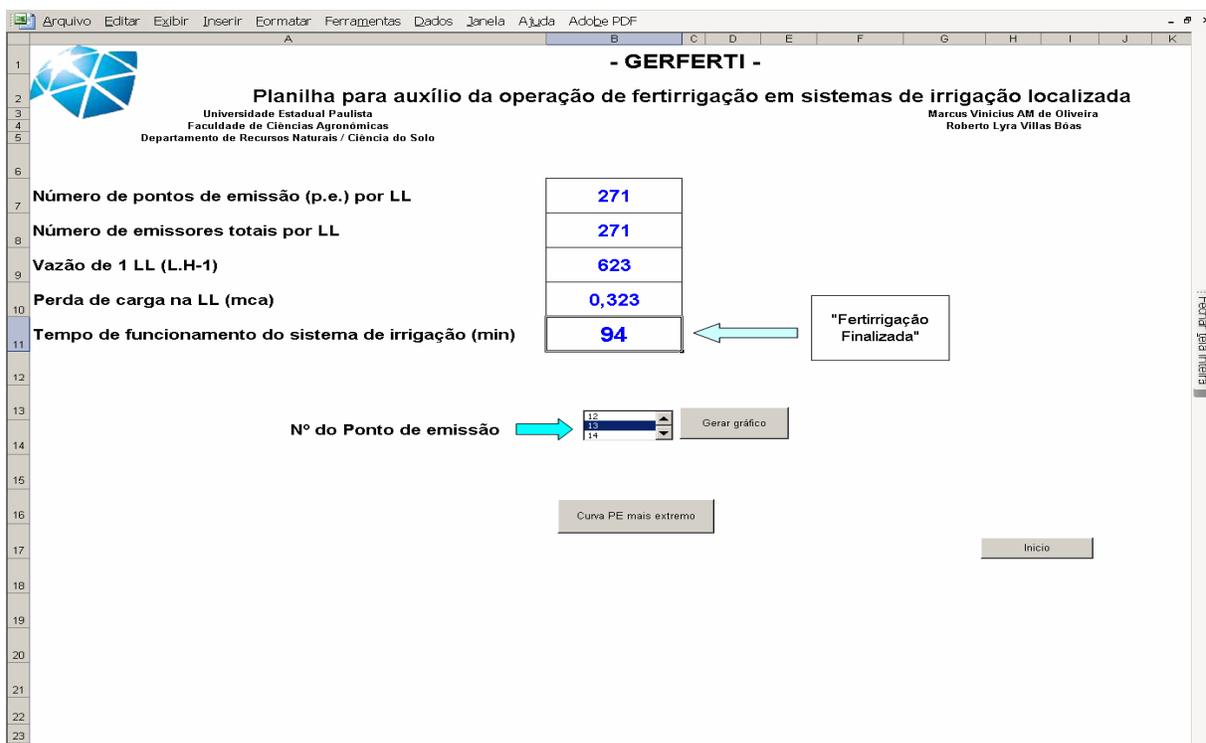


Figura 24: Tela de apresentação das respostas geradas pelo modelo.

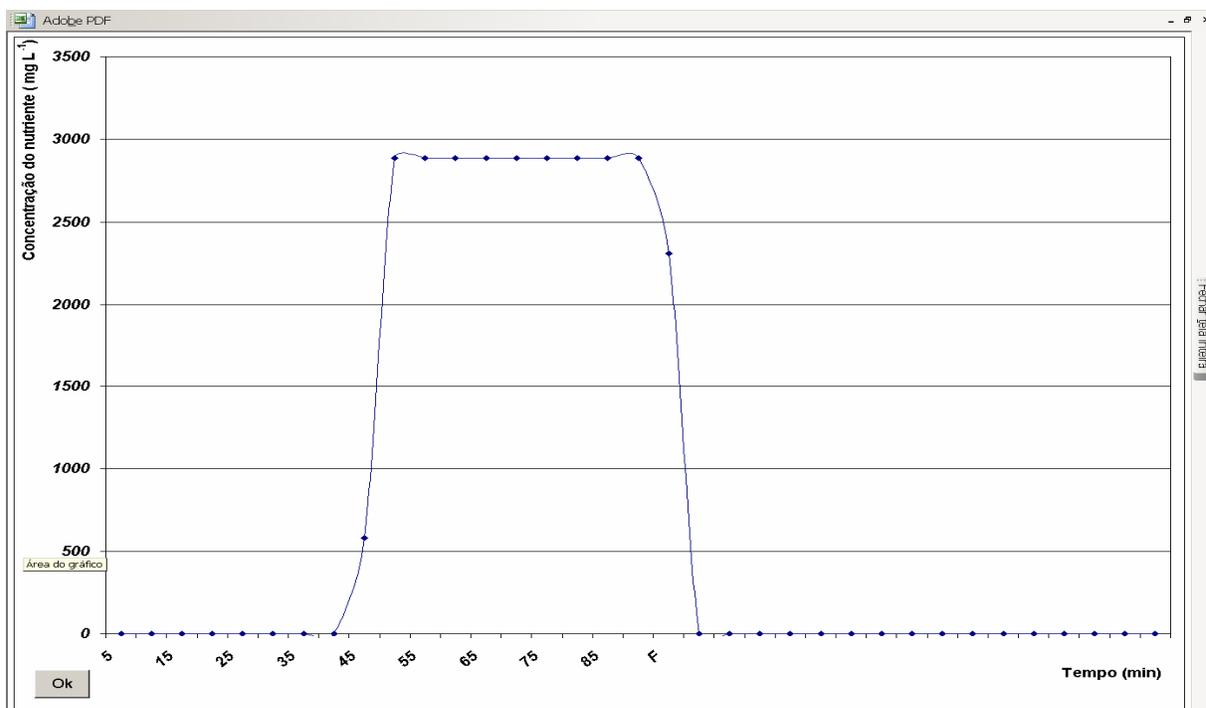


Figura 25: Gráfico referente ao PE mais extremo.

6.3 Distribuição de $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ e K^+ no perfil do solo

O conhecimento sobre as curvas de distribuição da solução de fertilizantes pode favorecer melhor aproveitamento dos nutrientes pelas plantas, uma vez que a localização da frente de fertilizante (FF) na programação de funcionamento do sistema de irrigação pode influir na localização dos nutrientes dentro do bulbo úmido.

O estudo da dinâmica da solução de fertirrigação no Sistema de Irrigação II indicou que o tempo de avanço (T_{av}), definido como o tempo necessário para a solução de fertilizantes a partir do cabeçal de controle alcançar determinado trecho do sistema de irrigação, para os blocos A, B e C do Sistema de Irrigação II foi de 12, 18 e 47 minutos, respectivamente. Nos pontos extremos desses mesmos blocos os T_{max} seriam 46, 53 e 80 minutos, respectivamente, para a situação amostrada.

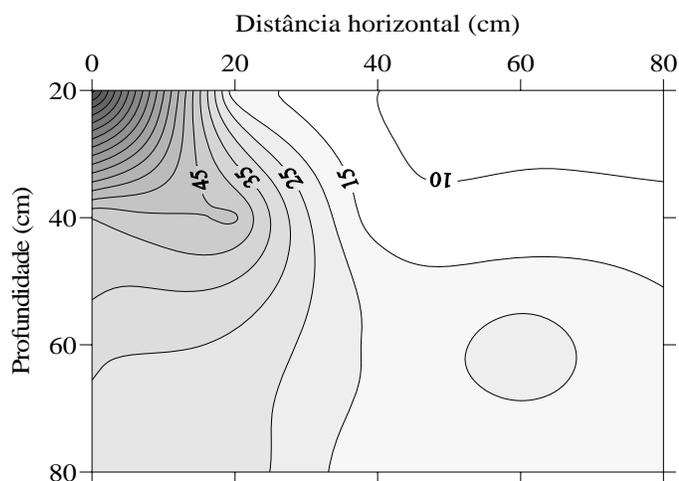
Situações em que a demanda hídrica da cultura indica que deva ser aplicada uma lâmina de irrigação mínima visando somente a fertirrigação, como ocorre no verão para a região de Botucatu, com um tempo de injeção igual a 20 minutos, o ponto mais próximo ao cabeçal de controle receberia aproximadamente 48 minutos de lâmina livre de fertilizantes, após passagem da frente de fertilizante (FF), levando em consideração que o sistema deveria ser desligado, somente após passado o tempo máximo de fertirrigação (T_{max}) do ponto mais extremo do sistema, que determina o tempo mínimo de funcionamento do sistema (T_{ms}). Todavia, ocasiões em que a demanda hídrica da cultura indica a necessidade de aplicação de lâminas maiores, conseqüentemente repostas durante períodos mais longos, a lâmina aplicada após a passagem da frente fertilizante (FF) seria maior, o que determinaria que os bulbos localizados em pontos mais próximos do ponto de injeção, recebam maior lâmina de água após a aplicação dos fertilizantes, ou mesmo que os pontos mais extremos tenham os nutrientes localizados mais superficialmente .

As Figuras 26 e 27 demonstram a diferença de concentração de $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ e K^+ em bulbos localizados nos blocos A, B e C, situados respectivamente na porção inicial, mediana e final do Sistema de Irrigação II. Observou-se que houve um gradiente de distribuição tanto da concentração de $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ como na concentração K^+ no perfil do solo. O bloco C apresentou maior concentração dos nutrientes perto do gotejador, uma vez

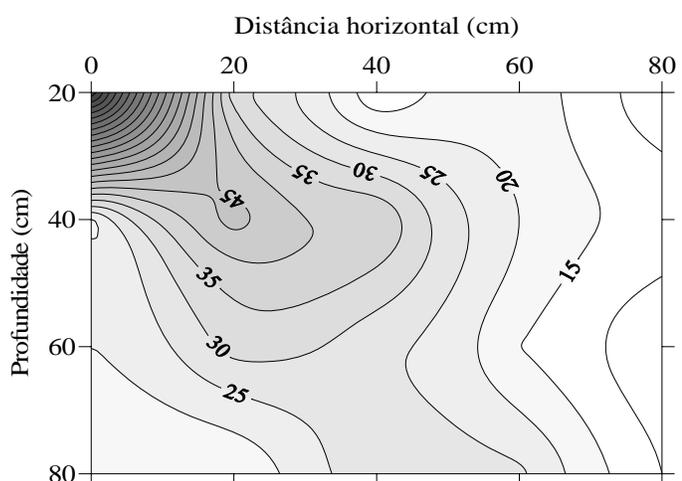
que, via de regra, a oportunidade de deslocamento dos fertilizantes para esse bloco é menor do que a possibilitada aos blocos A e B. As figuras referentes ao bloco A apresentam menor gradação de cor, visto que esse ponto, possivelmente tem a quantidade total de fertilizante aplicado diluído e deslocado pela lâmina de irrigação aplicada após a passagem da frente de fertilizante (FF).

Tal fato corrobora com a hipótese levantada, quanto a localização da frente de fertilizante (FF) no tempo total de funcionamento do sistema de irrigação. Pode-se indicar que em grandes áreas fertirrigadas, mesmo sendo observado o tempo mínimo de funcionamento do sistema, poderá haver diferentes deslocamento dos nutrientes no perfil do solo, determinando menor aproveitamento pelas plantas. Existe também a possibilidade de ocorrência de crescimento radicular diferenciado das plantas presentes nos diferentes pontos do sistema.

Bloco A



Bloco B



Bloco C

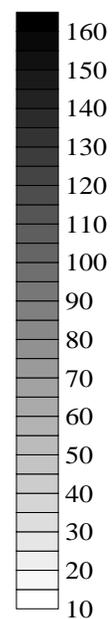
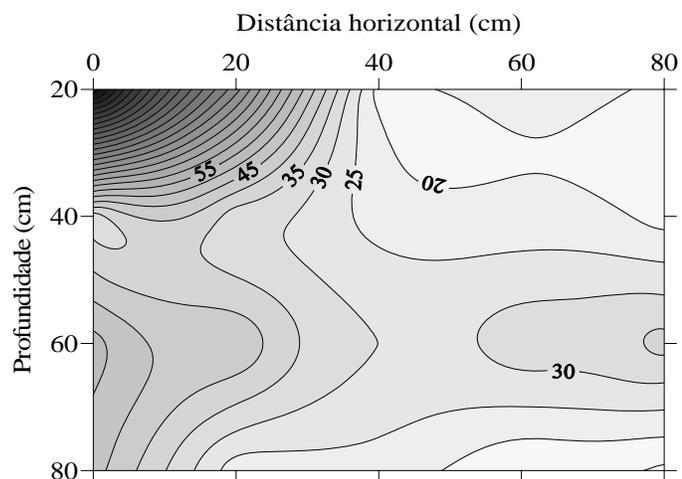
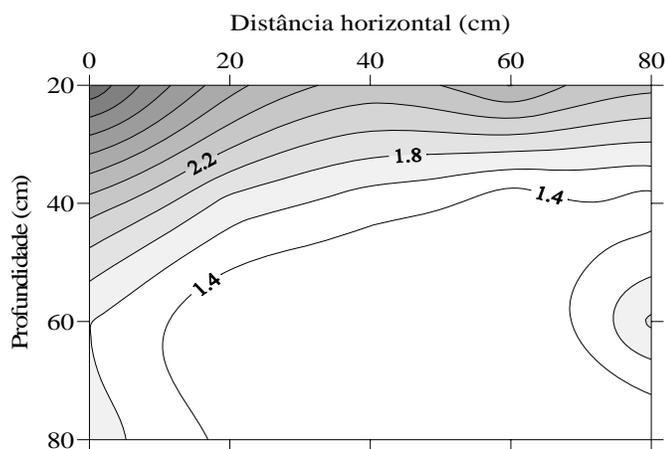
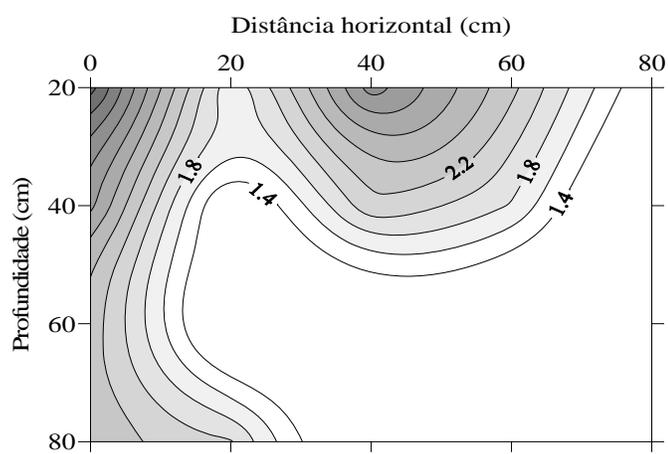


Figura 26: Isolinhas de distribuição da concentração de $\text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$ (mg L^{-1}) abaixo de emissores localizados nos blocos A, B e C amostrados no Sistema de Irrigação II.

Bloco A



Bloco B



Bloco C

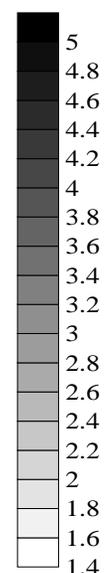
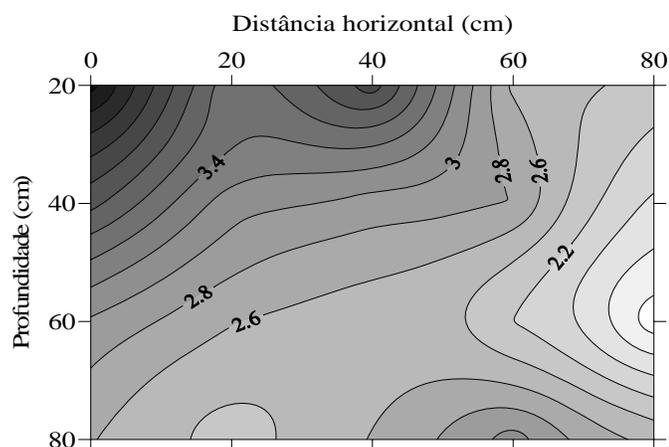


Figura 27: Isolinhas de distribuição da concentração de K^+ (mg L⁻¹) abaixo de emissores localizados nos blocos A, B e C amostrados no Sistema de Irrigação II.

6.4 Comparação entre os valores de condutividade elétrica (EC) e concentração de K (mg L⁻¹)

Para as amostras coletadas no Sistema de Irrigação II determinou-se além da concentração de K, a condutividade elétrica (EC) da solução de fertilizantes. A medida da condutividade elétrica foi realizada com o objetivo de aferir uma forma mais prática de monitoramento do sistema de fertirrigação.

Os valores obtidos de concentração de K (mg L⁻¹) e condutividade elétrica (mS cm⁻¹) nas amostras dos blocos A, B e C são apresentados nas Figuras 28, 29 e 30, respectivamente. Os coeficientes de determinação (r^2) e correlação (r) entre as duas formas de monitoramento são apresentados na Tabela 14. Pode-se inferir que o monitoramento da solução de fertirrigação pode ser realizado de forma prática, com o uso de condutivímetros; como também relatado por Magalhães et al. (1996) quando compararam as medidas de K e P nas amostras obtidas em um sistema de irrigação por gotejamento.

Os resultados obtidos eram esperados, uma vez que a condutividade elétrica expressa de forma indireta a quantidade de sais dissolvidos na solução, entre eles o K. No entanto, o objetivo era comprovar se a medida de condutividade elétrica apresentava sensibilidade, discriminando a variação de sais ao longo do tempo. Deve-se esclarecer que a solução aplicada é realizada em rotina na empresa, até duas vezes por semana.

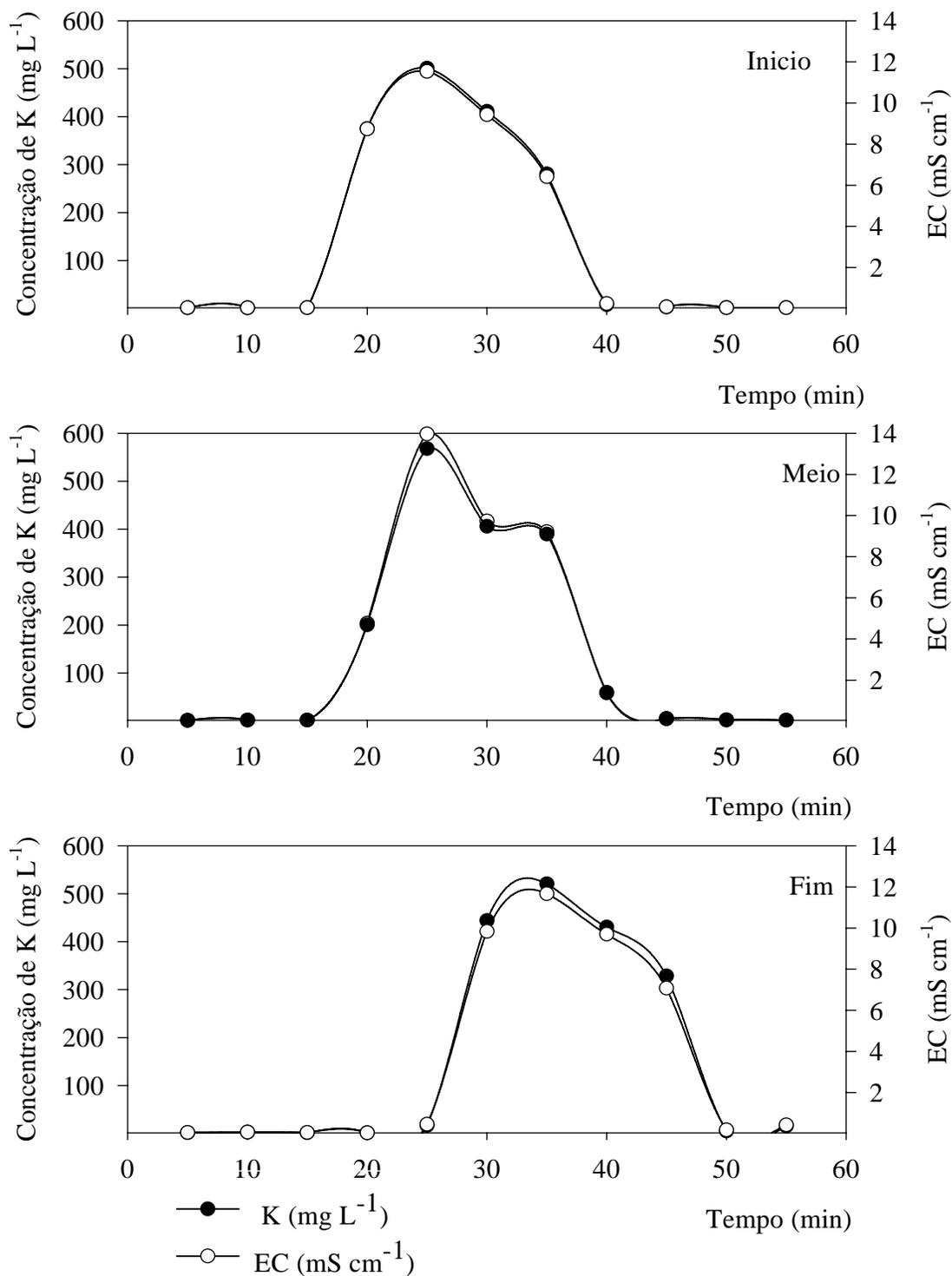


Figura 28: Concentração de K (mg L^{-1}) e EC (mS cm^{-1}), na solução de fertilizantes, para o bloco A do Sistema de Irrigação II.

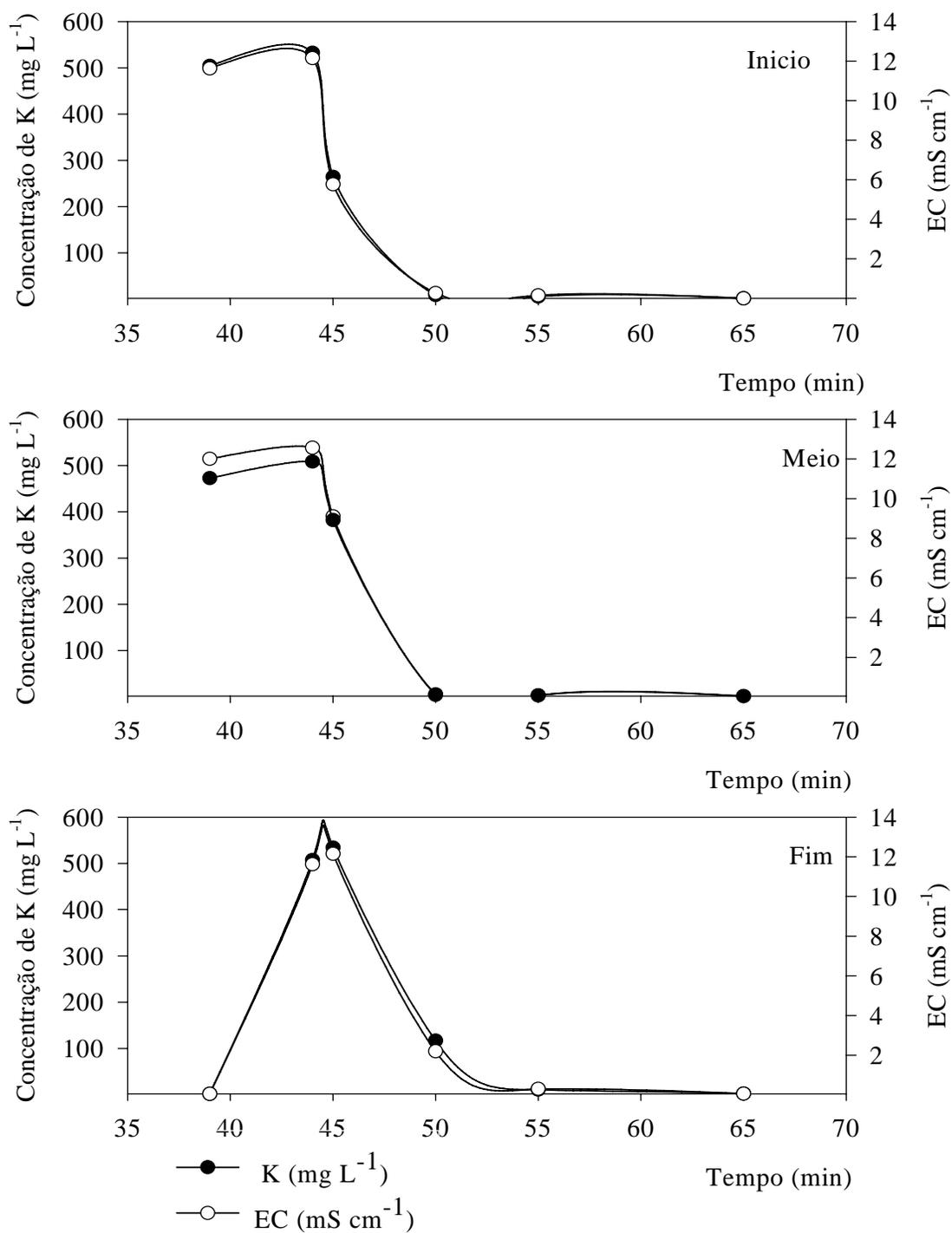


Figura 29: Concentração de K (mg L^{-1}) e EC (mS cm^{-1}), na solução de fertilizantes, para o bloco B do Sistema de Irrigação II.

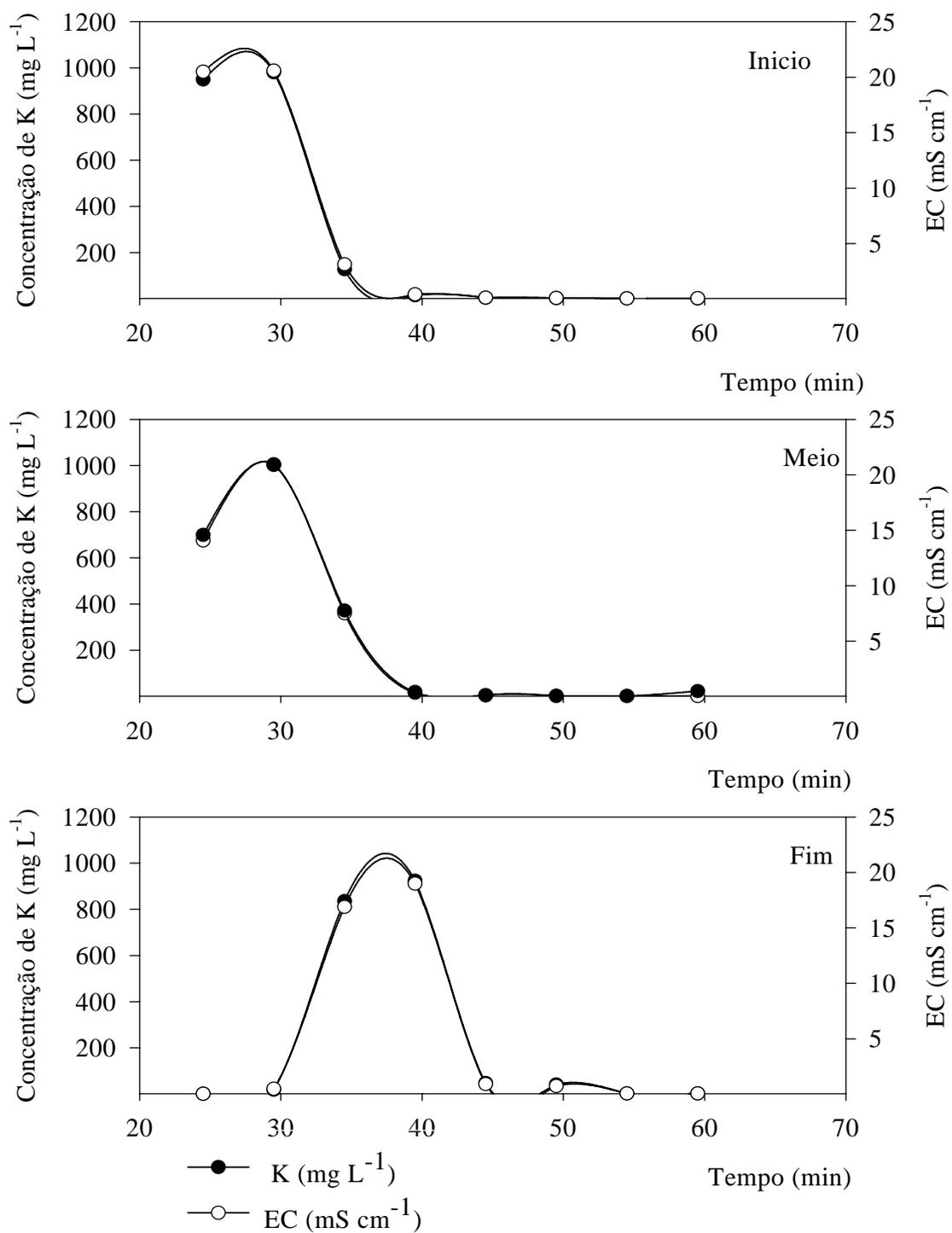


Figura 30: Concentração de K (mg L^{-1}) e EC (mS cm^{-1}), na solução de fertilizantes, para o bloco C do Sistema de Irrigação II.

Tabela 14: Correlação ($y=ax+b$) entre os valores de K (mg L^{-1}) obtidos via fotometria de chama, e os valores de condutividade elétrica das amostras coletadas no Sistema de Irrigação II.

Bloco	Distância (m)	a	b	r^2	r
A	7	0,0230**	0,0190	0,99	0,99
A	72	0,0224**	0,0478	0,99	0,99
A	141	0,0222**	0,03818	0,99	0,99
B	4	0,0228**	-0,0082	0,99	0,99
B	66	0,0229**	-0,0781	0,99	0,99
B	130	0,0219**	0,0385	0,99	0,99
C	4	0,0212**	0,0954	0,99	0,99
C	46	0,0209**	0,1577	0,99	0,99
C	90	0,0204**	-0,0068	0,99	0,99

* - significativo a 5% de probabilidade; ** - significativo a 1% de probabilidade; ns – não significativo.

y – valores de K (mg L^{-1})

x – valores de EC (mS cm^{-1})

6.5 Considerações finais

Apesar do crescente uso da fertirrigação, o dimensionamento dos sistemas de irrigação não tem levado em consideração alguns fatores relativos ao emprego da técnica, como o tempo de avanço da solução de fertilizantes. Existe a necessidade de considerar qual a variação admissível entre o tempo de avanço para os pontos extremos do sistema, o que possibilitaria a localização dos pontos de injeção da solução de fertilizante de acordo com um critério técnico. A variação admissível do tempo de avanço deve ser estudada observando os reflexos da variação de concentração de sais no bulbo úmido, na produção da cultura em questão. O modelo matemático gerado no presente trabalho, possibilita o estudo do tempo de avanço da solução de fertilizantes nas tubulações do sistema de irrigação, podendo inclusive servir de subsídio para locação dos pontos de injeção, contudo há necessidade de pesquisas que respondam sobre possíveis variações de produtividade.

Duas situações de manejo do sistema podem fazer uso do modelo matemático gerado. Quando houver a necessidade do sistema ser acionado somente com o objetivo de fertirrigar, a resposta gerada pelo modelo serve como parâmetro para tomada de decisão do tempo de funcionamento do sistema; enquanto, quando o sistema é acionado para suprir a demanda hídrica da cultura, a resposta gerada auxilia na determinação do instante mais apropriado para início da injeção da solução de fertilizantes. Pode-se inferir que sendo o objetivo manter uma maior concentração na solução de sais no bulbo úmido, a operação de injeção deve ser procedida no intervalo final da operação do sistema de irrigação.

Autores como Zanini (1987) e Hanson (1996) indicam que o manejo da fertirrigação pode ser baseada na proporção 1:2:1, no qual é reservado 50% do tempo de operação do sistema de irrigação para injeção da solução de fertilizantes. O uso do modelo pode determinar um manejo mais minucioso da fertirrigação, uma vez que nem sempre a relação entre as partes formadoras do tempo de operação do sistema seguem essa proporção.

7. CONCLUSÕES

- O modelo desenvolvido permite indicar de forma adequada o tempo de funcionamento do sistema de irrigação, quando em operação de fertirrigação;
- Para o Sistema de Irrigação I o tempo mínimo de funcionamento, quando em fertirrigação, foi 45, 40, 30 e 25 minutos, para os tempos de injeção 25, 20, 15 e 10 minutos, respectivamente;
- Para o Sistema de Irrigação II o tempo mínimo de funcionamento do sistema de irrigação, quando em fertirrigação foi 50, 55 e 75 minutos, para os blocos operacionais A, B e C, respectivamente;
- No Sistema de Irrigação II a diferença entre as frentes de fertilizante, nos pontos extremos, foi de aproximadamente 25 minutos, o que representa uma lâmina de 0,22 mm h⁻¹, aplicada após finalizada a fertirrigação no bloco operacional B;
- Pode ocorrer o deslocamento diferenciado dos fertilizantes nos bulbos úmidos em diferentes pontos do sistema de irrigação, devido a lâmina de água aplicada após finalizada a passagem da frente de fertilizante.

- Para monitoramento da dinâmica dos fertilizantes na solução de fertirrigação, no sistema de irrigação, a condutividade elétrica apresentou correlação significativa com os valores de concentração de potássio.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISCOTT, T. M. Simulation Modelling and Soil Behaviour. **Geoderma**, Amsterdam, v. 69, p. 15-40, 1993.

ALVES, D. N. B. **Desempenho da bomba injetora e do tanque de derivação de fluxo na aplicação de cloreto de potássio em microaspersão**. 1992. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola / Irrigação e Drenagem). Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1992.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNANDEZ Y FERNANDEZ, M.; ARAÚJO, R.; EIJI ITO, A. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 1998. 669p.

BALTRA, A. O. C. Utilização da Informática na irrigação. **ITEM Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, n.28, p. 13-15, 1987.

BARROS, A. H. C. **Análise de crescimento, do desenvolvimento e da produtividade da cultura do milho (Zea mays L.): Experimentos e modelos**. 1998. 85f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.

BERNARDO, S. **Manual de Irrigação**. 6. ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 1995. 657p.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 2005. 611p.

BURT, C.; O'CONNOR, K.; RUEHR, T. **Fertigation**. California, San Luis Obispo: The irrigation training research center. Polytechnic State University. 1995. 320p.

COELHO, R. D. **Regulagens de aspersores e seus efeitos sobre a uniformidade de aplicação de água e produtividade das culturas**. 1990. 141 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Irrigação e Drenagem). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

CRANCK, J. **The mathematics of diffusion**. New York: Oxford University Press. 1975. 415p.

CUENCA, R. H. **Irrigation System Design: An Engineering Approach**. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs. 1989. 551p.

DETOMINI, E. R. **Modelagem da produtividade potencial de *Brachiaria brizantha* (Variedade cultivadas Marandu e Xaraês)**. 2004. 112 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Fitotecnia). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

DOURADO NETO, D.; TERUEL, D. A.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D. R.; FRIZZONE, J. A.; BACCHI, O. O. S. Principles of crop modeling and simulation: uses of mathematical model in agriculture science. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.55, n. especial, p. 46-50, 1998.

ELIAS, E. A. **Modelagem analítica do perfil de temperatura no solo**. 2004. 67 f. Tese (Doutorado em Agronomia / Física do Ambiente Agrícola). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

FIGUEREDO JÚNIOR, L. G. M. **Modelo para estimação da produtividade de grãos de milho no estado de São Paulo**. 2004. 67 f. Tese (Doutorado em Agronomia / Irrigação e Drenagem). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

HANSON, B. Fertigation. In: Hanson, B.; SCHANKL, L.; GRATTAM, S.; PICHARD, T. **Drip Irrigation for Row Crops**. California, Davis: Department of Land, Air and Water Resources, University of California. 1996. 234p.

HERNANDEZ, F. B. T. Potencialidades da fertirrigação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE FERTILIZANTES FLUIDOS, 1993, Piracicaba. **Fertilizantes Fluidos**, Piracicaba: POTAFOS, 1994. p. 215-225.

HOLMAN, H. Fertilizer and chemical injection for irrigation systems. **Citrus & Vegetable Magazine**, Tampa, v. 41 (7), n. 26-28, p. 46-48, 1978.

KELLER, J.; BLIESNER, R., D. **Sprinkle and trickle irrigation**. Caldwell, Blackburn Press, 2000. 652 p.

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

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **ASAE Transactions**, Missouri, v.17, n.4, p. 678 – 684, 1974.

LEAL, M.A.A.; DE-POLLI, H. Aplicações de modelos ao estudo da matéria orgânica do solo. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamento da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 245-264.

LOPEZ CADAHIA, C. Cálculo e preparo de soluções fertilizantes In: FOLEGATTI, M. V.; CASARINI, E.; BLANCO, F., F.; BRASIL, R., C., do; SOUZA, R., S coord. **Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças**, v.2, Piracicaba: ESALQ / USP, ed. Guaíba: Agropecuária, 2001. p. 145-162.

LOPEZ CADAHIA, C. **Fertigation cultivos hortícolas y ornamentales**. Madrid, Espanha: Mundi-Prensa, 1998. 513p.

MAGALHÃES, M. I.; TEXEIRA A. S.; FERREYRA, F. F. Uniformidade de distribuição do fertilizante, via fertirrigação, em um sistema de irrigação por gotejamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1996. **Anais...**Bauru: Unesp / Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1996.

MELO SOUZA, R. O. R de. **Modelagem, desenvolvimento de software para dimensionamento, e avaliação de sistemas de irrigação por gotejamento com microtubos**. 2005. 100 f. Tese (Doutorado em Agronomia / Irrigação e Drenagem). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

OLIVEIRA, M. V. A. M. de Uniformidade de distribuição de potássio num sistema de irrigação por gotejamento quando aplicado por diferentes injetores. **Irriga**, Botucatu, v.8, n.3, p. 234-241, 2003.

OLIVEIRA, M. V. A. M. de. **Uniformidade de distribuição temporal e espacial do KCL na fertirrigação, em um sistema de irrigação por gotejamento**. 2002. 75 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia / Irrigação e Drenagem). Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

PAPADOPOULOS, I. Fertilizantes em fertirrigação. In: FOLEGATTI, M. V coord. **Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças**. v.1. Piracicaba: ESALQ / USP, ed. Guaíba: Agropecuária, 1999. p. 11-140.

PAUTIAN, K.; PARTON, W. J.; PERSSON, J. Modeling soil organic matter in organic-amended and nitrogen fertilized long-term plots. **Soil Science Society of America Journal**, Stanford, v.56, p. 476-488, 1992.

PERIN FILHO, C. **Introdução à simulação de sistemas**. Campinas: Editora da Unicamp. 1995. 163p.

PINTO, J. M.; SOARES, J. M.; NASCIMENTO, T. Análise de coeficiente de uniformidade de distribuição de água em sistemas de irrigação localizada. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 8. Florianópolis, 1988. **Anais...** Florianópolis: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1988. v.1, p.309-26.

PIZARRO, C. F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación**. 3. ed. Madrid, Espanha: Mundi-Prensa, 1996. 513p.

RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo**. 2 ed. Campinas, Instituto Agrônomo: Fundação IAC, 1997. 285 p.

REYNOLDS, J.F. Some misconceptions of mathematical modeling. **What's New Plant Physiology**, v.10, n.11, p. 41-44, 1979.

ROLSTON, D. E.; MILLER, R. J.; SCHULBACH, H. Management Principales-Fertilizacion. In: NAKAYAMA, F. S; BUCKS, D.A., **Trickle irrigation for Crops Production, developments in agricultural engineering**. Amsterdam: Elsevier, 1986. 383p.

SAMPAIO, S. C.; FARIA, M. A. de; LIMA, L. A.; OLIVEIRA, M. S. de; SILVA, A. M. Fertirrigação simulada em linhas de gotejadores. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.7, número único, p. 50-61, 1996.

SAMPAIO, S. C.; FARIA, M. A. de; LIMA, L. A.; OLIVEIRA, M. S. de; SILVA, A. M. Da. Distribuição espacial e temporal do cloreto de potássio aplicado em um linha de gotejadores por bomba injetora e tanque de derivação de fluxo. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v.8, n.1, p. 31-41, 1997.

SCHWANKL, L. Fertigation. In: Hanson, B.; SCHWANKL, L.; GRATTAM, S.; PICHARD, T. **Drip irrigation for row crops**. California, Davis: Cooperative Extension, Department of Land, Air, and Water Resources, University of California, Davis. 1996. 234p.

SHANI, M. **La fertilizacion 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.

SOUSA, A. P.; SOUSA, V. F. de. Fertirrigação: tipos e seleção de produtos, aplicação e manejo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA. Ilhéus, 1993. *Anais...* Ilhéus: Fundação Banco do Brasil, 1993. v.4, p.2529-2539.

SOUSA, V. F. de.; FOLEGATTI, M. V.; FRIZZONE, J. A.; CORRÊA, R. A de L.; ALENCAR, C. M. Distribuição de fertilizantes em um sistema de fertirrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.7, n.1, p. 186-189, 2003.

SOUSA, V. F. de; CONCEIÇÃO M. A. F.; FOLEGATTI, M. V.; ALENCAR, C. M.; FRIZZONE, J. A.; CORRÊA, R. A. Distribuição espacial e temporal de fertilizantes sob diferentes concentrações da solução inicial aplicada via água de irrigação por gotejamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 29, Fortaleza, 2000. **Anais...** Fortaleza: UFCE / Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2000. 1 CD-ROM.

SOUZA, G. H. F.; NOGUEIRA, F. C.; MEDEIROS, J. F.; NETO, J. M. Efeitos da variação da vazão do injetor de fertilizantes em diferentes tempos de aplicação na uniformidade de distribuição do adubo em irrigação por gotejamento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 26, Campina Grande, 1997. **Anais...** Campina Grande: UFPb / Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1997.

TURCO, J. E. P.; FERNANDES, E. J. Construção e avaliação de um psicrômetro de termopares. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.3, p. 468-476, 2003.

VILLAS BÔAS, R. L.; ANTUNES, C. L.; BOARETTO, A. E.; SOUSA V. F.; DUENHAS, L., H. Perfil da Pesquisa e emprego da fertirrigação no Brasil, 2001. In: FOLEGATTI, M. V.; CASARINI, E.; BLANCO, F., F.; BRASIL, R., C., do; SOUZA, R., S (coord). **Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças**, v.2, Piracicaba: ESALQ / USP, ed. Guaíba: Agropecuária, 2001. p. 71-104.

VILLAS BÔAS, R. L.; OLIVEIRA, M. V. M. de; MOTA, P. R. A; BETTINI, M. O Fertirrigação no Brasil, técnica inovadora nos cultivos irrigados. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE FERTIRRIGAÇÃO, 1., João Pessoa, 2003. **Anais...** João Pessoa. UFPB / CCA, 2003. 1 CD-ROM.

VILLAS BÔAS, R. L.; BULL, L. T.; FERNÁNDES, D. M. Fertilizantes em fertirrigação. In: FOLEGATTI, M. V (coord). **Fertirrigação: citrus, flores, hortaliças**. v.1. Piracicaba: ESALQ / USP, ed. Guaíba: Agropecuária, 1999. p. 293-319.

ZANINI, J. R. **Hidráulica da fertirrigação por gotejamento utilizando o tanque de derivação de fluxo e bomba injetora**. 1987. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia / Solos e Nutrição de Plantas). Escola Superior de Agricultura “Luís de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1987.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)