

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**ESTUDO COMPARATIVO DA INFILTRAÇÃO ATRAVÉS**  
**DA APLICAÇÃO DE MODELO CHUVA-DEFLÚVIO**  
**A BACIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO**

**Roni Cleber Boni**

**Orientador: Prof. Dr. Valter Hernandez**

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos.

2596156

Campinas, SP  
1999

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação.

Prof. Dr. Valter Hernandez *Val*  
Matrícula: 23794-9

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	
V.	EX
TOMBO	BC/39399
PREÇO	229,99
C	<input type="checkbox"/>
O	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	09/11/99
N.º CPD	

CM-00136646-5

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

B641e Boni, Roni Cleber  
Estudo comparativo da infiltração através da aplicação de modelo chuva-deflúvio a bacias do estado de São Paulo. / Roni Cleber Boni.--Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Valter Hernandez.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Infiltração. 2. Hidrologia – Modelos. 3. Métodos de simulação. 4. Solos – Percolação. I. Hernandez, Valter. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

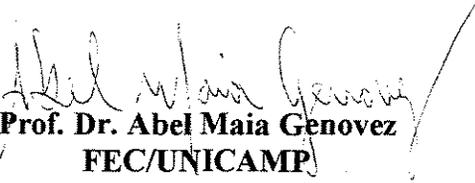
**ESTUDO COMPARATIVO DA INFILTRAÇÃO ATRAVÉS  
DA APLICAÇÃO DE MODELO CHUVA-DEFLÚVIO  
A BACIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO**

**Roni Cleber Boni**

**Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:**

  
**Prof. Dr. Valter Hernandez**  
**Presidente e orientador/ UNICAMP**

  
**Prof. Dr. Kokei Uehara**  
**PHD/EPUSP**

  
**Prof. Dr. Abel Maia Genovez**  
**FEC/UNICAMP**

**Campinas, 23 de Julho de 1999.**

## Dedicatória

---

A meus pais, João e Antonia,  
irmãos, Reginaldo e Rita, dedico.

À Solange Nunes,  
pelo carinho e incentivo constante,  
ofereço.

## **Agradecimentos**

---

A Deus, que me iluminou em todos os momentos e tornou possível a obtenção deste título, que representa mais uma etapa muito importante em minha vida.

Ao prof. Dr. Valter Hernandez, pela brilhante orientação, sugestões, dedicação, paciência e muito empenho demonstrados durante a elaboração deste trabalho.

A Solange Nunes, pela agradável convivência, pelo carinho, companheirismo e apoio constante em todos os momentos.

Ao engenheiro Nelson Goi Magni pela aquisição de dados pluviométricos e pluviográficos junto ao DAEE-CTH de São Paulo.

A todos amigos da Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, pelo agradável convívio.

A Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa de estudo concedida no primeiro ano.

A Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pela bolsa de estudo concedida no segundo ano.

*“ Para achar água é preciso descer terra adentro,  
encharcar-se no lodo.  
Mas há os que preferem olhar os céus,  
esperar pelas chuvas.”*

***Oduvaldo Vianna Filho***

## Sumário

---

LISTA DE TABELAS .....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	xiv
RESUMO .....	xix
1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Histórico .....	1
1.2 Organização do Trabalho .....	4
2 OBJETIVO .....	7
3 O FENÔMENO DE INFILTRAÇÃO EM MODELOS CHUVA-DEFLÚVIO .....	8
3.1 O Processo de Infiltração .....	9
3.2 Capacidade de Infiltração e Taxa de Infiltração .....	14
3.3 Determinação da Infiltração .....	15
3.4 Modelação em Bacias Hidrográficas .....	17
3.5 Classificação de Modelos a Bacias Hidrográficas .....	18

3.6 Parâmetros de Modelos Hidrológicos .....	21
3.7 Calibração de Modelos .....	21
3.8 Validação de Modelos .....	23
3.9 Função Objetivo .....	25
4 ANÁLISE DAS EQUAÇÕES E MODELOS DE INFILTRAÇÃO .....	27
4.1 Modelo de Green & Ampt .....	27
4.2 Modelo de Diskin & Nazimov .....	32
4.3 Equação de Tan & O'Connor .....	37
5 VALORES DE PARÂMETROS REFERENCIADOS NA LITERATURA TÉCNICA .....	40
6 METODOLOGIA .....	48
6.1 Apresentação do Modelo LABSHI .....	48
6.2 Descrição Conceitual do Modelo LABSHI .....	49
6.3 Fluxograma Simplificado do Modelo LABSHI .....	56
7 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS BACIAS DE ESTUDO .....	57
8 RESULTADOS .....	65
8.1 Período de Estudo no Modelo de Trabalho .....	65
8.2 Resultados Obtidos pelo Modelo de Trabalho a Bacia do Aguapei .....	68
8.3 Resultados Obtidos pelo Modelo de Trabalho a Bacia do Capivari-Monos e Itatinga .....	95
8.4 Comparação dos Valores de Parâmetros de Infiltração .....	114

9 CONCLUSÕES .....	116
10 RECOMENDAÇÕES .....	120
ANEXOS .....	122
Anexo 1 - Valores de chuva mensal e vazão (calculada e observada) apresentados pelo modelo de trabalho aos períodos processados para a situação de valores adotados ao coeficiente dos postos $W_i$ dado pela relação $P_{mb}/P_{mi}$ - bacia do Aguapei .....	123
Anexo 2 - Visualização gráfica da alteração do comportamento da hidrógrafa de vazão à situação adotada de distribuição uniforme da chuva - bacia do Aguapei .....	127
Anexo 3 - Apresentação de parâmetros relacionados ao modelo de trabalho (versão diária) - fase bacia e fase canal - valores adotados nos processamentos as períodos analisados .....	132
Anexo 4 - Demais equações de infiltração desenvolvidas a partir dos princípios de escoamento da água em meios porosos .....	134
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	138
ABSTRACT .....	144

## Lista de Tabelas

---

Tabela 5.1 – Parâmetros do modelo de Green & Ampt (porosidade efetiva, profundidade da frente úmida ( $l_w$ ) e condutividade hidráulica saturada (KHS)) .....	41
Tabela 5.2 – Estimação da condutividade hidráulica saturada (KHS) para a equação de Green & Ampt .....	43
Tabela 5.3 – Estimação da capilaridade ( $S_{uc}$ ) para a equação de Green & Ampt .....	44
Tabela 5.4 – Valores médios de condutividade hidráulica saturada (KHS) para diferentes localidades dos Estados Unidos .....	44
Tabela 5.5 – Valores de capacidade mínima de infiltração (IFC) estimados pelo modelo SMARY.....	45
Tabela 5.6 – Valores de capacidade mínima de infiltração (IFC), capacidade máxima de infiltração (IFI) e capacidade máxima de umidade do solo (SMAX) otimizados através do modelo de Diskin & Nazimov .....	46
Tabela 7.1 – Relação de postos pertencentes a bacia do Aguapei utilizados no estudo .....	60
Tabela 7.2 – Padrão de evaporação - totais mensais (mm) da bacia do Aguapei .....	61
Tabela 7.3 – Eventos selecionados, chuvas diárias do posto pluviométrico Evangelista de Souza (mm) e evaporação - totais diários (mm/dia) para bacia do rio Capivari-Monos .	63

Tabela 7.3 – Eventos selecionados, chuvas diárias do posto pluviométrico da Companhia Docas (mm) e evaporação - totais diários (mm/dia) para bacia do rio Itatinga .....	64
Tabela 8.1 - Etapas desenvolvidas no estudo para a bacia do Aguapei .....	68
Tabela 8.2 - Distribuição temporal da chuva (I) para a bacia do Aguapei .....	69
Tabela 8.3 - Distribuição temporal da chuva (II) para a bacia do Aguapei .....	71
Tabela 8.4 – Relação de postos e coeficientes ( $W_i$ ) para a bacia do Aguapei .....	73
Tabela 8.5 – Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Green & Ampt para os períodos de estudo .....	74
Tabela 8.6 – Valores de vazão média calculada e observada aos períodos analisados ao método de Green & Ampt .....	74
Tabela 8.7 – Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Diskin & Nazimov para os períodos de estudo .....	76
Tabela 8.8 – Valores de vazão média calculada e observada aos períodos analisados ao método de Diskin & Nazimov .....	77
Tabela 8.9 – Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Tan & O’Connor para os períodos de estudo .....	79
Tabela 8.10 – Valores de vazão média calculada e observada aos períodos analisados ao método de Tan & O’Connor .....	79

Tabela 8.11 - Caracterização de parâmetros comuns e específicos aos métodos propostos e inseridos no modelo de trabalho .....	82
Tabela 8.12 – Análise das características mediante alteração do parâmetro IFI .....	83
Tabela 8.13 – Análise das características mediante alteração do parâmetro EVASUP .....	83
Tabela 8.14 – Análise das características mediante alteração do parâmetro EVASOL .....	84
Tabela 8.15 – Análise das características mediante alteração do parâmetro VCC .....	84
Tabela 8.16 – Análise das características mediante alteração do parâmetro KSUP .....	85
Tabela 8.17 – Análise das características mediante alteração do parâmetro KSSP .....	85
Tabela 8.18 – Análise das características mediante alteração do parâmetro NSUP .....	86
Tabela 8.19 – Análise das características mediante alteração do parâmetro SMAX .....	86
Tabela 8.20 – Análise das características mediante alteração do parâmetro IFC .....	87
Tabela 8.21 – Análise das características mediante alteração do parâmetro KHS .....	87
Tabela 8.22 – Análise das características mediante alteração do parâmetro SUC .....	88
Tabela 8.23 – Análise das características mediante alteração do parâmetro TETS .....	88
Tabela 8.24 – Análise das características mediante alteração do parâmetro ALFA .....	89
Tabela 8.25 – Comparação entre os valores de vazão média calculado segundo valores adotados do coeficiente $W_i$ .....	90

Tabela 8.26 – Comparação das vazões médias calculadas segundo a distribuição temporal da chuva adotada .....	92
Tabela 8.27 - Valores de vazão e coeficiente de correlação para as enchentes da bacia do rio Capivari-Monos – método de Green & Ampt .....	97
Tabela 8.28 – Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Green & Ampt para as enchentes analisadas – bacia do Capivari-Monos .....	97
Tabela 8.29 - Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Diskin & Nazimov para as enchentes analisadas bacia do Capivari-Monos .....	100
Tabela 8.30 - Valores de vazão e coeficiente de correlação para as enchentes da bacia do rio Capivari-Monos – método de Diskin & Nazimov .....	100
Tabela 8.31 - Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Tan & O’Connor para as enchentes analisadas - bacia do Capivari-Monos .....	103
Tabela 8.32 - Valores de vazão e coeficiente de correlação para as enchentes da bacia do rio Capivari-Monos – método de Tan & O’Connor .....	104
Tabela 8.33 - Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Green & Ampt para as enchentes analisadas - bacia do rio Itatinga .....	106
Tabela 8.34 - Valores de vazão e coeficiente de correlação para as enchentes da bacia do rio Itatinga – método de Green & Ampt .....	107
Tabela 8.35 - Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Diskin & Nazimov para as enchentes analisadas - bacia do rio Itatinga .....	109

Tabela 8.36 - Valores de vazão e coeficiente de correlação para as enchentes da bacia do rio Itatinga – método de Diskin & Nazimov .....	109
Tabela 8.37 - Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Tan & O’Connor para as enchentes analisadas - bacia do rio Itatinga .....	111
Tabela 8.38 - Valores de vazão e coeficiente de correlação para as enchentes da bacia do rio Itatinga – método de Tan & O’Connor .....	112
Tabela 8.39 - Comparação dos valores de parâmetros de infiltração apresentados na literatura técnica e valores determinados no estudo pelo modelo de trabalho .....	114

## Lista de Figuras

---

Figura 3.1 - Perfil de umidade após algum tempo iniciado a infiltração .....	11
Figura 3.2 - Classificação dos modelos baseado nos processos envolvidos .....	18
Figura 3.3 - Classificação dos modelos baseado nas escalas de tempo e espaço .....	19
Figura 4.1 – Representação simplificada da frente úmida no modelo de Green & Ampt .....	28
Figura 4.2 - Estrutura esquemática do modelo de infiltração de Diskin & Nazimov .....	32
Figura 5.1 – Classificação textural do solo segundo USDA .....	42
Figura 6.1 - Representação conceitual do processo de amortecimento na fase bacia .....	53
Figura 6.2 - Esquema físico da fase bacia no modelo LABSHI .....	54
Figura 7.1 – Localização das bacias do Aguapei, Capivari-Monos e Itatinga no estado .....	57
Figura 8.1 – Curvas (I) de distribuição temporal da chuva para os eventos analisados .....	70
Figura 8.2 – Curvas (II) de distribuição temporal da chuva para os eventos analisados .....	72
Figura 8.3 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Green & Ampt ao período de set/73 a ago/74 .....	75

Figura 8.4 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Green & Ampt ao período de set/74 a ago/75 .....	75
Figura 8.5 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Green & Ampt ao período de set/77 a ago/78 .....	76
Figura 8.6 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Diskin & Nazimov ao período de set/73 a ago/74 .....	77
Figura 8.7 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Diskin & Nazimov ao período de set/74 a ago/75 .....	78
Figura 8.8 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Diskin & Nazimov ao período de set/77 a ago/78 .....	78
Figura 8.9 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Tan & O'Connor ao período de set/73 a ago/74 .....	80
Figura 8.10 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Tan & O'Connor ao período de set/74 a ago/75 .....	80
Figura 8.11 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Tan & O'Connor ao período de set/77 a ago/78 .....	81
Figura 8.12 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) segundo a distribuição uniforme .....	93
Figura 8.13 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) segundo a distribuição característica .....	93

Figura 8.14 – Comparação entre hidrograma observado ( curva vermelha) e hietograma de chuva (curva verde) – verificação de imprecisões nos dados observados .....	95
Figura 8.15 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Green & Ampt para a enchente de jan/76 .....	98
Figura 8.16 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Green & Ampt para a enchente de mar/78 .....	98
Figura 8.17 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Green & Ampt para a enchente de nov/79 .....	99
Figura 8.18 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Green & Ampt para a enchente de abr/81 .....	99
Figura 8.19 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Diskin & Nazimov para a enchente de jan/76 .....	101
Figura 8.20 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Diskin & Nazimov para a enchente de mar/78 .....	101
Figura 8.21 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Diskin & Nazimov para a enchente de nov/79 .....	102
Figura 8.22 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Diskin & Nazimov para a enchente de abr/81 .....	102
Figura 8.23 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Tan & O'Connor para a enchente de jan/76 .....	104

Figura 8.24 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Tan & O'Connor para a enchente de mar/78 .....	104
Figura 8.25 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Tan & O'Connor para a enchente de nov/79 .....	105
Figura 8.26 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Tan & O'Connor para a enchente de abr/81 .....	105
Figura 8.27 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Green & Ampt para a enchente de dez/86 .....	107
Figura 8.28 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Green & Ampt para a enchente de mar/87 .....	108
Figura 8.29 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Green & Ampt para a enchente de fev/88 .....	108
Figura 8.30 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Diskin & Nazimov para a enchente de dez/86 .....	110
Figura 8.31 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Diskin & Nazimov para a enchente de mar/87 .....	110
Figura 8.32 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Diskin & Nazimov para a enchente de fev/88 .....	111
Figura 8.33 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Tan & O'Connor para a enchente de dez/86 .....	112

- Figura 8.34 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Tan & O'Connor para a enchente de mar/87 ..... 113
- Figura 8.35 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Tan & O'Connor para a enchente de fev/88 ..... 113

## Lista de Abreviaturas e Símbolos

---

### *Maiúsculas e Minúsculas Romanas*

A	:	Parâmetro do elemento de armazenamento no modelo de Diskin & Nazimov	
B	:	Parâmetro do elemento de regulação no modelo de Diskin & Nazimov	
C	:	Constante de integração	
D	:	Parâmetro do elemento de regulação no modelo de Diskin & Nazimov	
$\frac{dh}{dl}$	:	Gradiente hidráulico	
dp	:	Altura de alagamento	[ L ]
ETIS	:	Altura evaporada obtida de dados de tanque classe A	[ L ]
ETP	:	Evapotranspiração	[ L ]
EVASUP	:	Fator de correção das condições de tanque para as condições de superfície livre natural	
EVASOL	:	Fator de correção das condições de tanque para as condições de subsolo	

F	:	Atura total infiltrada	[ LT <sup>-1</sup> ]
f	:	Capacidade de infiltração	[ LT <sup>-1</sup> ]
g(t)	:	percolação	[ L ]
g <sub>i</sub>	:	Percolação no início do intervalo	[ L ]
g <sub>f</sub>	:	Percolação no final do intervalo	[ L ]
IFI	:	Capacidade inicial de infiltração	[ LT <sup>-1</sup> ]
IFC	:	Capacidade mínima de infiltração	[ LT <sup>-1</sup> ]
k <sub>hs</sub>	:	Condutividade hidráulica saturada	[ LT <sup>-1</sup> ]
KSB	:	Coefficiente relativo ao escoamento subterrâneo no modelo LABSHI	
KSSP	:	Coefficiente relativo ao escoamento sub-superficial no modelo LABSHI	
KST	:	Coefficiente relativo ao escoamento sub-superficial no modelo LABSHI	
KSUP	:	Coefficiente relativo ao escoamento superficial no modelo LABSHI	
KTS	:	Parâmetro do modelo LABSHI	
LABSHI:		Laboratório de simulação hidrológica	
ln	:	Logaritmo neperiano	
lw	:	Profundidade da frente úmida	[ L ]

nc	:	Parâmetro do modelo LABSHI	
np	:	Número de postos com dados no intervalo	
NSSP	:	Coefficiente relativo ao escoamento sub-superficial no modelo LABSHI	
NSUB	:	Coefficiente relativo ao escoamento subterrâneo no modelo LABSHI	
NSUP	:	Coefficiente relativo ao escoamento superficial no modelo LABSHI	
O	:	Escoamento no reservatório	[ L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
OF	:	Função objetivo	
Pm	:	Chuva média na bacia	[ LT <sup>-1</sup> ]
Pmb	:	Chuva média de longo período na bacia	[ LT <sup>-1</sup> ]
Pmi	:	Chuva média de longo período no posto i	[ LT <sup>-1</sup> ]
QBI	:	Escoamento subterrâneo	[ L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
QCI	:	Vazão no trecho	[ L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]
q (t)	:	Taxa de infiltração	[ LT <sup>-1</sup> ]
qf	:	Taxa de infiltração no final do intervalo	[ LT <sup>-1</sup> ]
qi	:	Taxa de infiltração no início do intervalo	[ LT <sup>-1</sup> ]
QSI	:	Escoamento superficial	[ L <sup>3</sup> T <sup>-1</sup> ]

$Q_t^o$	:	Valor de escoamento observado no tempo t	$[L^3T^{-1}]$
$Q_t$	:	Valor simulado pelo modelo no tempo t	$[L^3T^{-1}]$
QTI	:	Escoamento sub-superficial	$[L^3T^{-1}]$
$R(t)$	:	Intensidade de chuva	$[LT^{-1}]$
R1	:	Reservatório de detenção superficial	
R2	:	Reservatório do solo	
S	:	Volume estocado	$[L^3]$
$S(t)$	:	Umidade armazenada	$[L]$
$S_f$	:	Umidade armazenada no final do intervalo	$[L]$
$S_i$	:	Umidade armazenada no início do intervalo	$[L]$
SMAX	:	Máximo valor de umidade armazenada no solo no modelo de Diskin & Nazimov	$[L]$
$S_r$	:	Teor de umidade no elemento de armazenamento	$[L]$
Suc	:	Capilaridade ou altura de sucção capilar	$[L]$
$T_s$	:	Tempo de detenção	$[T]$
V	:	Velocidade de Darcy	$[LT^{-1}]$

$V1$	:	Reservatório de detenção superficial	
$V2$	:	Reservatório de detenção subterrânea	
$W_i$	:	Coefficiente do posto $i$	
$y(t)$	:	Chuva excedente	$[LT^{-1}]$

*Maiúsculas e Minúsculas Gregas*

$\alpha$	:	Parâmetro da equação de Tan-O'Connor	
$\Delta t$	:	Intervalo de tempo	$[T]$
$\theta_s$	:	Teor de umidade saturado	$[L]$
$\theta_i$	:	Teor de umidade inicial	$[L]$

## Resumo

---

Boni, Roni Cleber. Estudo Comparativo da Infiltração Através da Aplicação de Modelo Chuva-Deflúvio a Bacias do Estado de São Paulo. Campinas-SP, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 1999.

Devido às alterações de uso e ocupação do solo, os dados fluviométricos de longo período acabam integrando estes efeitos, decorrendo daí séries não estacionárias. Por esse motivo o interesse em modelos de simulação do processo chuva-deflúvio tem-se intensificado nas últimas décadas. Nesse processo, um dos elementos básicos estudados foi a infiltração, através do uso do modelo chuva-deflúvio *LABSHI*, desenvolvido no Departamento de Recursos Hídricos da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP pelo professor Dr. Valter Hernandez. O objetivo principal do trabalho consiste numa análise comparativa da infiltração por meio de diferentes expressões. Para tanto, foram utilizadas expressões que representam o processo, tais sejam a expressão de *Green & Ampt* bastante citada na literatura, como descrito por *Gupta* (1989), a expressão de *Diskin & Nazimov* (1995), e a de *Tan & O'Connor* (1995), proporcionando o cálculo da taxa de infiltração de água no solo através dos dados observados nas bacias em estudo. A pesquisa toma como base três bacias do Estado de São Paulo, onde a determinação dos parâmetros locais poderá servir como elementos para futuros estudos de regionalização para outras bacias do estado. Comparação dos resultados gerados pelo modelo chuva-deflúvio aos métodos propostos validam a sua utilização no estudo da infiltração, mostrando um melhor ajuste pelo método de *Green & Ampt* aos períodos estudados.

Palavras Chave: Infiltração, modelo chuva-deflúvio, simulação hidrológica.

# 1 Introdução

---

## 1.1 Histórico

A Hidrologia é a ciência que se baseia na observação dos processos envolvidos no meio físico natural, sendo que os fenômenos provocadores desses processos na bacia são os eventos meteorológicos. Contudo para tais eventos o conhecimento atual ainda não dispõe de explicações determinísticas suficientes que permitam uma previsão a médio e longo prazo. Em vista disso, sua análise é feita a partir de observações principalmente pluviométricas, evaporimétricas e fluviométricas realizadas no passado.

Historicamente, o homem, desde a sua origem, convive com as condições naturais do planeta, tanto no seu uso como na sua sobrevivência. Filósofos gregos fizeram as primeiras tentativas para explicar o ciclo hidrológico, até que Marcus Vitruvius Pollio, 100 a.C., apresentou conceitos próximos do entendimento atual desses fenômenos.

Mesmo não conhecendo a origem da água e o funcionamento dos fenômenos naturais, as civilizações antigas puderam explorar os recursos hídricos através de projetos de irrigação como os do Egito e da Mesopotâmia, aquedutos para abastecimento de água romanos ,e irrigação e controle de inundação pelos chineses.

Somente a partir do século XV, com Leonardo da Vinci e Bernard Palissy o ciclo hidrológico passou a ser melhor compreendido. A dificuldade era aceitar que a precipitação tinha um volume maior que a vazão e que os rios são mantidos perenes pelo retardamento do escoamento do subsolo. Pierre Perrault, no século XVII analisou os componentes da relação chuva-deflúvio, ou seja, a precipitação, evaporação e capilaridade da bacia do rio Sena e comparou estas grandezas com medições de vazão realizadas por Edmé Mariotte, constatando que a vazão era apenas cerca de 16% da precipitação (Tucci, 1993).

No século XIX teve início de um lado as medições sistemáticas de chuva e vazão e de outro o desenvolvimento teórico e experimental da hidráulica. Nos Estados Unidos a coleta sistemática de dados de precipitação iniciou-se em 1819, enquanto que a de vazões em 1888. No Brasil os postos mais antigos de precipitação são os do final do século passado, enquanto que a coleta de dados de níveis e vazão iniciou-se apenas no começo deste século.

Sempre procurando um melhor conhecimento da disponibilidade de recursos hídricos e de seu regime de ocorrência, hidrólogos vêm tentando, através da história, extrair o máximo de informações dos dados disponíveis, em geral insuficientes e precários, devido aos custos e dificuldades de operação das redes hidrométricas.

Face aos problemas crescentes, resultantes da ocupação nas bacias, os dados fluviométricos de longo período integram estes efeitos, decorrendo daí séries não estacionárias. Diante dessa realidade, muitos estudos são desenvolvidos baseados no uso de modelos que simulam os processos hidrológicos, partindo de dados pluviométricos para chegar às séries fluviométricas, como é o caso dos modelos chuva-deflúvio.

Os modelos chuva-deflúvio permitem a transformação de precipitação em vazão, descrevendo o fenômeno ocorrido na bacia, permitindo reproduzir numericamente os vários processos até a quantificação das vazões que, ao longo do tempo, atingem a seção transversal do

rio em estudo dentro de certa precisão aceitável. Trata-se de uma análise do comportamento dos processos hidrológicos ocorridos na bacia, lançando mão da ferramenta computacional aliada a equações e processos físicos envolvidos. A infiltração é um dos mais importantes processos físicos considerado nesse tipo de modelo.

A infiltração é o processo natural de entrada de água pela superfície do solo. O processo é influenciado pelas características físicas locais e propriedades do solo como a permeabilidade, condutividade hidráulica, umidade inicial, capilaridade entre outras. Uma das formas de sua determinação é através da representação matemática do movimento de água em solos com teor de umidade abaixo da saturação, das quais destacam-se as expressões mais difundidas e aplicadas: a expressão de Horton e a expressão de Green & Ampt, que podem ser inseridas em modelos hidrológicos do tipo chuva-deflúvio.

A expressão de Horton surgiu em meados de 1939 e até os dias atuais é largamente aplicada no estudo da infiltração. Trata-se de uma expressão que representa o decaimento da infiltração com o tempo. Outras expressões surgiram a partir deste período, principalmente por influência do estudo de Horton, e mesmo antes tal como a expressão de **Kostiakov (1932)**. Seguidos estudos desenvolvidos por diferentes pesquisadores deram origem a diferentes expressões, tendo destaque as expressões de **Holtan (1961)** e **Philip (1957)**. A partir da *Lei de Darcy*, Green & Ampt desenvolveram um método que se aplica à determinação da infiltração baseado em simplificações do fenômeno de propagação da frente úmida no interior do solo. **Tan & O'Connor (1995)** e **Diskin & Nazimov (1995)** propõem expressões e modelos alternativos para a determinação da infiltração. Ambos apresentam base teórica com considerações próprias propostas por cada autor.

A expressão de Tan & O'Connor relaciona a infiltração como função explícita do estado relativo de umidade do solo. É uma expressão com forma exponencial matematicamente semelhante a expressão de Horton, mas essencialmente diferente por colocar a capacidade de

infiltração como função do estado de umidade e não do tempo. Diskin & Nazimov apresentam um modelo para determinação da infiltração, composto de dois elementos que estabelecem relações de regulação e armazenamento a cada intervalo de tempo considerado. Eles também colocam a capacidade de infiltração como função do estado de umidade do solo mas utilizando uma função linear ao invés da expressão exponencial como a de Tan & O'Connor.

As expressões e métodos de Tan & O'Connor, Green & Ampt e Diskin & Nazimov inseridas ao modelo de trabalho chuva-deflúvio, buscam o intuito comparativo dos vários resultados de infiltração gerados para cada expressão proposta na metodologia derivando assim as conclusões da pesquisa.

Entre as muitas expressões disponíveis na literatura são selecionadas as três expressões por terem em comum a determinação da infiltração como função da umidade do solo e se constituírem em uma amostragem suficiente para uma análise comparativa do comportamento dos parâmetros representativos desse processo, embora as expressões de Kostiakov, Holtan e Philip serem também bastante difundidas no estudo da infiltração.

## 1.2 Organização do Trabalho

Através da aplicação de um modelo chuva-deflúvio desenvolveu-se a pesquisa, cujo enfoque principal foi o estudo da infiltração em bacias hidrográficas do Estado de São Paulo. Para tanto há necessidade de conhecimento dos processos envolvidos nesta transformação chuva-deflúvio, na descrição do caminho da água, separações ocorridas, junções e encaminhamento desta vazão em duas fases, ou seja, a fase bacia, que representa a transformação da chuva até a chegada no rio, e fase rio ou canal, que representa o percurso desta vazão ao longo do rio até a seção de interesse.

Deve-se salientar que na natureza, os processos são simultâneos, e no modelo, são realizados basicamente em seqüência, conforme o fluxo d'água ao longo da bacia. Na tentativa de reprodução dos acontecimentos hidrológicos ocorridos numa bacia, o modelo chuva-deflúvio utiliza uma série de equações, em sua maioria empíricas, estabelecida em termos de variáveis de estado e parâmetros físicos. Dessa forma, as respostas geradas pelo modelo devem ser comparadas a dados reais, que são os valores observados na seção de estudo. Essa comparação entre dados observados e calculados é conhecida por calibração.

A calibração é um processo considerado trabalhoso, geralmente realizada através da tentativa e erro, por inspeção visual ou automática. No caso em questão, a calibração manual foi adotada no intuito de permitir analisar a sensibilidade dos parâmetros envolvidos em cada método estudado para a situação em particular, embora o modelo de trabalho tenha como opção a seleção de parâmetros para otimização, que é utilizado para a adoção inicial dos parâmetros relacionados a cada método. A seguir é verificada a validação do conjunto de valores obtidos para os parâmetros, usando-se para tanto uma parcela dos dados não utilizados na fase de calibração.

Deve-se ter em mente que a escolha dos parâmetros é feita de modo que o modelo simule adequadamente o comportamento do local de estudo levando em conta a informação física local, características de solo e vegetação, além de alguns dos valores publicados na literatura técnica, facilitando o ajuste e a aceitação dos valores determinados.

A organização do trabalho é apresentada na seqüência dos estudos desenvolvidos. No *capítulos 1 e 2* são apresentados um breve histórico do desenvolvimento da pesquisa e dos processos ocorridos na natureza, e o objetivo da pesquisa.

Nos *capítulos 3 e 4*, um enfoque direcionado ao processo de infiltração e aos métodos e equações adotadas e inseridas no modelo de trabalho tendo em vista um melhor entendimento desse processo.

No *capítulos 5 e 6* são apresentados valores de parâmetros relacionados a infiltração referenciados em literaturas técnicas, além da ferramenta computacional utilizada, com descrição das fases bacia e canal.

O *capítulo 7* apresenta características gerais das bacias do Aguapei, dos rios Capivari-Monos e Itatinga, bacias estas utilizadas no estudo da infiltração pelo modelo proposto e descrito na metodologia.

Finalmente, nos *capítulos 8, 9 e 10* são apresentados os resultados da pesquisa, conclusões e recomendações.

# 2

## Objetivo

---

O objetivo principal do trabalho consiste na análise do comportamento dos parâmetros representativos do processo da infiltração, por diferentes expressões aplicadas em um modelo chuva-deflúvio. Este modelo simula os processos hidrológicos a partir de precipitações até o escoamento em uma seção fluvial por meio de relações calibráveis através de dados simultâneos de observações pluviométricas e fluviométricas.

Para tanto, são utilizadas expressões teóricas que representam o processo de infiltração tais sejam, a expressão de **Green & Ampt**, bastante citada na literatura como descrito por **Gupta (1989)**, a expressão de **Diskin & Nazimov (1995)**, e a de **Tan & O'Connor (1995)**.

A determinação dos parâmetros do modelo para as bacias analisadas poderá servir também como elemento para futuros estudos de regionalização para outras bacias do Estado de São Paulo. É um esforço para aumentar o conhecimento sobre a sensibilidade de parâmetros nesse tipo de transformação.

# 3

## O Fenômeno de Infiltração em Modelos Chuva-Deflúvio

---

A água é um recurso natural, renovável pelos processos físicos do ciclo hidrológico. A terra comporta-se como gigantesco destilador, em que a água, após evaporar-se dos oceanos, dos lagos, dos rios e da superfície terrestre, precipita-se sob a forma de chuva, neve e gelo, corre pela superfície, infiltra-se no solo, percola até o subsolo, escoar através de aquíferos, é absorvida pelas plantas e transpirada para a atmosfera, da qual torna a precipitar-se, e, assim sucessivamente.

O homem sempre procurou entender os fenômenos do ciclo hidrológico, mensurar as suas fases, na medida em que se capacitava tecnologicamente. Todavia, os seus conhecimentos ainda não permitem que deixe de tratar tais fenômenos como aleatórios, porém adquiriu tecnologia para alterar o regime hidrológico, como a regularização de vazões e a recarga dos aquíferos subterrâneos e necessitou desenvolver ferramentas no auxílio de uma melhor compreensão dos vários processos envolvidos no ciclo hidrológico.

Alguns modelos de transformação chuva-vazão agregaram o conhecimento de diferentes processos na bacia hidrográfica para, numa macroanálise, simular matematicamente parte do ciclo hidrológico, como, por exemplo, o processo de infiltração.

Desde o desenvolvimento do *Stanford Watershed Model* por Crawford e Linsley (1966), tem havido uma proliferação de modelos aplicados a bacias hidrográficas, conforme citado por Singh (1989).

### 3.1 O Processo de Infiltração

De acordo com **Musgrave e Holtan (1964)** a infiltração é o fenômeno natural do fluxo de água através da superfície do solo e, geralmente apresenta uma alta taxa inicial que diminui durante um evento de chuva contínuo em direção a uma taxa menor quase constante.

Define-se como capacidade de infiltração do solo em cada instante o máximo de fluxo de água que ele é capaz de absorver neste instante. A capacidade de infiltração depende de um número de fatores relacionados ao tipo de solo e sua cobertura vegetal, além do teor de umidade da camada superficial.

Ambos autores consideram o processo de entrada de água no solo como uma seqüência de passos: a infiltração que é a entrada pela superfície, a transmissão através do solo, e a diminuição da sua capacidade de armazenamento. Estes são fatores importantes que afetam a infiltração, em adição as características de permeabilidade média e percolação do fluido.

**Villela e Mattos (1975)** indicam que conhecendo-se a precipitação e o escoamento superficial, em uma bacia, pode-se calcular pela diferença, a infiltração ocorrida, se bem que esta englobará também toda a interceptação e armazenagem nas depressões. Para pequenas bacias o erro produzido pelo retardamento devido estes fenômenos é menor que para grandes bacias, cujo valor calculado indica uma infiltração média.

Horton citado por **Silveira, Louzada e Beltrame (1993)** através de experimentos de campo desenvolveu uma expressão matemática que representa a curva da capacidade de infiltração para o caso de um solo submetido a uma precipitação sempre superior à capacidade de infiltração. Tal expressão é caracterizada por tratar a capacidade de infiltração como função do tempo decorrido desde o início da chuva e não das condições do solo em cada momento.

**Cruz e Porto (1991)** através da análise do comportamento dos parâmetros de uma equação de perdas apresentam formas de procedimento para a obtenção dos parâmetros de infiltração da expressão de Horton.

A superfície do solo pode apresentar-se selada pelo arranjo de partículas finas que retardam a entrada de água e desse modo apresentar uma baixa taxa de infiltração. Portanto, é um processo que depende da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar, inicialmente presentes em seu interior. O cultivo também se mostra importante para a infiltração, modificando efeitos das superfícies, alterando a porosidade das camadas, principalmente em localidades aradas.

**Silveira, Louzada e Beltrame** mencionam o fato de que a medida que a água infiltra pela superfície, as camadas superiores do solo vão se umedecendo de cima para baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto há aporte de água, o perfil de umidade tende a saturação em toda a profundidade, sendo a superfície o primeiro nível a saturar.

Normalmente, a infiltração decorrente de precipitações naturais não é capaz de saturar todo o solo, restringindo-se a saturar apenas as camadas próximas a superfície, conformando um perfil típico onde o teor de umidade decresce com a profundidade.

**Diskin e Nazimov (1995)** dão destaque ao processo de infiltração dentro do ciclo hidrológico, sendo o elemento que determina a divisão da água, fornecida para a bacia na forma de chuva, em duas partes importantes. Uma parte é a água que entra na superfície do solo, renovando a umidade das camadas superiores e suprindo de água as camadas inferiores do solo. A segunda parte é a água que permanece na superfície da bacia decorrendo daí evaporação e vazões como escoamento direto no sistema de canais de drenagem e, através deste, para a saída da bacia.

Observa-se que o processo de percolação resultante da infiltração se dá em várias direções, podendo de modo simplificado considerar os fluxos horizontal e vertical. **Kao e Hunt (1996)** mostram através de estudos do movimento da frente de umidade que, na infiltração horizontal, o fluido pode ser modelado como móvel através de distintos canais de escoamento consistindo de poros conectados dentro dos meios porosos enquanto que a infiltração vertical é governada junto a combinação dos efeitos da capilaridade e gravidade. Neste caso, em pequenos intervalos de tempo após o início da infiltração, há o domínio da sucção capilar, enquanto que em grandes tempos ocorre o domínio pelas forças gravitacionais, tendo a taxa de infiltração valores aproximados aos da condutividade hidráulica.

Conforme descrição de **Prevedello (1996)**, o processo de infiltração é um exemplo típico de regime transiente. Após um determinado intervalo de tempo de infiltração num perfil de solo uniforme, a distribuição da umidade com a profundidade pode ser caracterizada pelas seguintes fases: zona saturada, zona de transição, zona de transmissão, zona de molhamento e frente de molhamento.

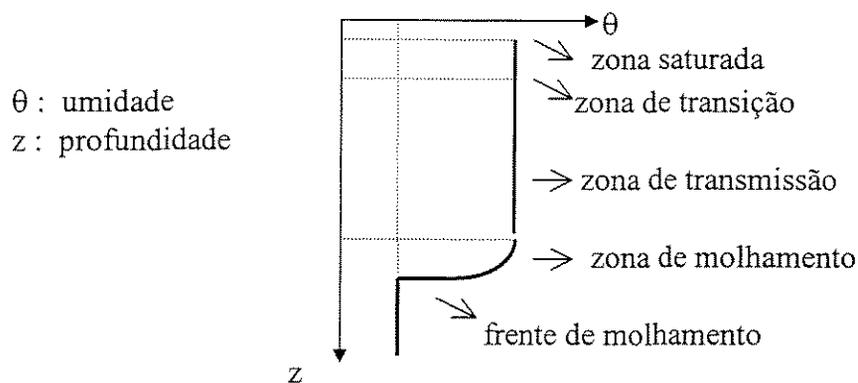


Figura 3.1 - Perfil de umidade após algum tempo iniciado a infiltração.

(fonte: **Prevedello, 1996**).

A zona saturada é normalmente uma camada estreita, imediatamente abaixo da superfície do solo. A zona de transição é uma região de decréscimo de umidade e localiza-se entre a zona saturada e a zona de transmissão.

A zona de transmissão é a mais representativa do processo crescendo continuamente, em espessura, com a contínua aplicação de água na superfície. É interessante notar que a umidade do solo pouco varia com a profundidade nesta região, com taxa de umidade próxima a de saturação.

A zona de molhamento apresenta variações de umidade, ou seja, alterações do valor inicial do perfil até o valor da zona de transmissão enquanto que, a frente de molhamento, é o limite visível da penetração da água no solo.

Nota-se, no entanto, que o solo influi de forma decisiva no processo de infiltração. Os seus vazios costumam estar preenchidos por água e ar. A água constitui a fase líquida, o ar, a fase gasosa e seus agregados minerais a fase sólida. A coexistência dessas três fases determina o caráter trifásico do sistema resultante. **Franciss (1980)** explica que a fase líquida é descontínua quando os vazios da fase sólida são descontínuos ou quando a quantidade de água existente é insuficiente para propiciar sua intercomunicação. Caso contrário, a fase líquida é contínua. Situação semelhante ocorre com a fase gasosa. Todavia, mesmo quando a fase líquida ocupa a totalidade dos vazios, a fase gasosa permanece com um caráter residual, aderida às paredes internas de cada poro e dissolvida na fase líquida.

O sistema trifásico, constituído pelo meio terroso, com água e ar em seus vazios, não permanece imutável. Variações, no espaço e/ou no tempo do estado de tensões atuantes no sistema modificam seu estado físico. Tais variações induzem modificações no caráter da fase sólida e no estado de movimento da fase líquida. Quando em movimento, a fase líquida pode carrear, temporariamente, algum material sólido, pertencente ou estranho ao meio poroso.

O escoamento de água através dos vazios dos meios terrosos permeáveis recebe a designação genérica de percolação. A permeabilidade que está relacionada ao transporte de água no interior do solo é um dos processos mais influentes sobre a infiltração. **Bradford e Huang (1993)** citam ainda outros fatores que afetam a infiltração, tais como características das chuvas existentes (intensidade), textura, porosidade e estrutura dos solos, inclinações íngremes, teor de umidade antecedente e variações climáticas.

O meio é dito homogêneo quando suas propriedades são constantes em qualquer ponto do mesmo, porém, se suas propriedades variam de um lugar para outro, o meio é dito heterogêneo. A rigor, todo meio poroso é um meio heterogêneo pela sua própria natureza. Um meio é hidráulicamente isotrópico quando suas propriedades, principalmente a condutividade hidráulica não depende da orientação, ou seja, é igual em qualquer direção que se considere. Caso esta varie com a orientação, o meio é dito anisotrópico. De modo geral o equacionamento dos modelos é feito admitindo hipóteses de homogeneidade e isotropia.

Um solo muito poroso pode ser muito condutivo se seus poros forem grandes e bem interconectados. De acordo com Franciss, o termo condutividade hidráulica vem sendo explorado no meio técnico a longa data. Em 1856, o engenheiro francês Henry Darcy, durante a realização de ensaios de filtração através de areias finas, relacionados a construção do novo sistema de abastecimento de água da cidade de Dijon, França, constatou a existência de uma proporcionalidade praticamente linear entre a vazão específica e o gradiente hidráulico.

A constante de proporcionalidade, denominada originariamente coeficiente de permeabilidade ou pelo termo mais difundido de condutividade hidráulica, reflete o grau de facilidade oferecido pelo meio permeável ao escoamento da água através de seus vazios. Na condutividade influem, além da natureza do solo, a massa específica e a viscosidade do fluido, as quais, por sua vez, são funções da temperatura e da pressão. O modelo de Green & Ampt toma por base a equação estabelecida por Darcy conforme descreve-se adiante.

O termo “ponding” que pode ser entendido como alagamento é comumente encontrado nas literaturas técnicas quando se aborda o assunto infiltração. Segundo citações de **Diskin & Nazimov (1996)**, é definido como início da formação de excesso de chuva na superfície da área considerada. O tempo de alagamento é atingido no momento em que a capacidade de infiltração se iguala à intensidade da precipitação. A partir desse instante, a taxa de infiltração deixa de ser igual à intensidade, gerando um excesso que virá a constituir o escoamento superficial.

A capacidade de campo é outro parâmetro considerado na modelagem hidrológica, **Diskin e Nazimov (1995)**. Ela é definida como sendo a quantidade de água que um solo pode reter depois de cessada a drenagem natural, após a saturação completa desse solo. Como é um valor que depende da estabilização do movimento de drenagem, é de difícil determinação sendo influenciado pela textura, estrutura, profundidade e uniformidade do solo.

### 3.2 Capacidade de Infiltração e Taxa de Infiltração

**Silveira, Louzada e Beltrame (1993)** chamam a atenção para o fato de que o conceito de capacidade de infiltração deve ser aplicado ao estudo da infiltração para diferenciar o potencial que o solo tem de absorver água pela sua superfície, em termos de lâmina por tempo, da taxa real de infiltração que acontece quando há disponibilidade de água para penetrar no solo.

Em um solo que cessou a infiltração, parte da água no seu interior propaga-se para as camadas mais profundas e parte é transferida para a atmosfera através da evaporação direta ou pela transpiração dos vegetais. Esse processo faz com que o solo recupere sua capacidade de infiltração, tendendo a um limite superior à medida que as camadas superiores do solo vão se tornando mais secas. Se uma precipitação atinge o solo com uma intensidade menor que a

capacidade de infiltração toda água tende a penetrar, provocando uma progressiva diminuição da própria capacidade de infiltração.

Caso a precipitação continue, pode ocorrer, dependendo da sua intensidade, um momento em que a capacidade de infiltração diminui tanto que sua intensidade se iguala à da precipitação. A partir deste momento, mantendo-se a precipitação, a infiltração real se processa nas mesmas taxas da curva da capacidade de infiltração, que passa a decrescer exponencialmente no tempo tendendo a um valor mínimo de infiltração. Ao término da precipitação e sem aporte de água na superfície do solo, a taxa de infiltração real se reduz e a capacidade de infiltração volta a crescer, pois o solo continua a perder umidade para as camadas mais profundas, além das perdas pela evapotranspiração.

A capacidade de infiltração como a taxa de infiltração variam durante e após algum tempo depois de cada evento chuvoso, é comum descrevê-las como função do tempo. **Diskin e Nazimov (1995)**, entretanto apontam que os processos envolvidos mostram que a mera passagem do tempo não pode ser a razão para as mudanças nestas variáveis. Assim sua variação no tempo deve ser colocada em função da variação de outros parâmetros físicos.

### 3.3 Determinação da Infiltração

**Musgrave e Holtan (1964)** assim como **Fill (1987)** sugerem duas aproximações gerais para a determinação da capacidade de infiltração. Uma delas é através da análise de hidrogramas de vazão de chuvas naturais sobre pontos da bacia; a segunda é através do uso de infiltrômetros com aplicação artificial de água em áreas experimentais.

No caso da análise de hidrogramas, isto é feito para uma bacia hidrográfica que dispõe de dados fluviométricos e pluviométricos simultâneos. Pela comparação entre o volume do hidrograma de escoamento superficial, obtido pela separação do deflúvio base e o volume de chuva caída, e considerando as perdas pela evaporação, interceptação, armanejamento subterrâneo e ainda considerando o tempo de retardamento, tem-se o total infiltrado. A medida direta da infiltração é feita através de infiltrômetros. Os infiltrômetros podem ser considerados em dois grupos: simuladores de chuva habitualmente chamados de infiltrômetros de aspersão e infiltrômetros do tipo inundação.

Para o primeiro tipo, a água é aplicada na forma de chuva, ou seja, simulada em gotas de tamanhos relativamente grandes, de forma a atingir a superfície do solo em estudo e evitar assim o seu deslocamento, quando atingida por ventos de grande velocidade. A chuva artificial produzida por esse "spray" de água é aplicada geralmente com uma intensidade constante. Quanto ao tipo inundação, a água é aplicada em uma reduzida lâmina sobre a área delimitada basicamente de dois cilindros concêntricos e um dispositivo de medida de volumes da água aduzida ao cilindro interno. A técnica consiste na colocação de água no cilindro externo e interno ao mesmo tempo. A razão da existência do cilindro externo é prover a quantidade de água necessária ao espalhamento lateral devido a capilaridade, deixando a infiltração propriamente dita ser medida relativamente à área limitada pelo cilindro interno.

Os infiltrômetros são freqüentemente usados em pequenas bacias, em bacias experimentais ou amostras de áreas dentro de grandes bacias. Onde há uma larga variação em solos ou vegetação sobre a área, a bacia é dividida em sub-áreas relativamente uniformes, cada uma sendo um complexo único solo-cobertura. Uma metodologia bem mais recente e de grande aplicação nos dias atuais é a estimativa da infiltração através de modelos computacionais, o que pode ser chamado de modelação em bacias hidrográficas. Conforme descrito por **Tucci (1987)**, os modelos hidrológicos atuais simulam o processo de transformação de precipitação em vazão na bacia hidrográfica, buscando retratar o seu comportamento diante da aplicação de equações empíricas.

### 3.4 Modelação em Bacias Hidrográficas

O conhecimento das variáveis hidrológicas é básico para qualquer projeto ou planejamento na área de Recursos Hídricos. Segundo **Tucci (1987)** os modelos permitem reconstruir séries hidrológicas, simular condições críticas e estudar o comportamento dos sistemas hidrológicos, sendo ferramentas importantes que permitem a obtenção de valores mais confiáveis para as variáveis de interesse.

Ar, solo e água constituem o ambiente contínuo, e são componentes vitais para sustentabilidade da vida na terra que se interagem de forma complexa. Assim, uma mudança no controle imposta sobre um componente do ambiente contínuo têm efeitos que propagam para outros componentes, e alguns destes efeitos são desconhecidos e não podem ser quantificados.

Para **Singh (1989)**, o controle integrado da água deve ser acompanhado dentro da unidade espacial que é a bacia hidrográfica, através do instrumento de modelação. Este controle pode ser visto como um processo de três ou mais dimensões, centrados em torno da necessidade da água. Seus elementos, suas interações, e os efeitos sobre restrições naturais assim como externas constituem a base sobre a qual o controle integrado dos recursos hídricos se apoiam.

A disponibilidade de dados quanto a sua distribuição temporal e espacial é uma das maiores limitações à utilização dos modelos. **Tucci (1987)** comenta que a distribuição espacial da precipitação numa bacia pode ser um fator de erro superior a qualquer refinamento de metodologia que simule os processos físicos.

### 3.5 Classificação de Modelos a Bacias Hidrográficas

Os modelos hidrológicos são de diferentes tipos e foram desenvolvidos para diferentes propósitos. Mesmo assim, muitos destes modelos apresentam partes estruturais similares, porque suas suposições básicas são as mesmas. **Singh (1995)** descreve que os modelos são classificados baseados em diferentes processos tais como: processo envolvidos, escalas de tempo e espaço.

Os modelos hidrológicos baseados nos processos envolvidos, representados na figura 3.2 apresentam cinco componentes incluindo sistema geométrico (bacia hidrográfica), entrada, leis governantes, condições iniciais e limites, e saída.

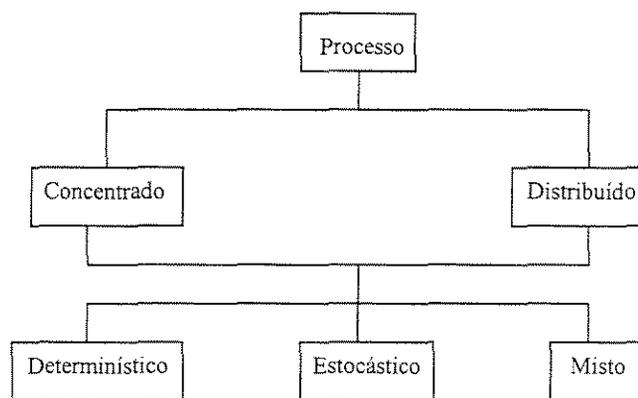


Figura 3.2 - Classificação dos modelos baseado nos processos envolvidos.

(fonte: **Singh, 1995**)

Dependendo do tipo de modelo, estes componentes são diversamente combinados. A maioria dos modelos apresentam componentes que incluem o sistema geográfico (bacia hidrográfica), entrada, leis governantes, condições iniciais e limites, e saída. Dependendo do tipo do modelo, estes componentes são diversamente combinados. Os componentes incluem informações dos processos hidrológicos que contribuem para a saída do sistema. Baseado na

descrição destes processos, em conjunto com características do sistema, os modelos podem ser distribuídos ou concentrados, determinísticos, estocásticos ou mistos.

Um modelo concentrado é, em geral, expresso por equações, tomadas sem considerar a variabilidade espacial dos processos, entrada, condições limites e características dos sistemas geométricos (bacias hidrográficas). Em muitos destes modelos, alguns dos processos são descritos por equações baseadas em leis simplificadas da hidráulica e, outros processos são expressos por equações algébricas empíricas. Os modelos distribuídos consideram de forma explícita a variabilidade espacial dos processos, entrada, condições limites e características dos sistemas. Saliente-se que na prática, a falta de dados de campo ou experimentais limitam uma formulação mais precisa dos modelos distribuídos.

Os modelos aplicados à bacias hidrográficas podem ser ainda classificados baseados na escala de tempo, como apresentado na figura 3.3.

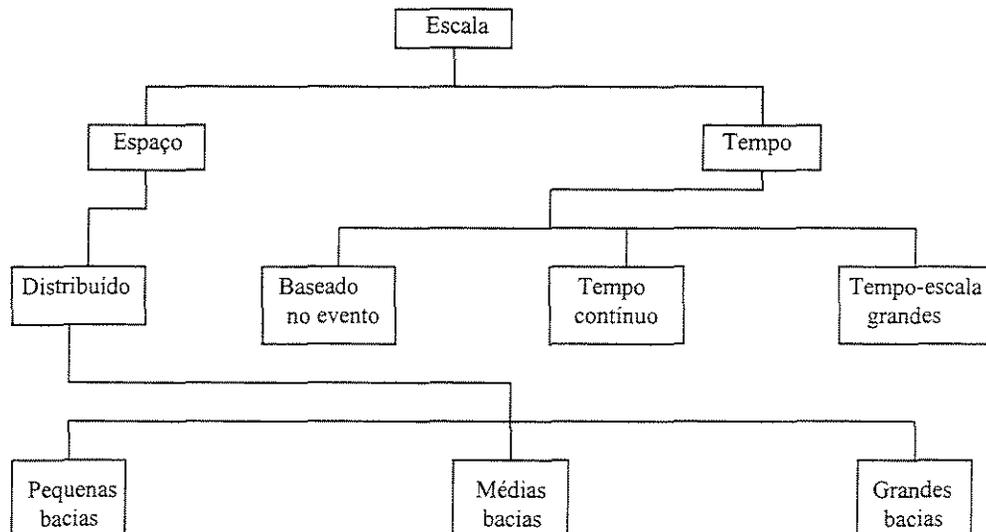


Figura 3.3 - Classificação dos modelos baseado nas escalas de tempo e espaço.

(fonte: Singh, 1995)

**Diskin e Simon (1979)** sugerem uma combinação de dois intervalos de tempo. Um dos intervalos de tempo é usado para entrada e cálculos internos. O segundo é o intervalo de tempo usado para a saída e calibração do modelo.

Baseado nesta descrição, os modelos distinguem-se entre eventos, intervalos diários, mensais e anuais. Esta classificação é imposta pelo intervalo de cálculo e, sua escolha, é freqüentemente dependente do uso pretendido. A escala espacial pode ser usada como um critério para classificar modelos em pequenas, médias e grandes bacias hidrográficas.

A definição de tamanho de uma bacia hidrográfica é algo vago. Usualmente, as bacias com áreas de 100 Km<sup>2</sup> ou menos podem ser chamadas pequenas, aquelas com áreas de 100 a 1000 Km<sup>2</sup> de médias e aquelas com áreas superiores a 1000 Km<sup>2</sup> de grandes. Como essa classificação é arbitrária e conceitual, a essência de grande importância é o conceito de homogeneidade e similaridade dos processos hidrológicos. Se os três tipos de bacias são espacialmente uniforme, então elas teriam comportamentos hidrológicamente similares. Na realidade, as bacias hidrográficas são raramente homogêneas, de modo que a homogeneidade é definida dentro de uma média ou sentido estatístico.

Baseado no uso da terra e em suas características físicas, as bacias podem ser classificadas como agrícolas, urbanas, áreas de florestas, áreas desérticas, montanhosas, costeiras e mistas. Em decorrência de suas diferenças físicas seu comportamento hidrológico é significativamente diferente. Variações de solo, vegetação e grau de impermeabilização são algumas das características mais importantes que diferenciam uma bacia da outra. Como resultado, os processos hidrológicos são diferentes em sua evolução, e portanto os modelos que são aplicadas as bacias são nitidamente diferentes. Desta forma, há dois problemas básicos a resolver na utilização de um modelo hidrológico. O primeiro está em selecionar um modelo conveniente, que represente a bacia hidrográfica em estudo. O segundo, está na seleção dos valores para os parâmetros do modelo de modo que simule adequadamente o comportamento do local de estudo.

### 3.6 Parâmetros de Modelos Hidrológicos

A confiança em modelos como um instrumento hidrológico é grande. Os modelos possibilitam o estudo de problemas muito complexos e sintetizam diferentes informações. Contudo, os seus resultados são corretos a medida em que forem corretos a sua escolha, os dados de entrada e a estimativa de seus parâmetros. De acordo com **Sorooshian e Gupta (1995)**, muitos modelos hidrológicos são baseados na representação conceitual dos processos físicos que governam o fluxo de água através e sobre o solo.

A maioria dos modelos tem tipicamente dois tipos de parâmetros envolvidos: parâmetros físicos e parâmetros de processo. Os parâmetros físicos representam propriedades fisicamente possíveis de serem medidas na bacia. Exemplos são: área da bacia, a fração da área da bacia que é impermeável, a área superficial de escoamento e inclinações das superfícies. Os parâmetros de processo representam propriedades das bacias que não são diretamente medidas. Exemplos incluem: o teor de umidade médio no solo, percolação no armazenamento subterrâneo entre outros.

### 3.7 Calibração de Modelos

A calibração de modelos chuva-deflúvio é um dos problemas em hidrologia que ainda não apresentam solução inteiramente satisfatória seja através de técnicas manuais ou automáticas. **Lopes e Porto (1991)** comentam sobre uma técnica, conceitualmente simples, de pesquisa global de parâmetros, auxiliando significativamente o processo de calibração. Ela é denominada de técnica de busca direta através da utilização do algoritmo de Rosenbrock-Hill. De acordo com os autores, o método de busca direta consiste em, a partir de um valor inicial dos parâmetros, minimizar a função objetivo provendo-se da variação dos parâmetros através de algoritmos

matemáticos que resultam numa alta eficiência computacional. Segundo os autores, a técnica utilizada mostrou-se adequada, principalmente porque a análise de sensibilidade dos parâmetros está implícita no método, gerando resultados confiáveis.

Para calibrar um modelo, há necessidade de selecionar valores iniciais para os parâmetros de modo que ele simule adequadamente o comportamento do local de estudo. O principal objetivo é conseguir o ajuste dos parâmetros para obtenção da hidrógrafa simulada de maneira que ela apresente semelhanças com a hidrógrafa observada. O processo de ajuste pode ser manual ou automático.

Na calibração manual, a cada parâmetro ajustado, são realizadas comparações visuais entre a hidrógrafa simulada e a observada para verificar se o ajuste foi melhorado. Com treinamento e uma boa carga de experiência, é possível obter boas calibrações nos modelos usando a aproximação manual. Entretanto, para quem for inexperiente e destreinado, a calibração manual pode ser difícil.

Deve-se salientar que a calibração manual envolve uma grande quantidade de julgamentos subjetivos, de modo que pessoas diferentes podem obter valores diferentes para os parâmetros de uma mesma bacia. Devido esta dificuldade inicial, optou-se por introduzir ao modelo de trabalho a opção de seleção de parâmetros para otimização, ou seja, uma otimização parcial. Definido o parâmetro a ser otimizado atribui-se um valor a esta variável e efetua-se o processamento, observando a resposta gerada. Se a escolha inicial não for satisfatória inicia-se novamente a otimização na busca de uma melhor representação dada pelo modelo.

Com o desenvolvimento de novas técnicas computacionais, os métodos baseados na calibração automática tem tido grande projeção, sendo motivada principalmente pela necessidade de acelerar os processos de calibração e a de determinar alguma medida de objetividade e confiança para previsão dos modelos.

Segundo **Azevedo, Fontane e Porto (1991)** a utilização de sistemas especialistas no auxílio a calibração de um modelo chuva-deflúvio vem tendo maior aplicação como um instrumento auxiliar para a obtenção do conjunto “ótimo” de parâmetros. Define-se sistemas especialistas a programas computacionais que incorporam “conhecimento” e “competência” de modo que os permitam atuar de forma semelhante a um “especialista humano”.

Grandes progressos foram conseguidos neste campo. Entretanto, é importante notar que os métodos de calibração automática ainda não substituem por completo os métodos manuais. Isso decorre do fato de que em uma hidrógrafa há diferentes elementos envolvidos tais sejam picos de enchentes, forma do hidrograma, vazões de estiagem e outros. Dessa forma fica difícil que uma função objetivo possa simultaneamente atingir todos esses elementos.

Assim, se por um lado eles têm a vantagem da rapidez e unicidade de resposta, por outro lado sua resposta se atém apenas à função objetivo a ele associado. Além disso, a própria escolha da função objetivo depende do pesquisador. Apesar da rapidez para prover soluções, os métodos automáticos ainda requerem o uso de experiência e conhecimento e são usados tipicamente em união com os procedimentos manuais.

### 3.8 Validação de Modelos

A confiança que se possa ter em um modelo do tipo chuva-deflúvio depende da sua capacidade de preservar, nas séries sintéticas (geradas), algumas propriedades observadas nas séries históricas (observadas). Segundo **Kelman (1987)** uma propriedade pode ser constituída por um único valor, como por exemplo, a vazão média observada em  $n$  anos. Ou pode ser um conjunto de valores, como, por exemplo, a distribuição de probabilidades da máxima vazão observada em cada ano.

Diz-se que um modelo preserva uma determinada propriedade quando não se pode distinguir estatisticamente a série histórica da sintética, com base nas observações desta propriedade nas duas séries.

Quando alguma propriedade é utilizada para a determinação de um parâmetro do modelo, esta propriedade é automaticamente preservada, por construção. Nesse caso, comparar a observação da propriedade da série gerada com o seu correspondente da série histórica serve apenas para verificar a adequação do programa computacional utilizado, e não para validar o modelo (Kelman e Pereira, 1977; Stedinger e Taylor, 1982)<sup>1</sup>.

Segundo o exemplo citado pelos próprios autores, quando o planejamento da expansão do sistema hidrelétrico é feito com auxílio de séries sintéticas mensais, a atenção deve estar voltada à preservação dos volumes afluentes durante as secas. Quando o cálculo do volume de amortecimento de cheias é feito com o auxílio de séries sintéticas diárias, a atenção deve estar voltada para a preservação dos picos e volumes das cheias excepcionais.

A validação do modelo é necessária sempre que terminada a fase de calibração. É usual, dentro do período simulado, tomar parte da série histórica para efetuar a verificação dos parâmetros envolvidos no modelo. Essa separação dependerá essencialmente da disponibilidade de dados com qualidade suficiente.

Garantida a representação dos processos naturais que ocorrem em uma bacia pode-se dizer que o modelo respeita as variações hidrológicas e representa de forma satisfatória a maioria dos fenômenos envolvidos no meio.

---

<sup>1</sup> Kelman e Pereira, 1977 e Stedinger e Taylor, 1982 apud Kelman, 1987.

### 3.9 Função Objetivo

Conforme **Sorooshian e Gupta (1995)** um procedimento típico para a estimativa automática dos parâmetros consiste na análise dos seguintes elementos: função objetivo, algoritmo de otimização e critério de parada.

A função objetivo é uma equação que é usada para calcular uma medida numérica da diferença entre a saída simulada do modelo e a saída observada (dados de estações hidrométricas) na bacia. Ela desempenha um importante papel no processo, uma vez que seu valor, a cada passo, é um fator decisivo para aceitar ou rejeitar um valor de parâmetro.

O propósito da calibração automática no modelo é portanto encontrar os valores dos parâmetros do modelo que otimizem (maximize ou minimize) o valor numérico da função objetivo. Segundo **Magalhães (1989)** com alguma abstração, é possível imaginar que, uma vez que as séries de vazões observada e simulada nunca serão perfeitamente coincidentes, a medida dessa diferença pode ser realizada através de inúmeras maneiras distintas, como por exemplo através do somatório dos quadrados das diferenças, onde o algoritmo otimizador minimizará o somatório sem levá-lo a zero, ou alguma outra função de mesma natureza, como as apresentadas na grande parte dos modelos hidrológicos.

Pode-se citar alguns tipos de função objetivo (OF):

$$OF1 = \sum_t [Q_t^o - Q_t]^2 \dots\dots\dots (3.1)$$

$$OF2 = \sum_t [1/Q_t^o - 1/Q_t]^2 \dots\dots\dots (3.2)$$

$$OF3 = \sum_t [(Q_t^o - Q_t) / Q_t^o]^2 \dots\dots\dots (3.3)$$

em que:

$Q_t^o$  : valor de escoamento observado no tempo  $t$ ;

$Q_t$  : valor simulado pelo modelo no tempo  $t$ .

Magalhães sugere que a escolha da função objetivo deve, entre outras coisas, ser compatível com o propósito do uso do modelo. **Diskin e Simon (1977)** desenvolveram estudos sobre critérios para escolha da função objetivo, mostrando que uma inadequada escolha amplifica substancialmente as incertezas dos resultados.

O algoritmo de otimização é um procedimento lógico que é usado na busca do conhecimento da superfície de resposta, ou seja, uma área viável de valores físicos admissíveis para os parâmetros do modelo. O critério de parada auxilia o usuário para quando interromper a busca ao valor do parâmetro. Para tanto, utiliza-se de uma função de convergência que, pelo meio de comparações entre os valores encontrados aos parâmetros nas interações subsequentes estabelece o término do processamento.

# 4

## Análise das Equações e Modelos de Infiltração

---

A infiltração é o movimento de água da superfície para o interior do solo, de ocorrência natural ou artificialmente induzida. Um dos primeiros estudos envolvendo movimento de água em solos foi desenvolvido por volta de 1856 pelo engenheiro Henri Darcy. De seus muitos estudos realizados, destaca-se o equacionamento do movimento de água em solos saturados, do qual é também aplicado para solos com teor de umidade abaixo da saturação, gerando a lei empírica, que combinada a equação da continuidade derivam as diversas expressões para cálculo da infiltração, dentre elas as expressões de Green & Ampt, Tan & O'Connor entre outras.

### 4.1 Modelo de Green & Ampt

O modelo de Green & Ampt é uma representação conceitual do processo de infiltração derivado da lei empírica de Darcy para meios porosos:

$$V = khs \frac{dh}{dl} \dots\dots\dots (4.1)$$

em que:

- V : velocidade de Darcy;
- khs : condutividade hidráulica saturada;
- $\frac{dh}{dl}$  : gradiente hidráulico.

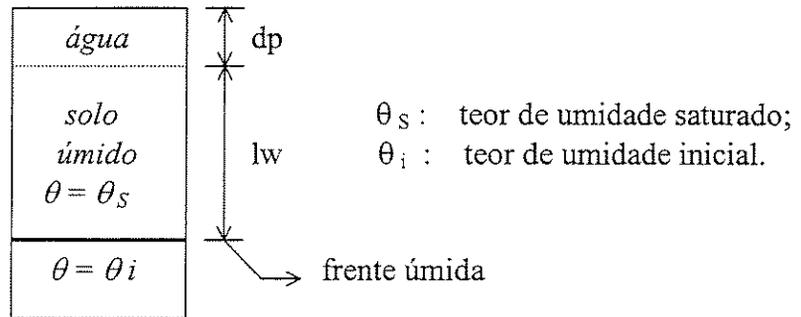


Figura 4.1 – Representação simplificada da frente úmida no modelo de Green & Ampt.  
(fonte: Gupta, 1989)

É importante salientar que o conceito de velocidade aplicado na lei de Darcy é diferente do tradicional, isto é, taxa de variação do deslocamento em relação ao tempo. **Caicedo (1993)** cita que a velocidade de Darcy é um fluxo volumétrico definido pelo volume escoado por unidade de área total (grãos e vazios) e por unidade de tempo.

De acordo com **Reedy (1989)** o gradiente hidráulico na lei de Darcy é igual a razão da altura de alagamento  $d_p$ , a profundidade da frente úmida  $l_w$  e a capilaridade  $Suc$  na frente úmida para a profundidade  $l_w$ :

$$\frac{dh}{dl} = \frac{dp + lw + suc}{lw} \dots\dots\dots (4.2)$$

A altura total infiltrada  $F$  no tempo  $t$  é igual ao produto da profundidade da frente úmida pela diferença do teor de umidade inicial  $\theta_i$  e o saturado  $\theta_s$ :

$$F = (\theta_s - \theta_i) l_w \dots\dots\dots (4.3)$$

O método assume que  $\theta_s$  e  $\theta_i$  são constantes no tempo com o avanço da frente úmida.

Portanto, a alteração em F com o tempo será:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{d[(\theta_s - \theta_i)lw]}{dt} = (\theta_s - \theta_i) \frac{dlw}{dt} \dots\dots\dots (4.4)$$

Igualando o termo da esquerda da equação 4.4 com a velocidade de Darcy, dada na equação 4.1 e supondo  $d_p$  muito pequeno, resulta-se na seguinte equação:

$$(\theta_s - \theta_i) \frac{dlw}{dt} = khs \frac{lw + suc}{lw} \dots\dots\dots (4.5)$$

No rearranjo da equação acima, tem-se:

$$\frac{khs}{\theta_s - \theta_i} dt = \frac{lw}{lw + suc} dlw \dots\dots\dots (4.6)$$

Integrando a equação 4.6, obtêm-se:

$$\frac{khs t}{\theta_s - \theta_i} = suc + lw - suc \ln(suc + lw) + C \dots\dots\dots (4.7)$$

Para o tempo  $t = 0$ , F é igual a zero. Assim, a constante de integração C tem a forma:

$$C = suc \ln suc - suc \dots\dots\dots (4.8)$$

Quando substituída junto a equação 4.7, tem-se:

$$\frac{khs t}{\theta_s - \theta_i} = lw - suc \ln\left(1 + \frac{lw}{suc}\right) \dots\dots\dots (4.9)$$

ou

$$khs t = (\theta_s - \theta_i)lw - suc(\theta_s - \theta_i) \ln\left(1 + \frac{lw}{suc}\right) \dots\dots\dots (4.10)$$

Dada a equação 4.3, a relação entre F e t será:

$$khs t = F - suc(\theta_s - \theta_i) \ln\left[1 + \frac{F}{suc(\theta_s - \theta_i)}\right] \dots\dots\dots (4.11)$$

A capacidade de infiltração  $f$  pode ser calculada tomando a derivada da equação 4.11, resultando na expressão cuja forma é a mais difundida.

$$f = \frac{khs(dp + suc + lw)}{lw} \dots\dots\dots (4.12)$$

Segundo **Reedy (1989)**, na aplicação do modelo, o solo é considerado totalmente saturado da superfície à profundidade da frente úmida; abaixo, o solo continua com a umidade de antes da ocorrência da precipitação.

A medida que essa frente úmida se aprofunda, permanecem válidas essas condições. Na superfície da frente úmida, que separa o solo saturado do não saturado, a tensão capilar é a mesma, a qualquer posição e tempo da frente.

De acordo com o modelo de Green & Ampt, há de se garantir sempre a presença de uma lâmina de água na superfície do solo, ou seja, acúmulo de água no reservatório superficial ou alagamento na superfície do solo.

Na ocorrência de um evento chuvoso de baixa intensidade, toda a água precipitada acaba infiltrando no solo, de modo que não ocorre acúmulo em sua superfície. A partir de certo instante onde a chuva apresente uma intensidade maior que a capacidade de infiltração, surge a condição ao início do fenômeno de alagamento, e a infiltração tende a seguir a equação básica do modelo.

Dentro desta condição para calcular a infiltração acumulada, Mein e Larson, citado por **Gupta (1989)** sugerem uma correção no valor calculado pelo ajuste da curva real e curva teórica, o cálculo é feito utilizando-se a equação teórica do método, mas corrigindo-se o tempo pela diferença entre o tempo real em que ocorre o alagamento e o tempo em que, pelas equações teóricas se teria o total realmente infiltrado e que é conhecido pois até aquele momento toda a chuva infiltrou.

Na maioria dos modelos há necessidade de encontrar valores para os diversos parâmetros envolvidos. Segundo **Simões e Magalhães (1991)** uma estimativa de parâmetros de infiltração para aplicação do modelo de Green & Ampt pode ser obtida a partir da curva de umidade do solo (curva que relaciona a umidade do solo com a tensão). Estas curvas podem ser estimadas através de modelos de regressão de Raws, Brakensiek e Saxton, conforme citado por esses autores.

Tais modelos utilizam informações quanto à granulometria do solo, densidade aparente, teor de matéria orgânica e teor de umidade para as tensões de capacidade de campo (-1500 Kpa) e ponto de murchamento permanente (-33 Kpa).

**Gupta (1989)** sugere que a determinação dos parâmetros no modelo de Green & Ampt pode ser feita através das propriedades físicas do solo. Uma possibilidade semelhante foi explorada por **Brakensiek e Rawls (1983)**, cujas análises estatísticas de uma extensa base de dados de solos resultou no desenvolvimento de equações de regressão, considerando as porcentagens de areia e argila e também a porosidade do solo. Suas pesquisas produziram valores médios dos parâmetros sobre cada classe textural do solo, com bons resultados.

## 4.2 Modelo de Diskin & Nazimov

**Diskin & Nazimov (1995)** apresentam um modelo conceitual simples do processo de infiltração. O modelo não inclui elementos que representam os processos de interceptação, evaporação, transpiração e armazenamento em depressões, mas eles podem ser facilmente adicionados em um modelo chuva-deflúvio.

O modelo compreende dois elementos como mostrado esquematicamente na Figura 4.2. Um dos elementos é o elemento de regulação (regulating element) que recebe uma entrada, e produz duas saídas (escoamento, infiltração). O outro elemento é denominado elemento de armazenamento (storage element) que recebe uma entrada (infiltração) e produz uma saída (percolação). Cada elemento possui uma variável de estado que determina a magnitude de suas saídas. Ambos são ligados por uma conexão realimentadora que transmite informações sobre o estado do elemento de armazenamento para o elemento de regulação. Os dois elementos são também relacionados pelo fato de que uma das saídas do elemento de regulação (infiltração) é a entrada do elemento de armazenamento.

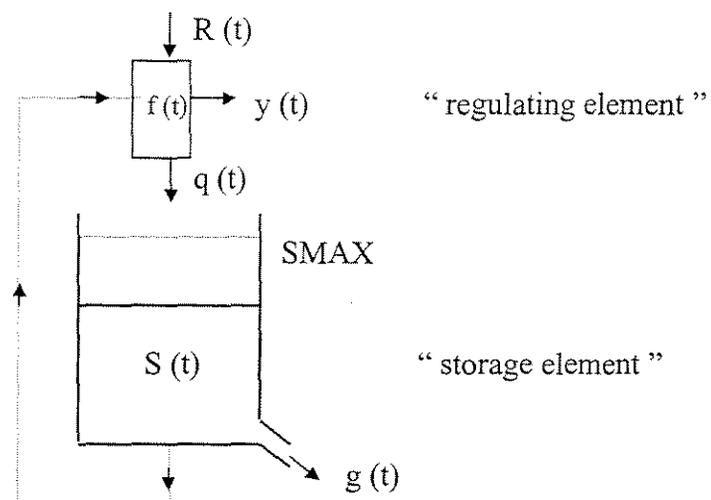


Figura 4.2 - Estrutura esquemática do modelo de infiltração de Diskin & Nazimov.

(fonte: **Diskin & Nazimov, 1995**)

Os valores das duas variáveis de estado e das variáveis de entrada e saída dependem do dado de entrada para o modelo, o que é também a entrada para o elemento de regulação. Este dado é usualmente expresso como uma função do tempo na forma de um histograma usando um intervalo de tempo fixado. Consequentemente, as outras variáveis são também apresentadas como função do tempo, e os cálculos são efetuados para o mesmo intervalo fixado.

Os cálculos produzem os valores das diversas saídas e variáveis de estado no final de cada intervalo de tempo de um valor conhecido do armazenamento no início e na entrada do modelo durante o intervalo estabelecido.

A variável de estado do elemento de armazenamento é o volume de água estocada neste elemento. Isto é expresso em unidade de volume por unidade de área, ou profundidade (altura), e seu valor em certo instante  $t$  é definido por  $S(t)$ .

O elemento de armazenamento é assumido como um reservatório linear, produzindo uma saída proporcional ao volume armazenado. Em certo intervalo de tempo  $t$  dado o valor da saída,  $g(t)$ , é:

$$g(t) = A S(t) \dots\dots\dots (4.13)$$

em que:

A : parâmetro do elemento de armazenamento.

O valor da variável de estado do elemento de regulação em certo instante,  $f(t)$ , é determinado pelo valor de  $S(t)$ , transmitido para este elemento via uma conexão realimentadora.

A relação entre as duas variáveis de estado é especificada por uma relação de

decréscimo linear:

$$f(t) = B - D S(t) \dots\dots\dots (4.14)$$

em que:

B e D : parâmetros do elemento de regulação.

A saída do elemento de regulação depende do valor da variável de estado,  $f(t)$ , e do valor de entrada,  $R(t)$ , no instante considerado. As duas saídas,  $q(t)$  e  $y(t)$ , são definidas pela seguinte relação:

$$\text{se } R(t) < f(t) \text{ então } q(t) = R(t) \text{ e } y(t) = 0$$

e

$$\text{se } R(t) > f(t) \text{ então } q(t) = f(t) \text{ e } y(t) = R(t) - f(t)$$

As duas saídas,  $q(t)$  e  $y(t)$ , a entrada  $R(t)$ , e a variável de estado,  $f(t)$ , são todas expressas em unidades de volume por unidade de área, por unidade de tempo, ou altura por unidade de tempo.

O elemento de armazenamento é utilizado para representar a umidade do solo, que aumenta com a infiltração,  $q(t)$ , e diminui por percolação,  $g(t)$ . A capacidade máxima de umidade do solo,  $S_{MAX}$ , é tomado como sendo um parâmetro do modelo. A quantidade de água retida, representada por  $S(t)$ , no elemento de armazenamento fica restrito ao limite:

$$0 \leq S(t) \leq S_{MAX} \dots\dots\dots (4.15)$$

O elemento de regulação é utilizado para representar a superfície do solo. Ao se esgotar por completo a umidade,  $S(t)=0$ , a capacidade de infiltração está em seu máximo valor,  $f(t) = IFI$ .

Observar que no modelo é considerado a capacidade de campo, de modo que sempre se considera a umidade retida no solo.

No momento em que  $S(t) = SMAX$ , a capacidade de infiltração apresenta o seu menor valor, ou seja,  $f(t) = IFC$ , enquanto que a percolação torna-se máxima, com  $g(t) = IFI$

Aplicando tais considerações as equações 4.13 e 4.14, tem-se:

$$A = IFC / SMAX \quad \dots\dots\dots (4.16)$$

e

$$B = IFI \quad \dots\dots\dots (4.17)$$

O parâmetro D do elemento de regulação é definido por:

$$D = (IFI - IFC) / SMAX \quad \dots\dots\dots (4.18)$$

Substituindo os parâmetros A, B e D nas equações 4.13 e 4.14 tem-se:

$$g(t) = IFC + S(t) / SMAX \quad \dots\dots\dots (4.19)$$

e

$$f(t) = IFI - (IFI - IFC) S(t) / SMAX \quad \dots\dots\dots (4.20)$$

No caso da variação da capacidade de infiltração e do excesso de chuva produzido durante um dado evento chuvoso, efetua-se os cálculos por sucessivos intervalos de tempo. Para cada intervalo, o valor desconhecido da variável de armazenamento, no final do intervalo, é calculado a partir de valores conhecidos das variáveis no início do intervalo e de dados iniciais de chuva durante este intervalo.

Considerando um típico intervalo de tempo ( $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ ), chega-se a seguinte expressão:

$$S_f - S_i = (q_i + q_f) \Delta t / 2 - (g_i + g_f) \Delta t / 2 \dots\dots\dots (4.21)$$

Adotando aos valores da variável no início do intervalo o subscrito *i*, aos correspondentes valores finais do intervalo o subscrito *f* e a duração do intervalo de tempo como  $\Delta t$ , têm-se os seguintes casos:

- **Caso (a)** : a intensidade da chuva é maior que a capacidade de infiltração no início e no final do intervalo de tempo:  $R > f_i$  e  $R > f_f$ . Neste caso  $q_i = f_i$  e  $q_f = f_f$ . A partir das equações 4.19 e 4.21 chega-se a:

$$S_f = [IFI \Delta t + S_i (1 - IFI \Delta t / 2 SMAX)] / (1 + IFI \Delta t / 2 SMAX) \dots\dots\dots (4.22)$$

- **Caso (b)** : a intensidade da chuva é menor que a capacidade de infiltração no início e no final do intervalo de tempo:  $R < f_i$  e  $R < f_f$ . Neste caso  $(q_i + q_f) / 2 = R$ . A partir das equações 4.21 e 4.19 chega-se a:

$$S_f = [S_i (1 - IFC \Delta t / 2 SMAX) + R \Delta t] / (1 + IFC \Delta t / 2 SMAX) \dots\dots\dots (4.23)$$

- **Caso (c)** : a intensidade da chuva é menor que a capacidade de infiltração no início do intervalo de tempo e maior que a capacidade de infiltração no final do intervalo:  $R < f_i$  e  $R > f_f$ . Nesse caso é necessário determinar  $\Delta t_1$ , que é a duração entre o início do intervalo e o momento em que ocorre a igualdade entre a intensidade de chuva e a capacidade de infiltração. O teor de

umidade do elemento de armazenamento neste instante, definido por  $S_r$ , é obtido substituindo  $f(t) = R$ . A partir das equações 4.22, com  $\Delta t_2 = \Delta t - \Delta t_1$ , e com  $\Delta t_1$  determinado pela expressão 4.24, tem-se:

$$\Delta t_1 = (S_r - S_i) / [R - (S_i + S_r) IFC / 2 SMAX] \dots\dots\dots (4.24)$$

$$S_r = (IFI - R) SMAX / (IFI - IFC) \dots\dots\dots (4.25)$$

logo

$$S_f = [IFI \Delta t_2 + S_r (1 - IFI \Delta t_2 / 2 SMAX)] / (1 + IFI \Delta t_2 / 2 SMAX) \dots\dots\dots (4.26)$$

**Diskin & Nazimov (1996)** apresentam valores estimados através da aplicação do modelo proposto para os principais parâmetros envolvidos no estudo da infiltração, valores estes relativos a diferentes tipos de solos. **Smith (1972)**, citado por **Diskin & Nazimov (1996)**, obteve pela resolução da equação diferencial de Richards para escoamento vertical em meio insaturado um conjunto de valores dos parâmetros aplicados ao estudo da infiltração utilizando-se de diferentes tipos de solo. Estes valores foram comparados aos calculados pelo modelo proposto através destes pesquisadores, resultando em pequenas diferenças de modo a não comprometer a sua validação, e indicando a boa qualidade do modelo.

### 4.3 Equação de Tan & O'Connor

**Tan & O'Connor (1995)** propõem a utilização de uma expressão empírica para o estudo do processo de infiltração aplicada a um modelo conceitual definido pelos próprios autores de SMARY que, tem como base, um modelo semelhante denominado SMAR<sup>1</sup> (Soil Moisture Accounting and Routing).

<sup>1</sup> Kachroo, R. K. (1992). Journal of Hydrology, vol 133.

Os autores justificam a utilização desta equação empírica no estudo da infiltração baseando-se no seguinte argumento: “Muitas das equações disponíveis para cálculo da infiltração não podem ser aplicadas diretamente, pois certas suposições implicam em respeitar um conjunto de circunstâncias para validar o seu uso”.

A equação proposta e incorporada no novo modelo tem origem na teoria da infiltração, como as leis de Darcy e Richards. Segundo comunicação pessoal dos próprios pesquisadores, trata-se de uma relação empírica do ponto de vista prático.

Entretanto, a redução na taxa de infiltração durante um evento chuvoso pode ser vista como reflexo não simplesmente da passagem do tempo, mas também graças ao acúmulo de água no solo, processo este que continua até o solo tornar-se saturado impondo, desta forma, a dependência do fenômeno a uma “nova” variável: a umidade do solo. A equação relacionando a infiltração ao teor de umidade do solo é apresentada e, também incorporada ao modelo de estudo LABSHI.

$$f(t) = IFC + (IFI - IFC) \exp \left[ -\alpha \left( \frac{S(t)}{SMAX - S(t)} \right) \right] \dots\dots\dots (4.27)$$

em que:

$\alpha$  : parâmetro da equação de Tan & O'Connor;

Nota-se que quando o teor de umidade do solo  $S(t)$  aproxima-se a capacidade máxima de umidade do solo  $SMAX$ , a taxa de infiltração  $f(t)$  tende para uma taxa mínima  $IFC$ , ou seja,

$$f(t) \rightarrow IFC.$$

Quando o teor de umidade do solo aproxima-se a zero, a taxa de infiltração  $f(t)$  aproxima-se ao máximo valor IFI, ou seja:

$$F(t) \rightarrow IFI \text{ a medida que } S(T) \rightarrow 0$$

Os parâmetros IFI, IFC e  $\alpha$  da equação 4.27 são inicialmente desconhecidos e devem ser estimados. O coeficiente  $\alpha$  é dependente das características do solo e sua estimativa, assim como os demais parâmetros pode ser feita pela aplicação do modelo de estudo à dados observados, conforme sugestão dos autores.

# 5

## Valores de Parâmetros Referenciados na Literatura Técnica

---

Definido como o movimento de entrada de água através da superfície do solo, o processo de infiltração afeta tanto as condições de umidade do solo quanto o escoamento superficial em uma bacia hidrográfica, desempenhando papel fundamental no ciclo hidrológico.

No caso de modelos chuva-deflúvio, e especialmente na simulação de bacias de pequeno porte, a infiltração assume uma importância chave atuando como separador entre os escoamentos lento e rápido.

Devido à complexidade das relações que regem o escoamento da água através do solo, bem como a sua heterogeneidade, de um modo geral, a simulação do fenômeno de infiltração em certos modelos é realizada através da aplicação de expressões empíricas, muitas vezes envolvendo parâmetros sem claro significado físico e, portanto, difícil capacidade de medição. Para facilitar a aplicação destes modelos no estudo do fenômeno da infiltração, busca-se, na literatura técnica, valores obtidos através de análises das características do solo diante de certas condições, auxiliando a uma melhor estimativa inicial dos parâmetros envolvidos no processo e sobretudo na aplicação de modelos chuva-deflúvio.

É possível de se encontrar um bom sumário desses resultados nos principais textos técnicos, sendo apresentadas algumas tabelas neste capítulo. Na tabela 5.1 são dados valores médios obtidos através de análises laboratoriais para várias localidades dos Estados Unidos, segundo citações de **Ferguson (1994)**, à vários horizontes e perfis de solos. Observa-se que nas

tabelas apresentou-se o termo original em inglês e, apenas para auxiliar, indicou-se na sua base o significado dos termos somente usados.

Tabela 5.1 – Parâmetros do modelo de Green & Ampt (porosidade efetiva, profundidade da frente úmida ( $l_w$ ) e condutividade hidráulica saturada(KHS)) \*

Classe do solo	Porosidade efetiva ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ )	$l_w$ (cm)	KHS (mm/h)
Areia	0.417 (0.345-0.480)	4.95 (0.97-25.36)	210.0
Areia franca	0.401 (0.329-0.473)	6.13 (1.35-27.94)	61.1
Franco arenoso	0.412 (0.283-0.541)	11.01 (2.67-45.47)	25.9
Franco	0.434 (0.334-0.534)	8.89 (1.33-59.38)	13.2
Franco siltoso	0.486 (0.394-0.578)	16.68 (2.92-95.39)	6.8
Franco argilo arenoso	0.330 (0.235-0.425)	21.85 (4.42-108.00)	4.3
Franco argiloso	0.309 (0.279-0.501)	20.88 (4.79-91.10)	2.3
Franco argilo siltoso	0.432 (0.347-0.517)	27.3 (5.67-131.50)	1.5
Argila arenosa	0.321 (0.207-0.435)	23.9 (4.08-140.2)	1.2
Argila siltosa	0.423 (0.334-0.512)	29.22 (6.13-139.40)	0.9
Argila	0.385 (0.269-0.501)	31.63 (6.39-156.5)	0.6

obs: Os valores entre parênteses representam o desvio padrão em relação a média.

\* Raws, Brakensiek e Miller (1983); Raws, Brakensiek e Saxton (1982) apud Ferguson (1994).

Os solos descritos na tabela 5.1 são bem específicos para aplicação, isto porque é comum a utilização de classificações bem mais simplificadas no dia a dia. Na maioria das vezes muito pouco se sabe a respeito das características de um solo local, e induz-se ao erro de classifica-los apenas dentro do universo das argilas, areias e siltes. Define-se argila como material fino que é mais ou menos plástico, quando úmido. Manifesta propriedades coloidais classificadas, segundo classificações de textura e frações do solo. Silte ou limo é o material inorgânico de partículas finas, classificado segundo classificações de textura e frações do solo. Areia também é um material de partículas finas, facilmente reconhecível a olho nu, que resulta da desagregação natural de rochas. Porém, o que se nota ao observar a tabela anterior é que os solos apresentam subdivisões que classificam-no como mistura de argilas, siltes e areias. A fim de um melhor entendimento destas sub-divisões é apresentada a figura 5.1 originária do Departamento da Agricultura dos Estados Unidos, conforme apresentado por **Wanielista, Kersten e Eaglin (1997)**.

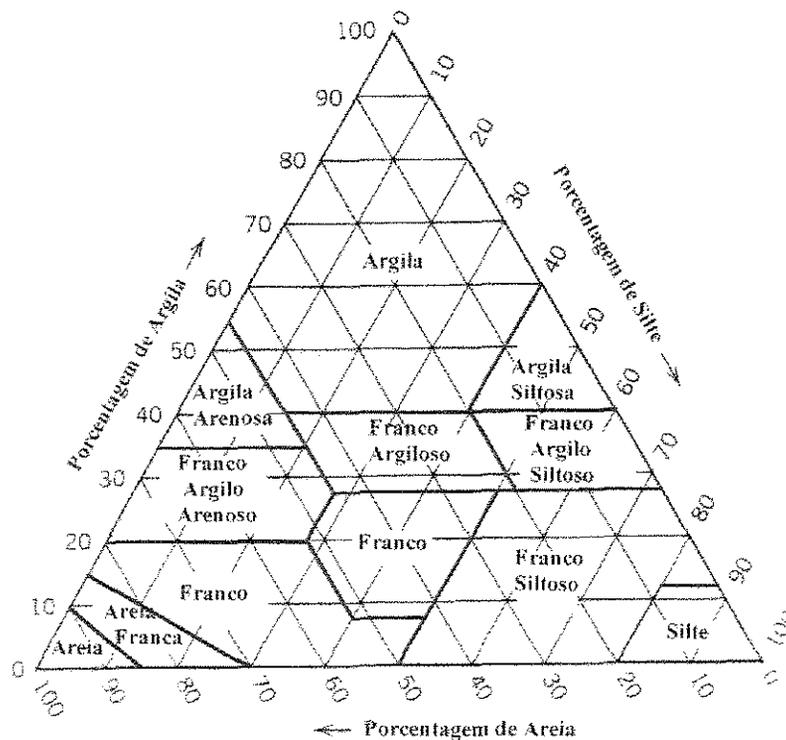


Figura 5.1 – Triângulo de classificação do solo (USDA, 1951)

(fonte: **Wanielista, Kersten e Eaglin, 1997**)

**Setzer e Porto (1979)**, em texto técnico denominado “ *Tentativa de avaliação do escoamento superficial de acordo com o solo e seu recobrimento vegetal nas condições do estado de São Paulo* ” demonstram suas insatisfações as denominações dadas aos solos brasileiros, isto porque da ocorrência da pura transplantação dos famosos nomes mundiais para o nosso uso regional. Antes mesmo da adoção dos valores de parâmetros determinados em estudos e apresentados nas literatura técnica, deve-se levantar as características do solo local, porém, quando isto não é possível é aconselhável o seu uso, desde que se tenha uma clara noção das possíveis diferenças entre estes solos.

É interessante citar um estudo desenvolvido por **Simões e Magalhães (1991)** na estimação dos parâmetros da equação de infiltração de Green & Ampt a partir das curvas de retenção do solo através dos modelos de regressão de Raws, Brakensiek e Saxton. O importante neste caso é verificar a aplicabilidade destes modelos de regressão a solos brasileiros. Análise de 14 perfis, correspondentes a 41 horizontes, representativos de solos do norte de Minas Gerais foram levantadas, comparando-se as curvas de retenção determinadas por ensaios de laboratório com as estimadas através desses modelos. Os parâmetros estimados por Simões e Magalhães são apresentados na tabela 5.2 e 5.3.

Tabela 5.2 – Estimação da condutividade hidráulica saturada (KHS) para a equação de Green & Ampt .

Solo	KHS <sup>1</sup> (mm/h)	KHS <sup>2</sup> (mm/h)
Areia	123.80	75.70
Franco arenoso	50.04	28.70
Franco	13.12	6.11
Franco siltoso	1.051	5.58
Argila	0.443	0.685

<sup>1</sup> Valores utilizados por **Mein e Larson (1971)** apud **Simões e Magalhães (1991)**.

<sup>2</sup> Valores calculados por **Simões e Magalhães (1991)** a partir da metodologia propostas pelos autores.

Tabela 5.3 – Estimação da capilaridade (SUC) para a equação de Green &amp; Ampt.

Solo	SUC (mm)	SUC (mm)
Areia	117.30	110
Franco arenoso	238.3	198
Franco	313.8	284
Franco siltoso	74.3	63.4
Argila	223.6	260

A tabela 5.4 apresenta valores do parâmetro KHS, segundo o tipo de solo conforme exposto por **Risse, Nearing e Zhang (1995)**.

Tabela 5.4 – Valores médios de condutividade hidráulica saturada (KHS) para diferentes localidades dos Estados Unidos \*

Local	Solo	Areia (%)	Argila (%)	Material org. (%)	KHS (mm/h)
Bethany, MO	Franco siltoso	27.8	29.0	3.03	1.22
Castana, IA	Franco siltoso	7.10	23.5	2.00	2.04
Geneva, NY	Franco	44.2	14.9	4.50	2.27
Guthrie, OK	Franco arenoso fino	73.2	7.90	1.60	6.19
Holly Springs, MS	Franco siltoso	2.00	19.8	0.81	0.31
Madison, SD	Franco argilo siltoso	7.00	32.2	3.70	1.80
Morris, MN	Franco	39.4	23.2	3.37	7.68
Pendleton, OR	Franco siltoso	28.0	23.0	4.30	0.51
Presque Isle, ME	Franco siltoso	38.8	13.7	3.76	2.38
Tifton, GA	Franco arenoso	87.0	5.70	0.70	7.78
Watkinsville, GA	Argila arenosa	66.5	19.6	0.89	4.41

\* Risse, Nearing e Zhang (1995).

Risse, Nearing e Zhang analisaram a variabilidade da condutividade hidráulica saturada (KHS) sobre diferentes condições de solo, em 11 localidades dos Estados Unidos e apresentam valores médios calibrados com o uso do modelo chuva-deflúvio WEPP.

Tan & O'Connor apresentam valores de parâmetros determinados com o uso do modelo SMARY para quatro localidades com condições climáticas bem diferenciadas, proporcionando uma nova ferramenta no estudo da infiltração. As estimativas da capacidade mínima de infiltração (IFC) são apresentada na tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Valores de capacidade mínima de infiltração (IFC) estimados pelo modelo SMARY.

Localidade	Pais	Topografia	Vegetação	Clima	IFC (mm/h)
Ihimbu	Tanzânia	Acidentada	Mista	Semi-árido	1.394
Wolombi	Austrália	Mista	Floresta e pasto	Árido	1.198
Kizu	Japão	Acidentada	Floresta	Úmido	0.947
Qingjiang	China	Acidentada	Mista	Úmido	0.991

Dados sintéticos também são utilizados na estimativa de parâmetros diante da inexistência de uma série histórica. Smith <sup>1</sup> obteve valores relacionados ao processo de infiltração, ao utilizar-se da equação diferencial para meios insaturados de Richards. Estes dados foram base para avaliação do modelo proposto por Diskin & Nazimov, sendo apresentados na tabela 5.6.

<sup>1</sup> Smith, R. E. (1972) apud Diskin & Nazimov (1996).

Tabela 5.6 – Valores de capacidade mínima de infiltração (IFC), capacidade máxima de infiltração (IFI) e capacidade máxima de umidade do solo (SMAX) otimizados através do modelo de Diskin & Nazimov .

Solo	IFC (mm/h)	IFI (mm/h)	SMAX (mm)
Areia	83.82	660	42.5
Franco arenoso	16.02	174	11.9
Franco siltoso	5.10	204	8.0
Argila	5.70	204	13.9

Os valores apresentados nesta seção são úteis nas simulações iniciais de modelos tipo chuva-deflúvio e foram adotados como valores primários no modelo de trabalho, embora apresentem uma grande variação.

Na maioria das vezes, a busca do valor de parâmetros em literatura técnica visa auxiliar o usuário na melhor adoção para a sua estimativa. Contudo é necessário ter em mente da possibilidade de encontro de uma grande quantidade de valores bem diferenciados. Nota-se essa situação, por exemplo, na tabela 5.1 ao parâmetro KHS, que varia de 0.6 mm/h a 210 mm/h. É importante citar que diferentes tipos de solos caracterizadas a certas considerações geram diferenças entre os parâmetros. Portanto deve-se ter senso crítico quando na sua utilização, buscando informações complementares que auxiliem a escolha de forma sensata e correta.

Há também casos de alterações em seus valores para um mesmo parâmetro quando avaliado dentro de uma característica. Isso é notada para o solo do tipo “franco siltoso “ apresentado nas tabelas 5.1, 5.2 e 5.4.

O valor do parâmetro KHS para a tabela 5.1 e 5.2 o valor permanece na faixa de 5.58 a 6.8 mm/h, enquanto que na tabela 5.4 o valor encontrado varia de 0.31 mm/h a 2.04 mm/h. É difícil julgar o porque de tanta diferença, levando-se em conta a influência dos diferentes tipos de

solos o que se nota é que, na maioria dos textos técnicos poucas informações são apresentadas indicando a origem destes valores, a forma de determinação e quais intervalos de tempo (diário ou horário) foram utilizados como intervalo base na sua obtenção, e para quais intervalos podem ser aplicados, já que para situações de intervalo de estudo, sejam eles diários ou horários, os valores desses parâmetros são bastante diferenciados.

A adoção de valores referenciados na literatura técnica é útil e sempre será a medida não se tenha outras fontes alternativas de busca. É válida a adoção assim como é válida a reflexão sobre os pontos de vista aqui abordados.

# 6 Metodologia

---

## 6.1 Apresentação do Modelo LABSHI

Sabe-se que uma das formas de determinação da infiltração é dada através da aplicação de equações relacionadas a este processo. No entanto, as equações de infiltração incluem parâmetros para as quais não há medições diretas. Em vista desse fato, a metodologia de trabalho consiste no cálculo da infiltração pelos três métodos apresentados, inseridos em um modelo chuva deflúvio, determinando-se os parâmetros envolvidos no estudo do fenômeno de infiltração a cada um deles pelo ajuste entre valores de vazões observadas e vazões calculadas. Para aplicação desta metodologia utilizou-se como ferramenta o modelo LABSHI.

O modelo de estudo LABSHI (Laboratório de Simulação Hidrológica) foi desenvolvido pelo prof. Dr. Valter Hernandez (1998) no Departamento de Recursos Hídricos da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP. Este modelo é aplicado no estudo da infiltração a duas bacias do estado de São Paulo utilizando informações obtidas de séries históricas de chuva e vazão das localidades pertencentes a essas bacias.

Este programa foi desenvolvido para aplicação em microcomputadores, incorpora em suas sub-rotinas módulos específicos definidos de sub-programas responsáveis pelo cálculo da infiltração através de diferentes expressões, mantendo sobretudo, características que o classifica como um modelo do tipo chuva-deflúvio ”.

Para a utilização do modelo LABSHI no início do processamento é necessário que o usuário defina algumas “prioridades”, ou seja, certifique-se da existência de arquivos de dados de chuva e vazão compatíveis ao período desejado a simular, além de respeitar algumas particularidades próprias do modelo.

## 6.2 Descrição Conceitual do Modelo LABSHI

O modelo LABSHI foi desenvolvido com o intuito de representar, de maneira simplificada, o sistema físico da bacia através de dois reservatórios, ou seja, um reservatório de detenção superficial definido de V1 e outro subterrâneo definido de V2.

Os dados hidrológicos de entrada utilizados no programa tratam de valores de chuvas e totais mensais de evaporação. A chuva constitui-se de um conjunto de série de chuvas horárias e diárias associadas a um padrão de distribuição horária em postos pluviométricos, as quais cobrem o período a simular, enquanto que a evaporação é estabelecida através de um conjunto de 12 valores mensais que representam o padrão de evaporação médio nas localidades analisadas.

Observações de precipitações em uma bacia permitem determinar um padrão característico de distribuição dessa chuva. Essa distribuição é importante e foi considerada no estudo, sendo então obtida através da utilização de um programa auxiliar denominado de *Temporal*.

O principal objetivo do *programa Temporal* é traçar curvas de distribuição da chuva no tempo e definir curvas médias relativas a uma dada duração de chuva. O trabalho com vários eventos independentes permite o traçado da curva de distribuição de cada evento e o gráfico médio de vários eventos conforme seleção feita pelo usuário. Cada evento constitui-se de um conjunto discreto de pares de valores tempo-chuva, relativo a uma dada precipitação observada.

Os processos representados no modelo LABSHI são caracterizados através de um conjunto de equações e regras descritas a seguir. Cada etapa é desenvolvida e estipulada para que, no final do processamento, tenha-se a geração dos dados de saída procurados pelo usuário.

A chuva média na bacia ( $P_m$ ) é determinada para cada intervalo de tempo pelo modelo a partir de chuvas  $P_i$  no conjunto de postos existentes através da seguinte expressão:

$$P_m = (P_1 W_1 + P_2 W_2 + \dots + P_n W_n) / n_p \dots\dots\dots (6.1)$$

em que:

- $n_p$  : número de postos com dados no intervalo;
- $W_i$  : coeficiente do posto  $i$ .

Com isto não é necessário que todos os postos tenham a série completa. Caso ocorra um período a algum posto cuja ausência de dados esteja evidente, ele é automaticamente descartado. Os coeficientes são calculados através de relações médias da seguinte forma:

$$W_i = \frac{P_{mb}}{P_{mi}} \dots\dots\dots (6.2)$$

em que:

- $P_{mb}$ : chuva média de longo período na bacia;
- $P_{mi}$  : chuva média de longo período no posto  $i$ .

O coeficiente de cada posto é necessário na opção de cálculo da chuva média para o período atual de trabalho. Com séries de longos períodos determinam-se os valores de  $P_{mi}$  e, através do método das isoietas, determina-se  $P_{mb}$ .

A cada hora é realizado o cálculo da infiltração para o reservatório subterrâneo V2 de acordo com a chuva no período, com o volume no reservatório superficial V1 e com as características do solo.

O modelo faz o balanço do reservatório V1, considerando as perdas pela evaporação, infiltração e escoamento superficial. O balanço do reservatório V2 é feito considerando a infiltração, as perdas pela evapotranspiração e escoamentos sub-superficial e subterrâneo, decorrendo daí as condições iniciais para o intervalo seguinte.

Cada uma das três parcelas de escoamento é submetida a seguir a um processo de amortecimento em reservatórios lineares até atingirem o canal do rio. Ao longo do rio, há um outro processo de encaminhamento das vazões através de reservatórios lineares. Desta forma, é possível diferenciarmos duas fases: Fase Bacia e Fase Fluvial ou Canal.

#### **- Fase Bacia**

Constituída pelos reservatórios superficiais e subterrâneos. Suas características, assim como relações com os processos hidrológicos são apresentadas de forma simplificada.

**Reservatório de retenção superficial V1:** A chuva caída é retida inicialmente em um reservatório de retenção superficial, podendo seguir um dos três caminhos: evaporação, infiltração ou escoamento superficial.

A evaporação na superfície do reservatório, é representada pela expressão 6.3.

$$ETIS = ETI \times EVASUP \dots\dots\dots (6.3)$$

em que:

ETI : altura evaporada obtida de dados de tanque classe A;

EVASUP: fator de correção das condições de tanque para as condições de superfície livre natural.

A infiltração é calculada através de diferentes expressões conforme apresentada no capítulo 4 - *Análise das Equações e Modelos de Infiltração*.

O escoamento superficial, definido por QSI, é obtido pela expressão 6.4.

$$QSI = KSUP \times V1^{NSUP} \dots\dots\dots (6.4)$$

em que:

KSUP, NSUP: coeficientes relativos ao escoamento superficial;

V1 : volume estocado no reservatório de detenção superficial.

**Reservatório subterrâneo V2:** A parcela infiltrada é recebida em um reservatório subterrâneo, podendo então seguir um dos três caminhos: evapotranspiração, escoamento sub-superficial ou escoamento subterrâneo.

A evapotranspiração ETP, é representada no modelo LABSHI pela expressão 6.5.

$$ETP = ETI \times EVASOL \dots\dots\dots (6.5)$$

em que:

ETI : altura evaporada obtida de dados de tanque classe A;

EVASOL: fator de correção de condições de tanque para condições de subsolo.

Deve-se salientar que os fatores relacionados a evaporação representam todas as perdas ocorridas no meio.

O escoamento sub-superficial denominado de QTI é obtido pela expressão 6.6.

$$QTI = KST \times V2^{KSSP} \dots\dots\dots (6.6)$$

em que:

- KST, KSSP: coeficientes relativos ao escoamento sub-superficial;
- V2 : volume no reservatório subterrâneo.

O escoamento subterrâneo definido de QBI é dado pela expressão 6.7.

$$QBI = KSB \times V2^{NSUB} \dots\dots\dots (6.7)$$

em que:

- KSB e NSUB: coeficientes relativos ao escoamento subterrâneo.

Cada uma das três parcelas de escoamento, QBI, QTI e QSI é submetida a um processo de amortecimento em uma série de reservatórios lineares, cujo número e tempo de detenção para cada componente são parte do processo de calibragem. Estes parâmetros são os que definem a hidrógrafa no que condiz à sua forma e a sua defasagem em relação às chuvas caídas.

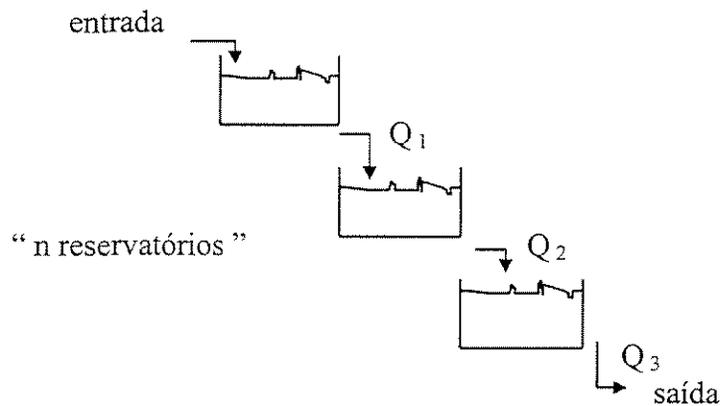


Figura 6.1 - Representação conceitual do processo de amortecimento na fase bacina.

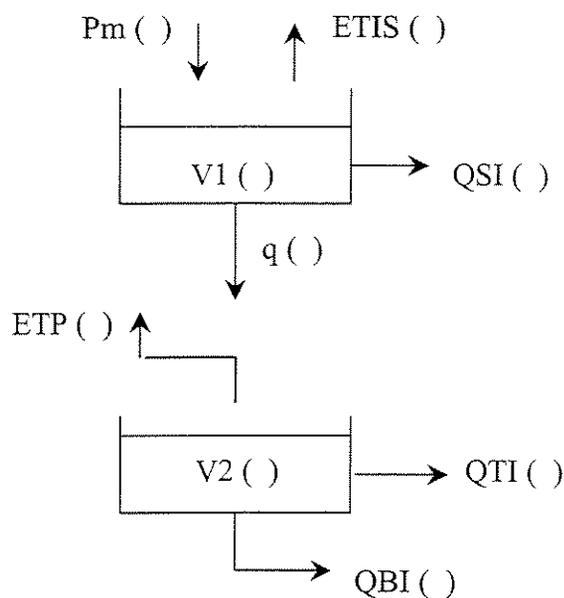
Em cada reservatório, o processo de amortecimento é feito utilizando, além da equação da continuidade, a equação 6.8 que representa um reservatório linear.

$$S = T_s \times O \dots\dots\dots (6.8)$$

em que:

- S : volume estocado (mm);  
 T<sub>s</sub>: tempo de detenção (h);  
 O : escoamento (mm/h).

Observar que todos os valores do escoamento são inicialmente expressos em mm. Posteriormente, serão expressos em vazão propriamente dita com base na área de drenagem da bacia e no intervalo de tempo utilizado. Desta forma, o modelo determina a vazão total que a cada dia aflui à saída da sub-bacia. Ela é obtida pela soma das três parcelas contribuintes, cada uma delas resultante de um processo próprio de amortecimento. A figura 6.2 apresenta, de maneira simplificada, a fase bacia presente no modelo LABSHI.



em que:

- P<sub>m</sub> : chuva média na bacia  
 ETIS : evaporação  
 V1 : reservatório superficial  
 QSI : escoamento superficial  
 q : infiltração  
 ETP : evapotranspiração  
 V2 : reservatório subterrâneo  
 QT : escoamento sub-superficial  
 QBI : escoamento subterrâneo

Figura 6.2 - Esquema físico da fase bacia no modelo chuva-deflúvio LABSHI.

## - Fase Fluvial

Após definida a hidrógrafa produzida pela sub-bacia hidrográfica, ela é submetida ao processo de propagação ao longo do leito do rio.

De uma forma semelhante ao que se faz para amortecer os componentes da vazão nas sub-bacias, o modelo representa cada trecho do rio através de uma série de reservatórios iguais, caracterizados pela sua capacidade de reservação, ou seja, por uma lei que relaciona tempo de detenção e descarga efluente. O modelo permite que o usuário defina de início o número de reservatórios em cada processamento efetuado.

Nesse caso, para cada trecho do rio, além do número de reservatórios, o outro parâmetro - tempo de detenção é obtido a partir de outros dois parâmetros, KTS e  $nc$ . Para melhor calibragem, o modelo considera a função de amortecimento como dependente também da própria vazão do canal, utilizando a expressão 6.9.

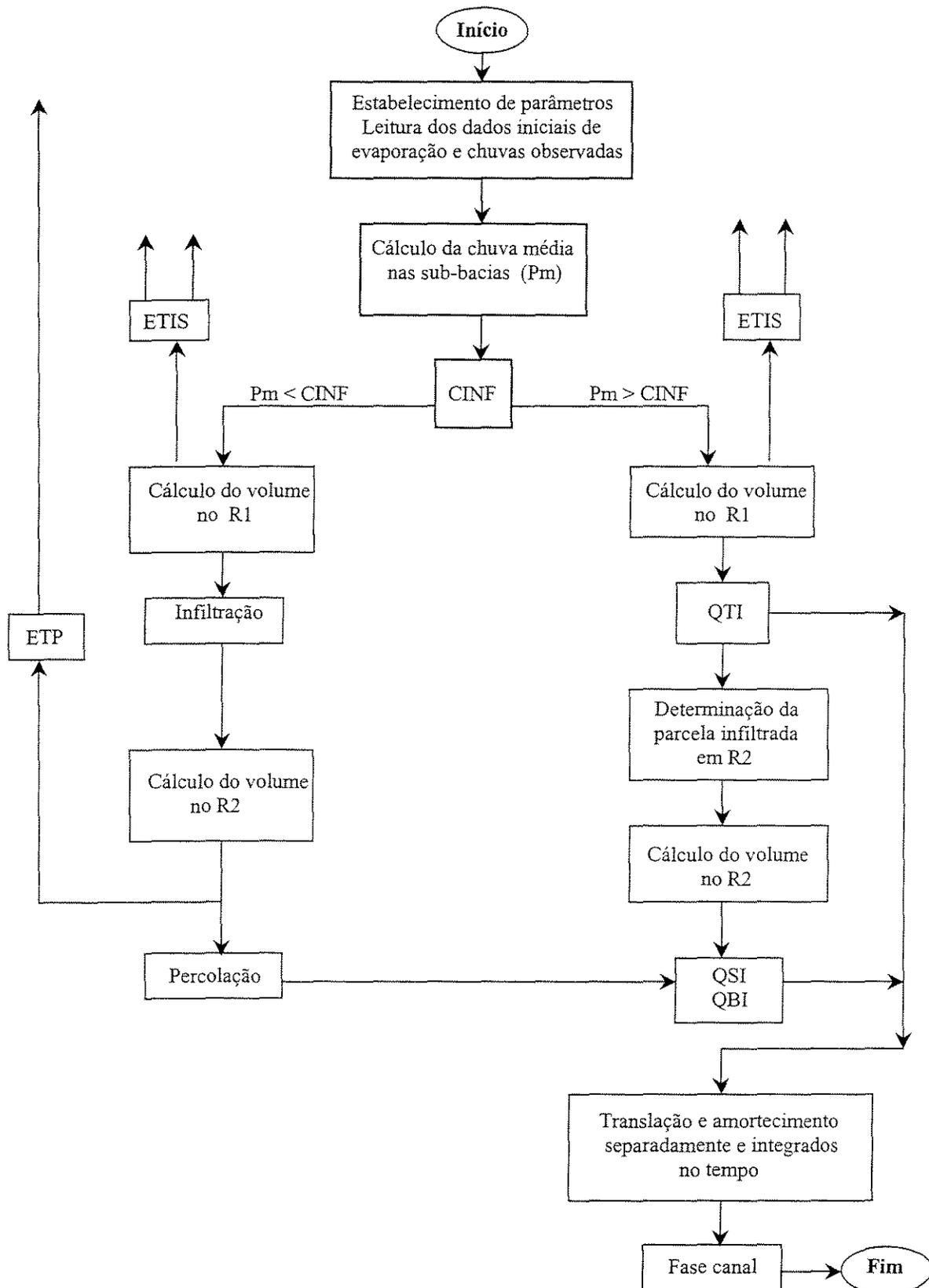
$$T_s = KTS / QCI^{nc} \dots\dots\dots (6.9)$$

em que:

- KTS: parâmetro do modelo LABSHI;
- QCI : vazão no trecho do canal;
- $nc$  : parâmetro do modelo LABSHI.

Os parâmetros relativos ao modelo de trabalho envolvendo tempo de acumulação e fases nas sub-bacias, coeficientes e fases dos trechos são adotados pelo usuário. O modelo permite essa opção justamente para que, diante de um resultado gerado num processamento, este possa ser modificado e, dessa forma, reproduzir com maior fidelidade o fenômeno estudado.

### 6.3 Fluxograma Simplificado do Modelo LABSHI



# 7

## Características Gerais das Bacias de Estudo

O modelo LABSHI foi aplicado a três localidades do Estado de São Paulo.

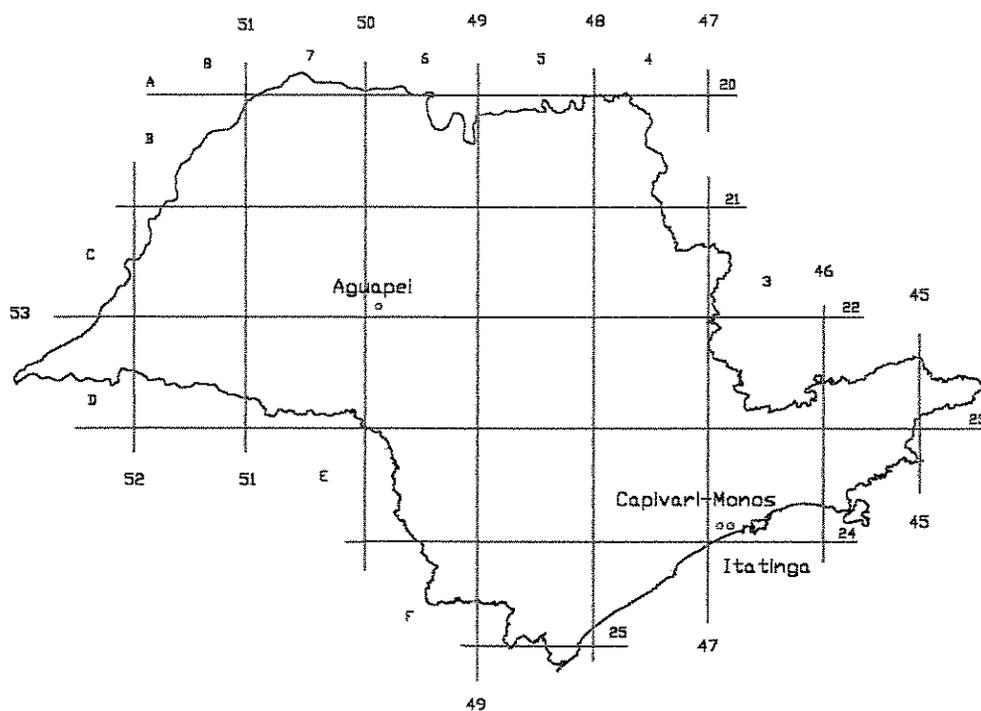


Figura 7.1\* – Localização das bacias do Aguapei, Capivari-Monos e Itatinga no estado.

Estas bacias foram escolhidas devido basicamente à diversidade de características entre elas. A primeira de maior tamanho situada em regiões de chuvas mais uniformes e maior ocupação de solo, podendo analisa-la dentro de uma escala de tempo diária. As demais, em

\* Indicação das bacias de estudo no Estado de São Paulo – sem escala.

contrapartida, são pequenas, em região de chuvas intensas e cobertura de floresta. Há disponibilidade de dados em ambas embora limitados, mas representando a disponibilidade de dados que se tem no estado.

**Bacia do Aguapei** – Bacia hidrográfica com área de 1196 Km<sup>2</sup> localizada na porção centro-oeste do Estado de São Paulo entre as latitudes de 21° 40'a 22° 20' e longitudes de 49° 25'a 49° 50'. Pertencente à Bacia Sedimentar do Paraná e delimitada na unidade geomorfológica do Planalto Centro Ocidental.

Tem como modelados dominantes colinas amplas e baixas, uma altimetria variando de 400 a 700 metros e as declividades médias predominantes das vertentes estão entre 2% e 10% tudo indicando para uma topografia relativamente suave. De acordo com **Ross e Moroz (1997)** a litologia desta unidade é basicamente formada por arenitos, siltitos e argilitos com solos dos tipos Latossolo Vermelho-amarelo que ocorrem de modo generalizado e Podzólico Vermelho-amarelo que aparecem com maior frequência nas vertentes mais inclinadas. Tanto um quanto o outro são de textura média à arenosa.

Por apresentar forma de dissecação baixa e vales pouco entalhados e com densidade de drenagem baixa, esta unidade apresenta um nível de fragilidade potencial baixo, nos setores aplanados dos topos das colinas, entretanto face às características texturais dos solos, os setores de vertentes pouco mais inclinados são extremamente susceptíveis aos processos erosivos, principalmente quando de desenvolvem escoamentos concentrados.

A região apresenta totais anuais médios de longo período da ordem de 1300 mm. A ocupação principal do solo é de vegetação rasteira, principalmente campo e com raras áreas de mata natural. Complementando este conhecimento, procurou-se uma informação mais direta das características destas localidades. Para isso foi feita uma consulta ao trabalho de **Setzer e Porto (1979)** para o Estado de São Paulo.

Utilizando a classificação hidrológica apresentada por estes autores é possível estabelecer o tipo predominante, já que a bacia tem suas coordenadas conhecidas. A classificação da bacia do Aguapei restringe-se a Zona Ecológica Arenito Bauru (solo n<sup>o</sup> 1) e apresenta em média 65% de solo do grupo A, 30% do grupo B e 5% de solo do grupo C. Os cinco grupos de solos avaliam um ponto de partida nos estudos hidrológicos proporcionando uma gama de informações que até então, baseado no mapa geomorfológico do Estado de São Paulo não se tem em detalhes pormenores. Estes grupos, conforme descritos pelos autores citados, são apresentados ao leitor para facilitar o entendimento da escolha feita.

**grupo A** - solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a uns 8%, não havendo rochas nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5 metro. O teor de humus é muito baixo, não atingindo 1%.

**grupo B** - solos arenosos menos profundos que os do grupo A e com maior teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. Não existem pedras e nem camadas argilosas até 1,5 metro, mas é quase sempre presente camada mais densificada que a camada superficial.

**grupo C** - solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1,2 metro. No caso de terras roxas estes dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5 metro. Nota-se que a cerca de 0,6 metros de profundidade camada mais densificada que no grupo B mas ainda longe das condições de impermeabilidade.

**Grupo D** – solos argilosos (30 a 40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 0,5 metros de profundidade, ou solos arenosos como B, mas com camada argilosa quase impermeável.

**Grupo E** – solos barrentos como C, mas com camada argilosa impermeável ou com pedras ou sem tal camada, mas o teor total de argila supera 40%.

A avaliação obtida por Setzer e Porto é bem semelhante em alguns aspectos as informações obtidas do mapa geomorfológico do Estado de São Paulo de autoria de Ross e Moroz. É um esforço no sentido de melhor conhecer o solo e com aplicação direta as bacias do estado.

Para se ter um conhecimento da distribuição temporal das chuvas nesta região, foi realizado uma análise através do programa Temporal com aplicação de dados de enchentes observados nos postos pluviográficos C6-015, C6-023 e C7-074 que localizam-se nas proximidades da área de estudo. Verificou-se a ocorrência de uma distribuição não uniforme, sendo adotada no estudo conforme descrito no capítulo 8, item 8.1. Dos postos disponíveis na região da bacia do Aguapei, foram utilizadas informações de 13 postos, sendo estes indicados na tabela 7.1. A tabela 7.2 indica os padrões de evaporação – totais mensais na bacia.

Tabela 7.1 – Relação de postos pertencentes a bacia do Aguapei utilizados no estudo.

<b>Prefixo</b>	<b>Entidade</b>	<b>Tipo</b>
D6-019	DAEE	Pluviômetro
D6-018	DAEE	Pluviômetro
D6-099	DAEE	Pluviômetro
D6-097	DAEE	Pluviômetro
D6-059	DAEE	Pluviômetro
D6-093	DAEE	Pluviômetro
D6-086	DAEE	Pluviômetro
C6-103	DAEE	Pluviômetro
C6-002	DAEE	Pluviômetro
C6-051	DAEE	Pluviômetro
C6-017	DAEE	Pluviógrafo
C6-023	DAEE	Pluviômetro
C6-078	DAEE	Pluviômetro

Tabela 7.2 – Padrão de evaporação - totais mensais (mm) da bacia do Aguapei.

Mês/total	Mês/total	Mês/total
JAN 100	FEV 90	MAR 95
ABR 86	MAI 75	JUN 69
JUL 76	AGO 100	SET 110
OUT 117	NOV 112	DEZ 105

**Bacias dos rios Capivari-Monos e Itatinga** - Bacias hidrográfica de 95,1 Km<sup>2</sup> e 98,76 Km<sup>2</sup>, localizadas na região da Serra do Mar, no Estado de São Paulo, Vertente Atlântica, entre as latitudes 23° 50' a 24° e longitudes de 46° 35' a 46° 50'.

Pertencem ao Cinturão Orogênico do Atlântico – Planalto Paulistano Alto Tietê. Nesta unidade predominam formas de relevo constituído basicamente em morros médios e altos. As altimetrias predominantes estão entre 800 e 1000 metros e as declividades dominantes são entre 10% a 20%.

Sua litologia é basicamente constituída por migmatitos e granitos e os solos são do tipo Podzólico Vermelho-amarelo e Cambissolos, apresentando horizonte raso. Por ser uma unidade de relevo com formas de dissecação média a alta, vales entalhados e densidade de drenagem média a alta, estas áreas apresentam níveis de fragilidade potencial médio, estando, portanto, sujeitas a formação de atividades erosivas e probabilidades de ocorrência de movimentos de massa. A região é extremamente chuvosa com totais anuais médios de longo período da ordem de 2000 a 3500 mm.

A ocupação principal do solo é de floresta com vegetação densa sendo consideradas áreas de proteção ambiental. Na consulta ao trabalho idealizado por Setzer e Porto para o Estado de São Paulo e utilizando-se da classificação hidrológica apresentada é possível estabelecer o tipo

de solo predominante, já que as bacias tem suas coordenadas conhecidas. Classificada na Zona Ecológica Complexo Cristalino (solo n<sup>o</sup> 29) apresentam 25% de solo do grupo A, 30% do grupo B, 15% do grupo C, 20% do grupo D e 30% do grupo E.

Os cinco grupos de solos sugerem um ponto de partida nos estudos hidrológicos. A avaliação propiciada por Setzer e Porto diferencia em alguns aspectos as informações extraídas do mapa geomorfológico do Estado de São Paulo de autoria de Ross e Moroz.

É interessante salientar que apesar destas divergências tal classificação torna-se válida, afinal estas bacias produzem húmus graças a sua condição de floresta contribuindo para o aumento da capacidade de retenção hídrica de seu solo arenoso embora raso, e sua cobertura vegetal tende a reter as águas dando melhores condições de infiltração embora a topografia acidentada e a rocha cristalina próxima favoreçam o escoamento.

A análise de eventos para essas bacias baseou-se, a princípio, em enchentes ocorridas em períodos diferenciados. Os eventos selecionados para a bacia do rio Capivari-Monos, assim como as chuvas diárias do posto Evangelista de Souza (posto base) e taxa de evaporação são apresentadas na tabela 7.3. O posto base encontra-se na bacia e através do valor da chuva diária referente a cada evento é corrigida a distribuição horária da chuva aos outros dois postos pluviográficos localizados nas proximidades da área de estudo. Esta correlação entre valores de chuva diária do posto base e valores de chuvas horárias dos postos utilizados é apresentada no capítulo 8, item 8.1.

Tabela 7.3 – Eventos selecionados, chuvas diárias do posto pluviométrico Evangelista de Souza (mm) e evaporação – totais diários (mm/dia) para a bacia do rio Capivari-Monos.

<b>Enchente: março de 1978</b>								<b>evaporação: 2,00</b>	
Dias	4	5	6	7	8	9	10	11	
Chuva	22,2	38,5	32,3	27,5	26,5	100,1	55,6	7,0	
<b>Enchente: janeiro de 1976</b>								<b>evaporação: 2,77</b>	
Dias	27	28	29	30	31				
Chuva	4,1	138,5	164,2	65,1	0,3				
<b>Enchente: novembro de 1979</b>								<b>evaporação: 2,65</b>	
Dias	9	10	11	12					
Chuva	28,5	42,7	62,6	2,6					
<b>Enchente: fevereiro de 1980</b>								<b>evaporação: 4,03</b>	
Dias	17	18	19	20	21				
Chuva	8,7	12,8	8,2	500	0,6				
<b>Enchente: abril de 1981</b>								<b>evaporação: 2,07</b>	
Dias	15	16	17	18	19				
Chuva	0,1	17,6	143	41,6	4,6				
<b>Enchente: fevereiro de 1983</b>								<b>evaporação: 4,03</b>	
Dias	1	2	3	4	5				
Chuva	136,1	72,1	12,1	23,3	0,6				

Os eventos selecionados para a outra bacia dessa região – bacia do rio Itatinga, assim como as chuvas diárias do posto pluviográfico E3-42 (posto base) e taxa de evaporação, coletadas do posto Casagrande são apresentadas na tabela 7.4.

Tabela 7.4 – Eventos selecionados, chuvas diárias do posto pluviométrico da Companhia Docas (mm) e evaporação – totais diários (mm/dia) para a bacia do rio Itatinga.

<b>Enchente: dezembro de 1986</b>								<b>evaporação: 2,17</b>
Dias	13	14	15	16	17	18	19	20
Chuva	0,0	0,1	9,3	68,4	45,3	30,4	6,3	0,2
<b>Enchente: março de 1987</b>								<b>evaporação: 2,00</b>
Dias	13	14	15	16	17			
Chuva	0,0	0,1	9,3	68,4	45,3			
<b>Enchente: fevereiro de 1988</b>								<b>evaporação: 4,03</b>
Dias	18	19	20	21				
Chuva	16,3	4,7	124,2	171,7				

# 8

## Resultados

---

### 8.1 Período de Estudo no Modelo de Trabalho

A realização de um estudo comparativo do comportamento dos parâmetros representativos do processo de infiltração é trabalhoso, sobretudo no caso de análises como as desenvolvidas e apresentadas neste trabalho. Primeiro, pelo fato da realização do estudo à localidades com diferentes particularidades, segundo devido a utilização de um modelo do tipo chuva-deflúvio que utiliza-se de relações calibráveis envolvendo variáveis e parâmetros na geração de respostas e por último, a obtenção de dados de chuva e vazão embora limitados mas representando a disponibilidade desse tipo de informação no estado.

Nas bacias hidrográficas estudadas notam-se diversidades quanto a área, cobertura vegetal e principalmente ocorrência diferenciada de precipitações. Nesse caso foi necessário analisar o processo de infiltração dentro de duas escalas de tempo: diária para a bacia do Aguapei e horária para as bacias dos rios Capivari-Monos e Itatinga. Para a bacia do Aguapei foram obtidos 15 anos de dados observados (73/81 e 90/95). Esses dados foram então tomados, no início do processamento, como o período base para o desenvolvimento da pesquisa. Verificou-se entretanto falta de dados entre 1982 e 1989. Tomando períodos compreendidos de 2 em 2 anos consecutivos e aplicando-os ao modelo de trabalho verificou-se, após sucessivas simulações que, no geral, o modelo não proporcionava um bom ajuste quando utilizada toda essa série histórica. Na realidade, muitos dos postos pertencentes a região analisada haviam sido desativados, gerando com isso falta de coleta de chuva em certos períodos e anos em que não havia correspondência entre as amostras de chuva e de vazão, como ilustrado no item 8.2, etapa 6.

Considerando que o objetivo da pesquisa busca dar ênfase ao estudo comparativo dos parâmetros de infiltração à diferentes metodologias, na tentativa de analisar a sensibilidade dos parâmetros de infiltração a este tipo de transformação deu-se, como prioridade, essa busca. Assim sendo, foram realizadas análises do comportamento das características de vazão média, forma da hidrógrafa de vazão calculada, ajuste nos picos entre outras resultando no sentido de selecionar alguns anos pertencentes a este total. Os anos de 73/74, 74/75 e 77/78 foram então escolhidos como base ao estudo dentro de uma escala de tempo diária gerando, desta forma respostas para os diferentes métodos avaliados. A escolha deste período foi baseada sobretudo após análise das curvas cota-descarga. Para estes anos nota-se a presença de curvas semelhantes, estando representado tal variação de nível em uma única curva o que não é verificado para os demais períodos, que encontram-se registradas em diferentes curvas, e apresentando variações da ordem de cerca de 20 até 30% umas as outras.

Já, para as bacias do Capivari-Monos e Itatinga foi necessária outra análise, ou seja, pelo fato das bacias serem pequenas e estarem situadas em uma região extremamente chuvosa foi tomado o intervalo horário para o estudo. A análise dos eventos foi feita baseando-se em enchentes observadas em períodos diferenciados.

Para a utilização do modelo de trabalho há necessita-se ter conhecimento da evaporação, vazão e chuva local. Os dados de evaporação foram coletados do posto Casa Grande. O posto mais próximo da bacia é o posto Cidade Universitária, contudo ele está localizado em condições muito diferentes da serra. Já o posto Casa Grande localiza-se próximo a crista da Serra do Mar, em condições similares à da bacia dos rios Capivari-Monos e Itatinga.

Para a bacia do rio Capivari-Monos os dados fluviométricos foram tomados na seção de estudo no posto Capivari-Vermelho (V6-372), os totais diários coletados de dois postos pluviográficos, Curva da Onça (E3-153) e Pilões (E3-236) e de um posto pluviométrico. O posto base, que dá o total de chuva na bacia, foi tomado como sendo o posto pluviométrico Evangelista de Souza (E3-059). Os eventos selecionados inicialmente no estudo foram: enchente de mar/78, dez/74, nov/79, fev/80, abr/81 e fev/83. Para que os dados de chuva da bacia do Capivari-Monos

obtidos dos postos pluviográficos pudessem ser inseridos no modelo de trabalho, foi realizado um ajuste de seus valores de chuvas horárias nos períodos correspondentes aos eventos selecionados. Isso se deu da seguinte forma: usando a distribuição do pluviógrafo e o total diário do pluviômetro. A chuva média em ambos os locais é conhecida, sendo no posto Evangelista de Souza igual a 2290 mm enquanto que a chuva média na bacia do Capivari-Monos é 2150 mm.

Apenas por uma questão de metodologia, aplicou-se o fator  $K = 0.94$ , obtido da relação  $Pmb/Pmi = 2150/2290$  aos pares de chuvas dos postos pluviográficos com intervalos de duração de 2 horas. A escolha de um intervalo de duração relativamente pequeno é justificada principalmente pela magnitude do evento, ou seja, o fato do estudo estar sendo aplicado a uma localidade (seção de rio) considerada pequena induz a intervalos de observação também pequenos, afinal a onda de cheia que caminha pelo leito do rio se propaga rapidamente. Esta metodologia aqui aplicada tem como intuito uma melhor representação dos valores de chuva coletados destes dois postos que ficam próximos, mas não na bacia estudada.

Para a bacia do rio Itatinga os dados fluviométricos foram coletados no posto local, de propriedade da Companhia Docas e os totais diários coletados do posto pluviográfico Represa Itatinga (E3-42) e de um posto pluviométrico local. O posto base, que dá o total de chuva na bacia, foi tomado como sendo o posto pluviográfico. Os eventos selecionados no estudo foram: enchente de dez/86, mar/87 e fev/88. Para que os dados de chuva obtidos do posto E3-42 fossem inseridos no modelo de trabalho, foi realizado um ajuste de seus valores de chuvas horárias nos períodos correspondentes aos eventos selecionados através da relação entre a chuva média de longo período na bacia pela chuva média de longo período no posto E3-42.

Aplicando assim o fator  $K = 0.66$ , obtido da relação  $Pmb/Pmi = 3063/4640$  aos pares de chuvas dos postos pluviográficos com intervalos de duração de 2 horas. A mesma análise foi aqui aplicada com relação ao intervalo adotado, já que semelhanças em relação a bacia do Capivari-Monos são bem visíveis. A metodologia busca uma melhor representação da chuva que se distribui de forma diferenciada na bacia e posto base.

## 8.2 Resultados Obtidos pelo Modelo de Trabalho a Bacia do Aguapei

Várias foram as análises realizadas na bacia do Aguapei. O desenvolvimento das diversas etapas ao longo da pesquisa são apresentadas a seguir. Apenas, para uma melhor compreensão é dado, na tabela 8.1, a seqüência do estudo desenvolvido com uso do modelo de trabalho.

Tabela 8.1 – Etapas desenvolvidas no estudo para a bacia do Aguapei.

<b>Etapa 1</b>	Estudo da distribuição temporal da chuva e estimativa do coeficiente $W_i$ .
<b>Etapa 2</b>	Determinação do conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração aos métodos propostos no estudo.
<b>Etapa 3</b>	Análise do comportamento dos parâmetros de infiltração frente modificações em torno do valor “ótimo” determinado.
<b>Etapa 4</b>	Verificação da influência do coeficiente $W_i$ nas respostas geradas pelo modelo.
<b>Etapa 5</b>	Análise do comportamento do modelo na adoção de uma distribuição uniforme da chuva para a área de estudo.
<b>Etapa 6</b>	Verificação de inconsistência nos dados observados de chuva.

### **Etapa 1 – Estudo da distribuição temporal da chuva e estimativa dos coeficientes dos postos ( $W_i$ ) a bacia do Aguapei.**

Para a bacia do Aguapei foram feitas diversas análises com o programa temporal utilizando valores de chuvas intensas observadas em três postos localizados nas proximidades da região de estudo. Estes postos apresentavam períodos diferenciados de dados coletados, sendo necessário antecipar a análise visualmente a fim de determinar o período de maior chuva para a duração específica.

Os valores gerados no estudo decorreram de um grande número de informações analisadas e, destas análises, surgiram duas distribuições de chuva semelhantes, definidas neste capítulo como distribuições (I) e (II).

A escolha definitiva de qual distribuição seria a adotada para uso no modelo de trabalho em todas as simulações decorreu após processamentos realizados com utilização destes valores determinados, ou seja, pares de valores de tempo-chuva. O modelo de trabalho fornece a opção ao usuário a livre escolha com relação a adoção da distribuição temporal em seu estudo. As distribuições selecionadas e aplicadas no modelo são apresentadas nas tabelas 8.2 e 8.3, seguida das curvas dos eventos e correspondente curva média.

Tabela 8.2 – Distribuição temporal da chuva (I) para a bacia do Aguapei

<b>TEMPORAL - Estudo da distribuição temporal de chuvas</b>								
<b>Chuva de Projeto distribuída no tempo</b>								
num	tempo	chuva	num	tempo	chuva	num	tempo	chuva
	(h)	(mm)		(h)	(mm)		(h)	(mm)
1	1.00	0.003	2	2.00	0.003	3	3.00	0.004
4	4.00	0.005	5	5.00	0.005	6	6.00	0.010
7	7.00	0.010	8	8.00	0.020	9	9.00	0.020
10	10.00	0.040	11	11.00	0.010	12	12.00	0.010
13	13.00	0.050	14	14.00	0.300	15	15.00	0.160
16	16.00	0.120	17	17.00	0.050	18	18.00	0.050
19	19.00	0.020	20	20.00	0.020	21	21.00	0.040
22	22.00	0.040	23	23.00	0.005	24	24.00	0.005

A figura 8.1 apresentada é resultante da análise de cinco eventos, totalmente independentes ocorridos na bacia do Aguapei. A escolha dos registros de chuva foi feita baseando-se principalmente no intervalo de interesse de 24 horas de modo a possibilitar a determinação de uma distribuição horária nos moldes de entrada do modelo de trabalho.

É importante notar que, as escalas são adimensionais, estando variando entre 0 e 1, sendo indicadas no topo superior da figura.

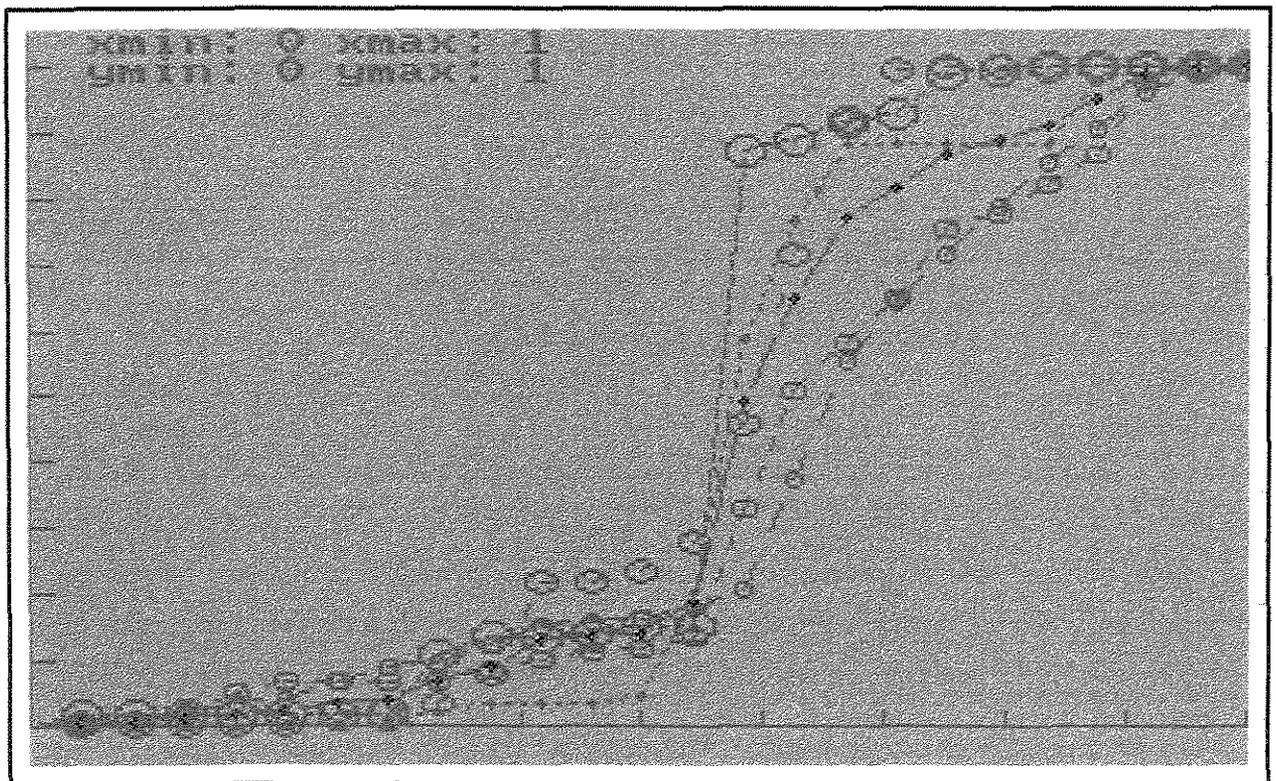


Figura 8.1 – Curvas (I) de distribuição temporal da chuva para os eventos analisados.

Tabela 8.3 – Distribuição temporal da chuva (II) para a bacia do Aguapei.

<b>TEMPORAL - Estudo da distribuição temporal de chuvas</b>								
<b>Chuva de Projeto distribuída no tempo</b>								
num	tempo	chuva	num	tempo	chuva	num	tempo	chuva
	(h)	(mm)		(h)	(mm)		(h)	(mm)
1	1.00	0.00	2	2.00	0.00	3	3.00	0.00
4	4.00	0.00	5	5.00	0.00	6	6.00	0.00
7	7.00	0.00	8	8.00	0.02	9	9.00	0.01
10	10.00	0.10	11	11.00	0.23	12	12.00	0.23
13	13.00	0.08	14	14.00	0.22	15	15.00	0.02
16	16.00	0.01	17	17.00	0.01	18	18.00	0.03
19	19.00	0.00	20	20.00	0.01	21	21.00	0.00
22	22.00	0.00	23	23.00	0.01	24	24.00	0.02

Nota-se que os valores determinados pelo programa Temporal para a distribuição II são bem diferentes dos determinados e representados na distribuição I. Visualmente percebe-se uma excessiva presença de valores nulos, indicando assim uma forte concentração de chuva em certas horas do total.

Aplicando-os ao modelo verifica-se um ajuste, porém não tão adequado quanto ao notado com a distribuição I, que representa de forma mais coerente a divisão dos eventos chuvosos ao longo do dia quando comparados aos valores da distribuição II, tendendo a concentrar os eventos. Por esse motivo prevaleceu a distribuição I como a distribuição adotada no modelo de estudo para bacia do Aguapei.

É importante notar que, as escalas são adimensionais, estando variando entre 0 e 1, sendo indicadas no topo superior da figura.

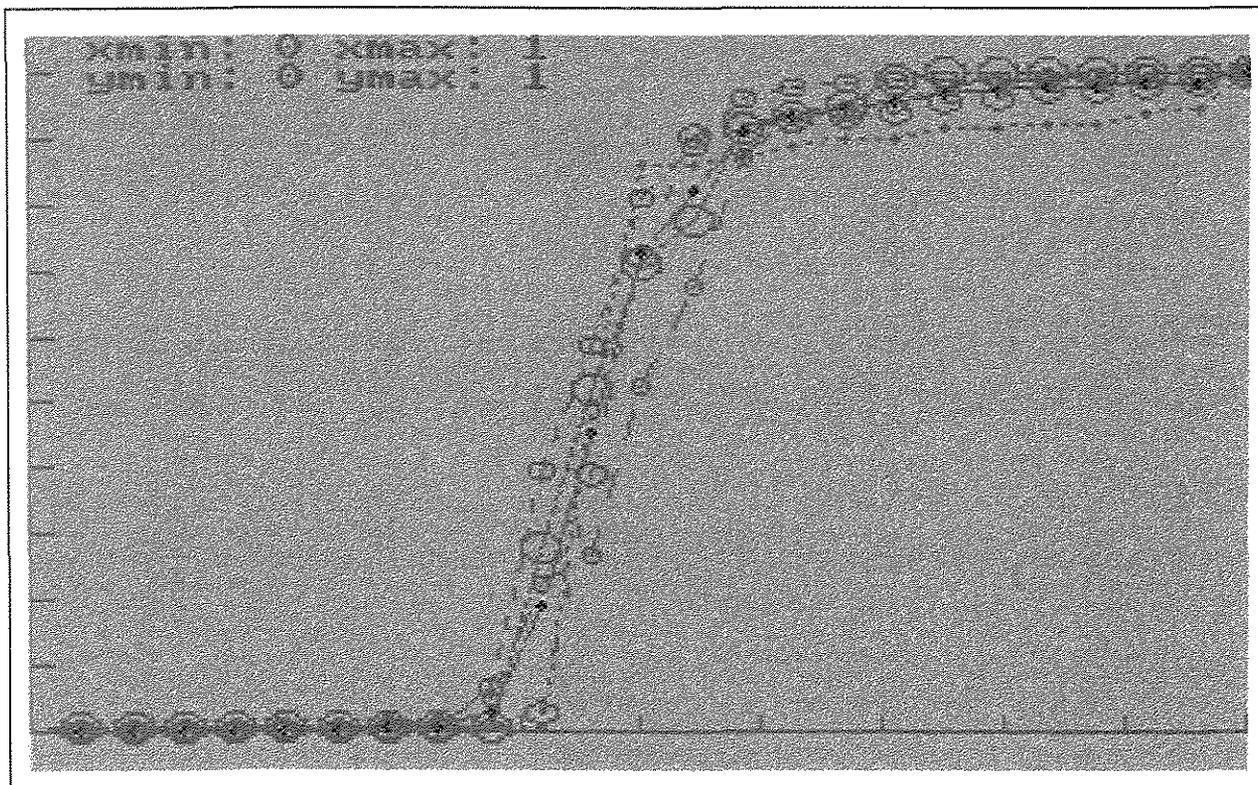


Figura 8.2 – Curvas (II) de distribuição temporal da chuva para os eventos analisados.

Com relação aos coeficientes dos postos, definidos de  $W_i$  foram calculados pela relação  $P_{mb}/P_{mi}$ . O valor da chuva média de longo período na bacia do Aguapei já é de conhecimento, estando estimado em 1429 mm.

A cada posto é tomado o seu valor de chuva média de longo período e através da relação citada acima é determinado os respectivos coeficientes, que são apresentados na tabela 8.4.

Tabela 8.4 – Relação de postos e coeficientes ( $W_i$ ) para a bacia do Aguapei.

<b>Prefixo do posto</b>	<b>P<sub>mi</sub> (mm)</b>	<b><math>W_i = P_{mi} / 1429</math></b>
D6 - 019	1506.45	0.949
D6 - 018	1512.86	0.945
D6 - 099	1448.10	0.987
D6 - 097	1399.50	1.021
D6 - 059	1547.40	0.924
D6 - 093	1380.50	1.035
D6 - 083	1402.40	1.019
C6 - 103	1492.00	0.958
C6 - 002	1490.68	0.959
C6 - 051	1425.70	1.003
C6 - 017	1388.64	1.029
C6 - 023	1391.20	1.027
C6 - 078	1332.20	1.073

**Etapa 2 – Determinação do conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração de acordo com os métodos propostos e inseridos no modelo de trabalho.**

Após vários processamentos determinou-se o conjunto de valores de parâmetros de infiltração. A cada método utilizado novas variáveis eram calibradas. Deve-se notar que certos parâmetros são comuns aos três métodos estudados, enquanto outros são próprios de cada módulo. Os valores de parâmetros, assim como as vazões calculadas e observadas dos períodos estudados para a bacia do Aguapei são dados nas tabelas 8.5 a 8.10. Com relação aos parâmetros relativos ao modelo de trabalho, estes são apresentados no anexo 3, com os respectivos valores adotados nas simulações realizadas neste estudo. Deve-se observar que, o conjunto de parâmetros do modelo de trabalho é único a todos os períodos estudados na versão diária à bacia do Aguapei. Para uma melhor visualização do ajuste encontrado pelos modelos aos anos analisados, é apresentado as hidrógrafas de vazões geradas nos métodos utilizados, permitindo assim a

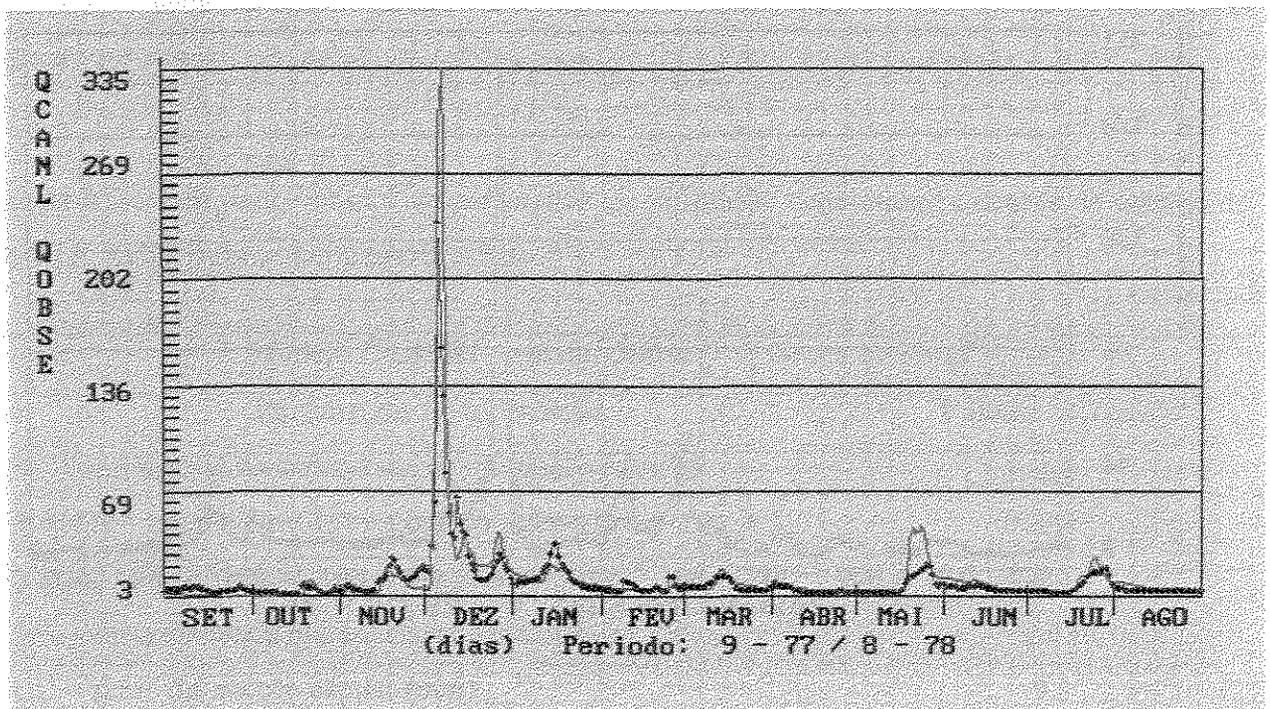


Figura 8.5 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Green & Ampt ao período de set/77 a ago/78.

Tabela 8.7 – Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Diskin & Nazimov para os períodos de estudo.

<b>Modelo LABSHI – versão diária ( Diskin &amp; Nazimov )</b>	
<b>Parâmetros de infiltração</b>	<b>Valores “ótimos”</b>
SMAX – capacidade máxima de umidade do solo (mm)	60
VCC – capacidade de campo do solo (%)	0.2
IFC – capacidade mínima de infiltração (mm/h)	3.0
EVASUP – coeficiente da evaporação – superfície	1.3
EVASOL – coeficiente da evaporação – subsolo	1.3
KSUP – coeficiente de deflúvio superficial	0.7
KSSP – coef. separação escoamento subsuperficial-subterrâneo.	0.38
NSUP – expoente para o deflúvio superficial	0.8
IFI – capacidade inicial de infiltração (mm/h)	4.1

Tabela 8.8 – Valores de vazão média calculada e observada aos períodos analisados ao método de Diskin & Nazimov.

Período set/ago	Método	Q calculada (m <sup>3</sup> /s)	Q observada (m <sup>3</sup> /s)	Coefficiente de correlação
73/74	D & N	12.839	12.800	0.95
74/75		8.694	9.526	0.89
77/78		15.936	12.802	0.95

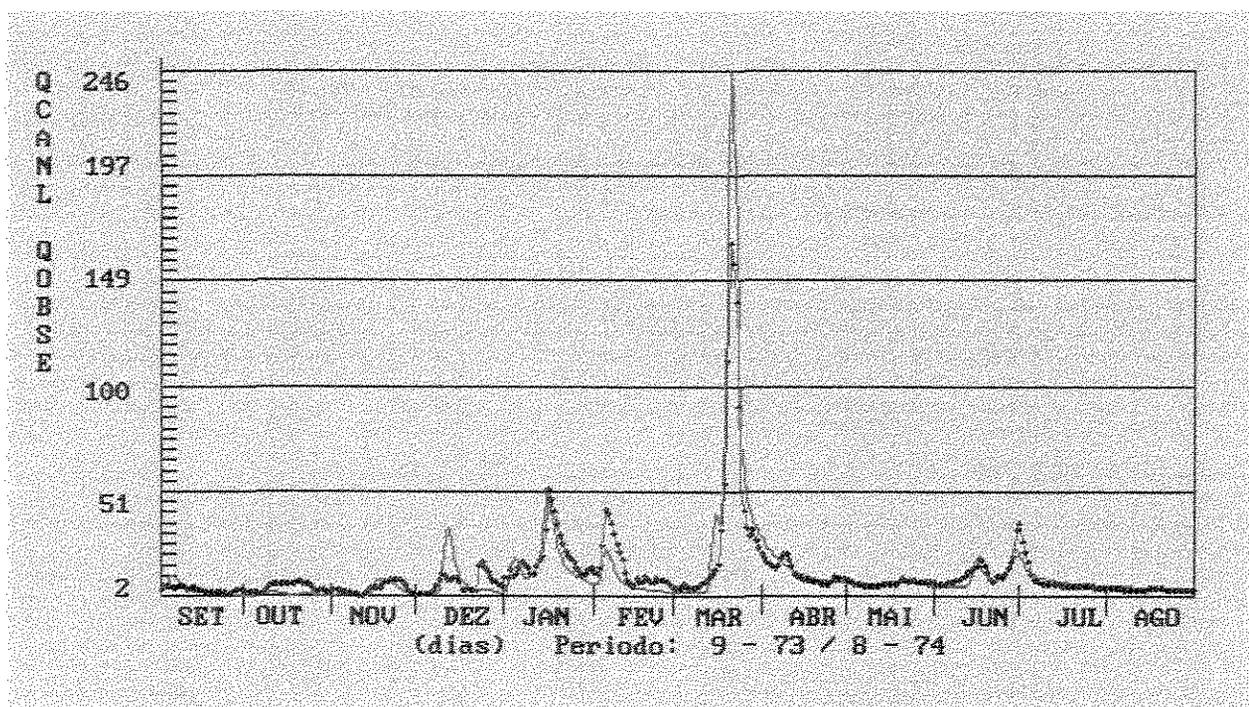


Figura 8.6 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Diskin & Nazimov ao período de set/73 a ago/74.

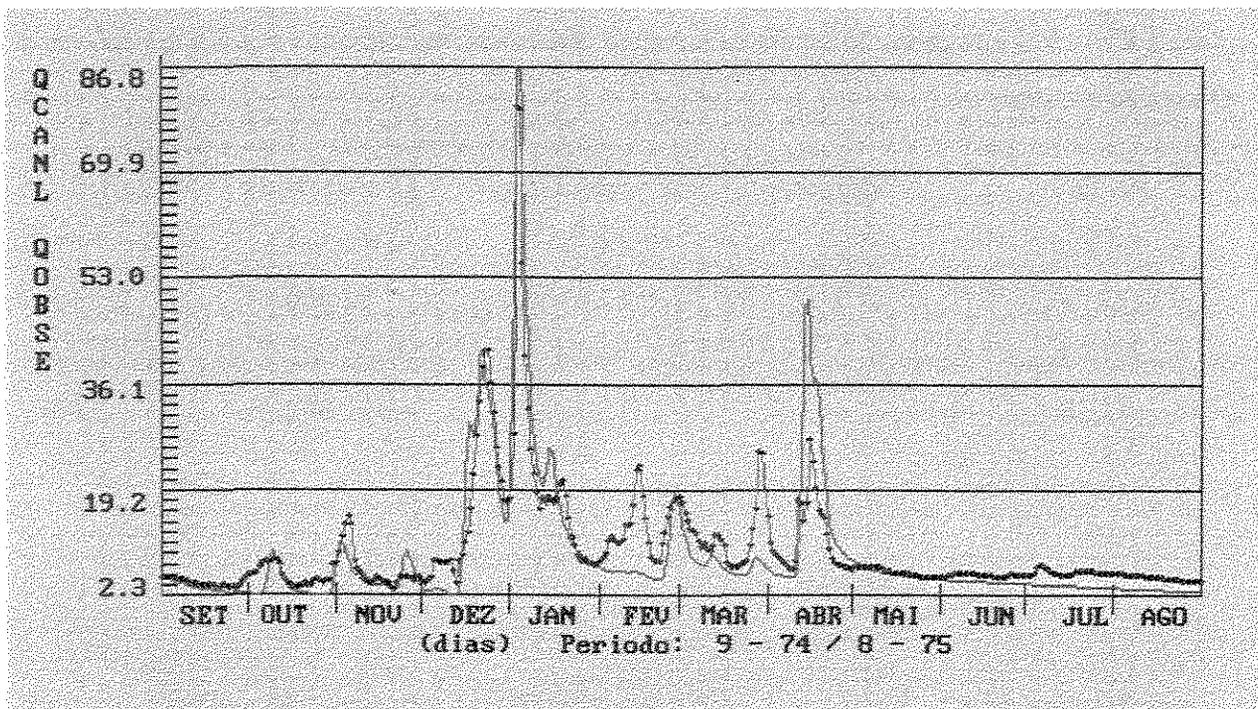


Figura 8.7 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Diskin & Nazimov ao período de set/74 a ago/75.

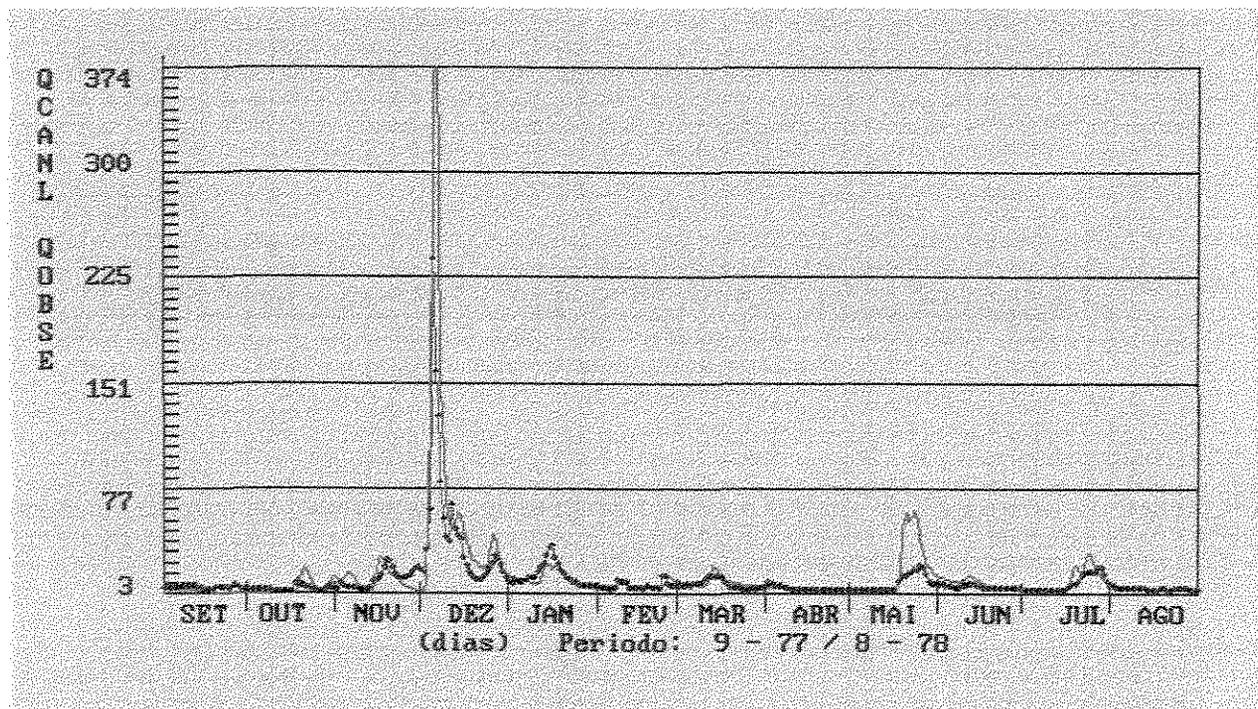


Figura 8.8 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Diskin & Nazimov ao período de set/77 a ago/78.

Tabela 8.9 – Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Tan & O’Connor para os períodos de estudo.

<b>Modelo LABSHI – versão diária (Tan &amp; O’Connor)</b>	
<b>Parâmetros de infiltração</b>	<b>Valores “ótimos”</b>
SMAX – capacidade máxima de umidade do solo (mm)	60
VCC – capacidade de campo do solo (mm)	0.2
IFC – capacidade mínima de infiltração (mm/h)	3.0
EVASUP – coeficiente da evaporação – superfície	1.3
EVASOL – coeficiente da evaporação – subsolo	1.3
KSUP – coeficiente de deflúvio superficial	0.7
KSSP – coef. separação escoamento subsuperficial-subterrâneo.	0.38
NSUP – expoente para o deflúvio superficial	0.8
ALFA – coeficiente da função exponencial de infiltração	2.0
IFI – capacidade inicial de infiltração (mm/h)	4.1

Tabela 8.10 – Valores de vazão média calculada e observada aos períodos analisados ao método de Tan & O’Connor.

<b>Período</b>	<b>Método</b>	<b>Q calculada</b>	<b>Q observada</b>	<b>Coeficiente de</b>
<b>set/ago</b>		<b>(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>(m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>correlação</b>
73/74	<b>T &amp; C</b>	12.631	12.800	0.95
74/75		8.614	9.526	0.90
77/78		15.949	12.802	0.95

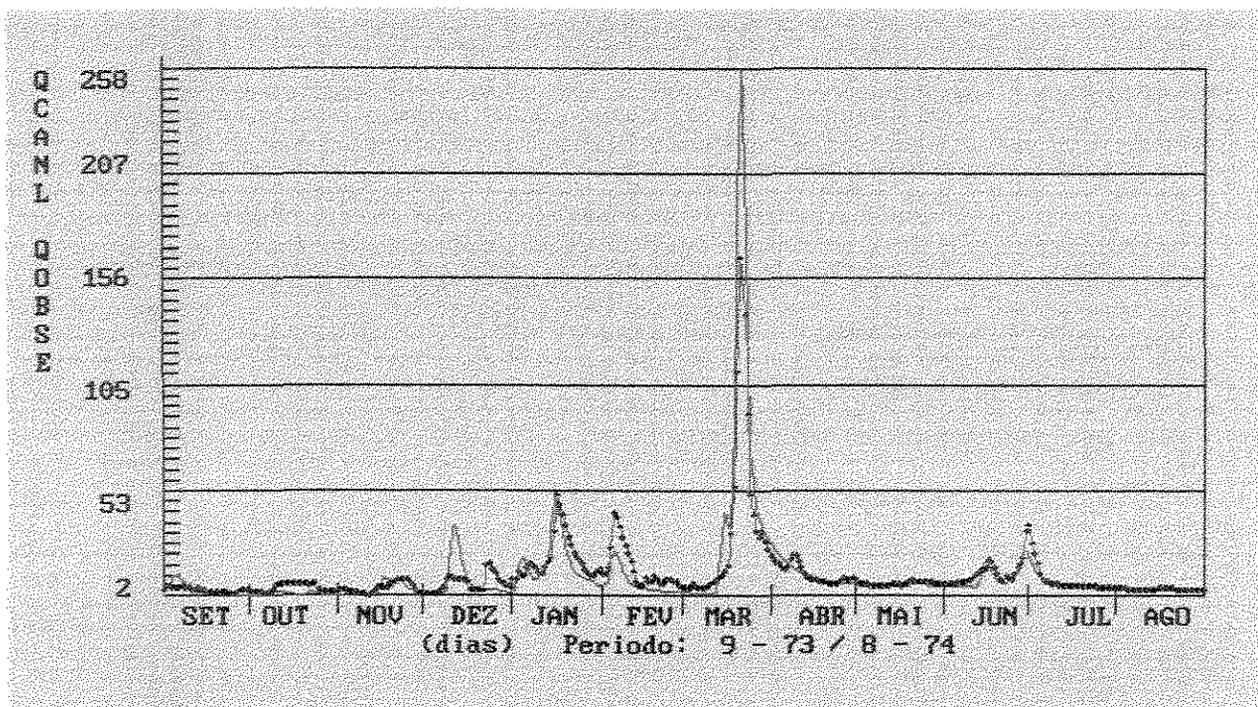


Figura 8.9 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Tan & O'Connor aos períodos de set/73 a ago/74.

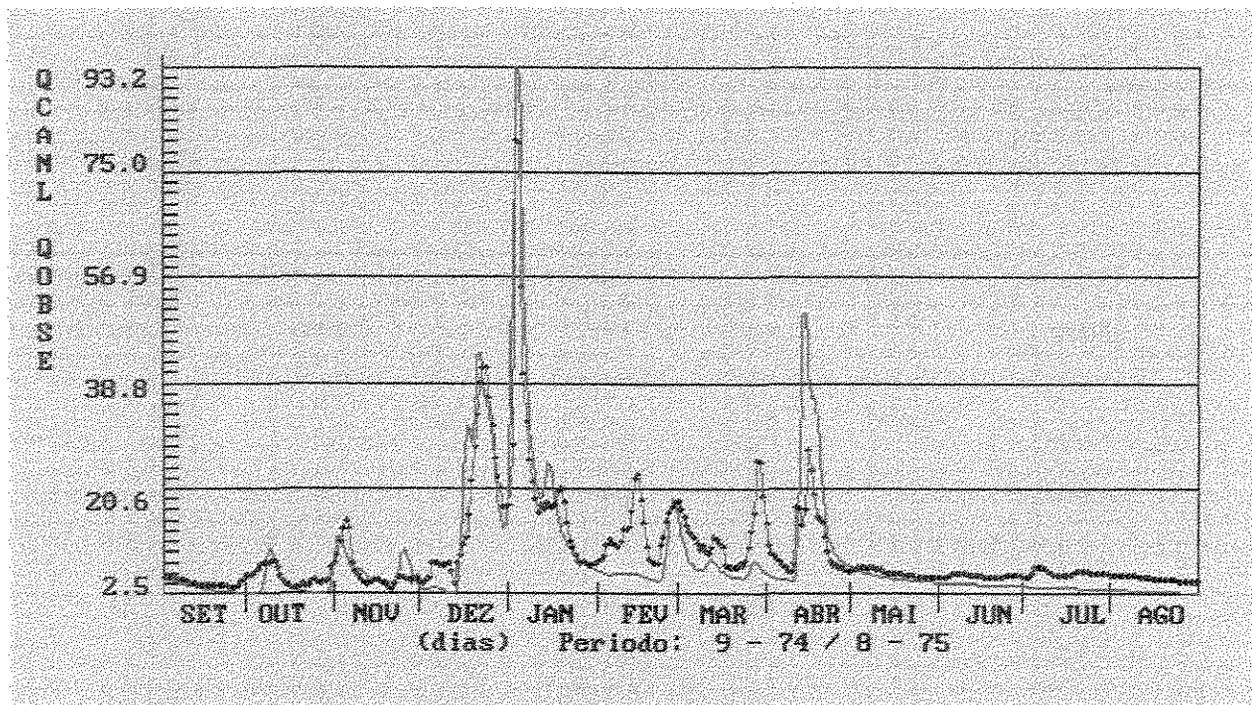


Figura 8.10 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Tan & O'Connor aos períodos de set/74 a ago/75.

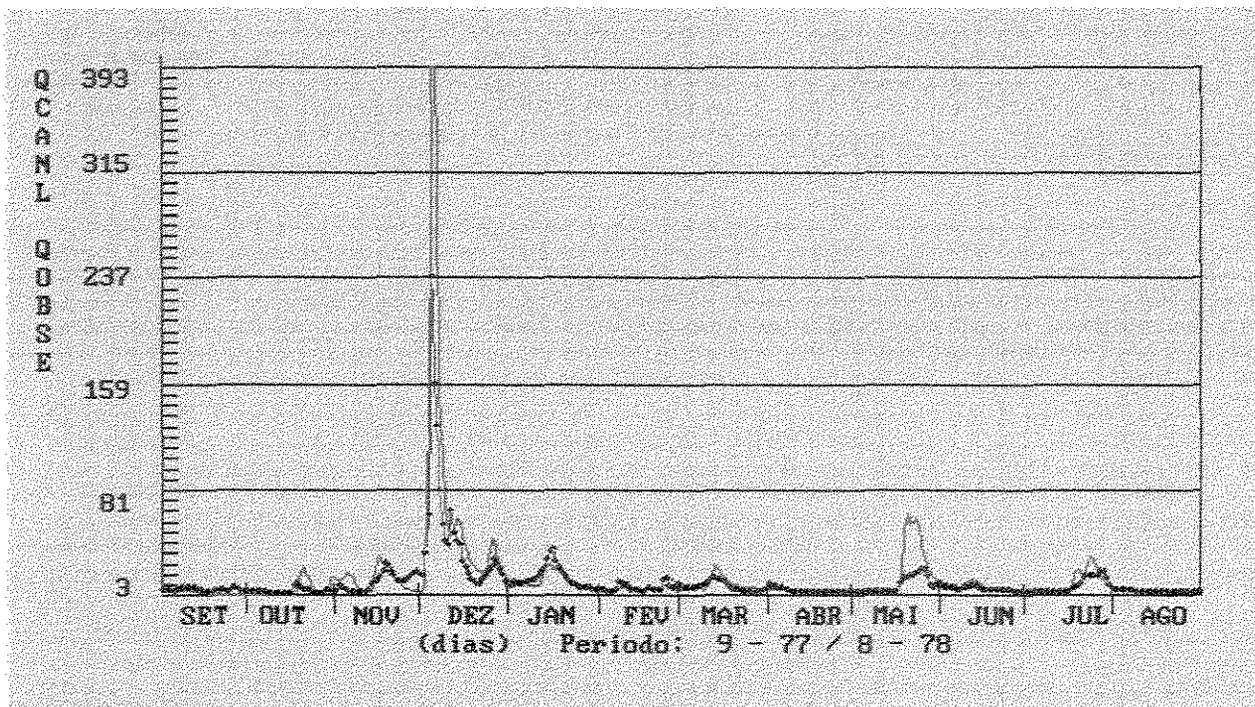


Figura 8.11 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) - método de Tan & O'Connor aos períodos de set/77 a ago/78.

### **Etapa 3 – Comparação dos parâmetros de infiltração aos métodos propostos e inseridos no modelo de trabalho – análise de sensibilidade.**

Como objetivo principal da pesquisa, buscou-se realizar os estudos comparativos entre os métodos por meio da análise dos parâmetros de infiltração propostos em cada um destes. Como grande parte destes parâmetros são comuns aos métodos, optou-se através da variação de seus valores em torno do chamado valor “ótimo”, verificar características presentes no modelo de forma a prever modificações ocorridas nas respostas geradas frente alterações de situações.

Para cada parâmetro partiu-se do valor ótimo, efetuando sucessivas simulações alterando-se para valores superiores ( na ordem de 70 %) e inferiores (na ordem de 80 %) e, dessa forma, analisando os efeitos gerados nos resultados desses processamentos.

As características avaliadas nestas comparações para análise das hidrógrafas foram vazão média no período, isto é, volume gerado, pico, defasagem e período de estiagem. Examinando a tabela 8.11 tem-se uma melhor compreensão da análise de sensibilidade efetuada entre os parâmetros de infiltração.

Tabela 8.11– Caracterização de parâmetros comuns e específicos aos métodos propostos e inseridos no modelo de trabalho.

<b>Modelo LABSHI</b>	<b>Parâmetros comuns aos três métodos</b>	<b>Parâmetros comuns a dois métodos</b>	<b>Parâmetros específicos de cada método</b>
Método de Green & Ampt	<i>IFI</i> <i>EVASUP</i> <i>EVASOL</i> <i>VCC</i> <i>KSUP</i> <i>KSSP</i> <i>NSUP</i>		<i>KHS</i> <i>SUC</i> <i>TETS</i>
<b>Modelo LABSHI</b>	<b>Parâmetros comuns aos três métodos</b>	<b>Parâmetros comuns a dois métodos</b>	<b>Parâmetros específicos de cada método</b>
Método de Diskin & Nazimov	<i>IFI</i> <i>EVASUP</i> <i>EVASOL</i> <i>VCC</i> <i>KSUP</i> <i>KSSP</i> <i>NSUP</i>	<i>SMAX</i> <i>IFC</i>	
Método de Tan & O'Connor	<i>IFI</i> <i>EVASUP</i> <i>EVASOL</i> <i>VCC</i> <i>KSUP</i> <i>KSSP</i> <i>NSUP</i>	<i>SMAX</i> <i>IFC</i>	<i>ALFA</i>

Tabela 8.12 – Análise das características mediante alteração do parâmetro IFI.

<b>Parâmetro IFI – capacidade de infiltração inicial</b>		
Q média	G & A D & N T & C	Nota-se que para ambos os métodos o comportamento da vazão média no período tende a aumentar para valores inferiores ao “ótimo” e diminuir para valores superiores. O comportamento desta característica é idêntico nos três métodos analisados com variações da ordem de 4 a 7% na vazão média.
Pico	G & A D & N T & C	Leve alteração para valores inferiores ao “ótimo”, não comprometendo o ajuste. Contrário ao G & A, os picos tanto para D&N quanto para T & C não permitem um bom ajuste nos meses de maior ocorrência chuvosa. Neste caso nota-se uma maior sensibilidade do parâmetro a esses dois métodos neste tipo de transformação.
Defasagem	G & A D & N T & C	Não foi notado defasagem a nenhum dos métodos. Essa característica não é caracterizada pelos parâmetros de infiltração, mas por variáveis relacionadas ao tempo de detenção e número de fases de cada parcela de escoamento.
Estiagem	G & A D & N T & C	O ajuste das hidrógrafas é muito bom. As vazões do período de estiagem sofrem acréscimo diante de uma maior infiltração inicial respondendo de forma contrária a uma situação de menor infiltração. Pode-se verificar para esta característica que o modelo permite uma boa representação da situação real.

Tabela 8.13 – Análise das características mediante alteração do parâmetro EVASUP.

<b>Parâmetro EVASUP – coeficiente da evaporação – superfície</b>		
Q média	G & A D & N T & C	Verifica-se que, independente da alteração deste parâmetro para valores acima ou abaixo do “ótimo”, a variação na vazão média do período está em torno de 10%, ou seja, o volume médio escoado difere nesta faixa de grandeza, 1 m <sup>3</sup> .
Pico	G & A D & N T & C	Para ambos os métodos a hidrógrafa gerada apresentou alterações significativas em seus picos para valores inferiores ao “ótimo”. De certa forma a representação da vazão pela hidrógrafa fica prejudicada com valores impróprios deste parâmetro, não permitindo assim a representação do fenômeno estudado..
Defasagem	G & A D & N T & C	Não foi determinado, nas análises realizadas, qualquer tipo de defasagem na hidrógrafa gerada pelo modelo de trabalho. O que se notou foi um pequeno recesso, ou seja, má representação da hidrógrafa logo após a ocorrência de um pico extremo.
Estiagem	G & A D & N T & C	A vazão no período mostrou-se menor com aumento da evaporação no reservatório de solo. Valores abaixo do “ótimo” contribuíram para o aumento das parcelas de escoamento. Nota-se que o comportamento da hidrógrafa nos períodos de menores chuvas é bem representado pelo modelo, independentemente do método usado.

Tabela 8.14 – Análise das características mediante alteração do parâmetro EVASOL.

<b>Parâmetro EVASOL – coeficiente da evaporação – subsolo</b>		
Q média	G & A D & N T & C	Este parâmetro interfere na evapotranspiração. O aumento ou diminuição desse parâmetro gera aos métodos mudanças semelhantes no volume calculado, com variações de 15% que são significativas quando na análise de grandes volumes.
Pico	G & A D & N T & C	Nos meses de grandes ocorrências chuvosas valores do parâmetro EVASOL acima do “ótimo” não mostraram grandes alterações nas hidrógrafas. A sensibilidade do parâmetro é notada para valores bem abaixo do “ótimo” gerando picos extremamente elevados.
Defasagem	G & A D & N T & C	Novamente não se observou a ocorrência de defasagem entre as hidrógrafas. A ausência da ocorrência desta característica é notada nas análises dos parâmetros de infiltração aqui apresentadas.
Estiagem	G & A D & N T & C	Aos métodos pode-se dizer que a intensa evapotranspiração afeta a vazão neste período, assim como a baixa taxa favorece os escoamentos sub-superficiais e subterrâneos. No entanto nota-se que o modelo representa bem esta situação..

Tabela 8.15 – Análise das características mediante alteração do parâmetro VCC.

<b>Parâmetro VCC – capacidade de campo do solo</b>		
Q média	G & A D & N T & C	Para G & A, este parâmetro provoca alterações bruscas na vazão média. Enquanto que para os outros dois métodos a vazão quase não varia, para G & A ocorre uma alteração da ordem de 18%, afetando em muito os picos estimados pelo modelo no período estudado.
Pico	G & A D & N T & C	Apenas para G & A nota-se uma representação do modelo não muito boa. Isso não impede sua alteração quando necessária, é claro que dependerá da sensibilidade do usuário na escolha do valor do parâmetro. Para D & N e T & C alterações pouco modificaram a forma geral das hidrógrafas.
Defasagem	G & A D & N T & C	Em nenhum momento notou-se a ocorrência de defasagem nos métodos avaliados. Isso tornou-se uma constante ao longo das análises dos parâmetros. E é por esse motivo que esta característica não é mais apresentada nas tabelas seguintes.
Estiagem	G & A D & N T & C	Alterações neste parâmetros pouco influenciaram as vazões na estiagem e tão pouco a representação das hidrógrafas nesses meses. Ao contrário, o bom ajuste dado pelo modelo tornou-se um fator positivo no trabalho, contribuindo para a calibração do modelo ao longo de todo o período analisado.

Tabela 8.16 – Análise das características mediante alteração do parâmetro KSUP.

<b>Parâmetro KSUP – coeficiente de escoamento superficial</b>		
Q média	G & A D & N T & C	A variação deste parâmetro traz modificações no escoamento superficial. Se adotado valores superiores ou inferiores ao “ótimo” há como resposta do modelo aumento ou diminuição da vazão média e, conseqüentemente do volume escoado. A todos os métodos verificou-se alterações mínimas na vazão, na ordem de 3%.
Pico	G & A D & N T & C	O acréscimo da vazão é notado nos picos das hidrógrafas geradas pelo modelo. Em ambos os métodos nota-se este efeito. As hidrógrafas representam as vazões no período e para eventos de grande magnitude são melhor representadas com valores do parâmetro KSUP inferiores ao valor “ótimo” encontrado. Isso porque a vazão de saída gerada pelo modelo toma em seu cálculo parcela das vazões subterrânea, superficial e sub-superficial.
Estiagem	G & A D & N T & C	No período de menores precipitações o modelo LABSHI representa de forma satisfatória as vazões. Modificações deste parâmetros causam alterações pouco significativas no geral, alterando em torno de 2% seu valor médio e representando bem nas partes baixas das curvas.

Tabela 8.17 – Análise das características mediante alteração do parâmetro KSSP.

<b>Parâmetro KSSP – coeficiente de separação escoamento sub-superficial: subterrâneo</b>		
Q média	G & A D & N T & C	Nota-se que alterações do coeficiente KSSP realizadas em torno do valor “ótimo” não produziram mudanças significativas no comportamento da vazão na avaliação dos métodos adotados. Verificou-se o que já era esperado, acréscimo de vazão para valores acima do “ótimo” e queda para valores abaixo. É natural tal resposta, já que este parâmetro altera o volume armazenado no reservatório subterrâneo. Maiores armazenamentos contribuem com maiores vazões na seção de saída.
Pico	G & A D & N T & C	Maiores vazões geram maiores picos. Esta situação foi notada com alteração deste parâmetro. Os picos verificados nos meses de maiores precipitações tiveram um bom ajuste para D & N e T & C. No caso do método de G & A, nota-se um leve amortecimento da hidrógrafa com uso de valor de parâmetro inferior ao “ótimo”.
Estiagem	G & A D & N T & C	Para valores acima do “ótimo” o ajuste foi muito bom a todos os métodos. Em contrapartida, para valores menores, o modelo não representa as vazões nos meses de menores chuvas, variando seus valores em torno de 20% acima da média observada.

Tabela 8.18 – Análise das características mediante alteração do parâmetro NSUP.

<b>Parâmetro NSUP - expoente para o deflúvio superficial</b>		
Q média	G & A D & N T & C	Esse expoente influencia no escoamento superficial. Quando adotado valores superiores ao “ótimo” cria condições de um maior armazenamento no reservatório de superfície e, de certa forma, maiores vazões. Essas vazões não geram mudanças significativas no contexto geral. Ambos os métodos respondem se forma semelhante a essas mudanças.
Pico	G & A D & N T & C	Já em relação aos meses de grandes chuvas, valores acima ou abaixo do “ótimo” provocam fortes alterações nas hidrógrafas. Para ambos os métodos, ocorre uma má representação dos picos no intervalo analisado.
Estiagem	G & A D & N T & C	Para o período de poucas chuvas alterações realizadas neste parâmetro de infiltração pouco altera as vazões desses meses. O ajuste foi muito bom, até porque quando não há grandes alterações na chuva analisada, tornando mais fácil a representação do fenômeno.

Tabela 8.19 – Análise das características mediante alteração do parâmetro SMAX.

<b>Parâmetro SMAX – capacidade máxima de umidade do solo</b>		
Q média	D & N T & C	Quando adotado um valor superior ao valor “ótimo” ocorre uma diminuição da infiltração, já que aumenta a umidade no solo. Isso realmente é verificado a ambos os métodos, quando comparada as vazões médias do período. No momento em que a umidade é menor, indicada por um valor do parâmetro abaixo do “ótimo” cresce a parcela infiltrada, gerando assim maiores vazões médias. Em relação aos métodos ambos comportam-se de maneira idêntica, inclusive com diferença mínima (3%) entre suas vazões independentemente da alteração realizada ao parâmetro.
Pico	D & N T & C	Na ocorrência de uma maior vazão, decorrente de um período de chuva intensa, há um comportamento semelhante dos métodos de D & N e T & C. Os picos ajustam-se melhor para valores do parâmetro SMAX acima do “ótimo”, ocorrendo a situação contrária para um valor menor desse parâmetro.
Estiagem	D & N T & C	Novamente notou-se que o modelo representa o período de estiagem bem melhor que períodos de grandes precipitações. Independente da alteração realizada no parâmetro SMAX, ocorre uma leve alteração nas vazões do período de estiagem, na ordem de 6%.

Tabela 8.20 – Análise das características mediante alteração do parâmetro IFC.

<b>Parâmetro IFC – capacidade mínima de infiltração</b>		
Q média	D & N T & C	A capacidade mínima de infiltração estabelece o início da entrada constante de água no solo. Para ambos os métodos aqui avaliados ocorre situações semelhantes, ou seja, o comportamento se verifica para as duas situações. No entanto, nota-se que ao adotar-se um valor do parâmetro inferior ao chamado valor “ótimo” surge uma diferença nas vazões calculadas por D & N e T & C da ordem de 10%. Para grandes valores de vazões esta alteração pode ser significativa.
Pico	D & N T & C	O pico representado na hidrógrafa calculada pelo modelo LABSHI altera-se para a situação de elevadas vazões quando adotados valores baixos do parâmetro IFC. De certa forma há um acréscimo nos escoamentos sub-superficiais e subterrâneos, já que a vazão de saída no canal é dada pela soma destas parcelas a subterrânea, todas amortecidas e propagadas cada qual no seu meio.
Estiagem	D & N T & C	Tanto D & N como T & C propiciaram ajustes muitos bons ao período de estiagem. Valores acima ou abaixo do “ótimo” não geraram grandes alterações nas vazões do período.

Tabela 8.21 – Análise das características mediante alteração do parâmetro KHS.

<b>Parâmetro KHS – condutividade hidráulica saturada</b>		
Q média	G & A	A condutividade hidráulica saturada foi avaliada na condição única pelas respostas geradas pelo modelo frente mudanças ocorridas em torno do valor “ótimo” e notou-se que para valores superiores a vazão média do período pouco modificava-se, mas em contrapartida para valores abaixo do “ótimo” alterações ocorreram na ordem de 9%. Deve-se salientar que a vazão média sofre influência de outros parâmetros relacionados ao modelo de G & A além do parâmetro KHS.
Pico	G & A	Para valores superiores ao “ótimo” os picos não alteraram muito, até mesmo porque a vazão nos meses do período para esta situação não sofre grandes mudanças. Valores menores afetam todos os picos existentes na hidrógrafa de vazão calculada. Uma maior facilidade oferecida pelo meio permeável ao escoamento de água através de seus vazios não implica necessariamente num maior pico.
Estiagem	G & A	O ajuste na estiagem continua sendo muito bom, apesar das variações nos volumes escoados dos meses de menores chuvas terem sido em torno de 1.0 m <sup>3</sup> tanto para valores superiores como inferiores do valor “ótimo”.

Tabela 8.22 – Análise das características mediante alteração do parâmetro SUC.

<b>Parâmetro SUC – altura de sucção capilar ou capilaridade</b>		
Q média	G & A	O valor do parâmetro SUC foi avaliado e mostrou-se pouco influente nas características analisadas. De início sabe-se que a infiltração no modelo de G & A está diretamente relacionado a este fator. Os valores de vazão média calculados no período de estudo tiveram pequenas alterações de 2%. Este foi o parâmetro que menos influenciou os valores gerados, independente de variação em torno do “ótimo”, inclusive em relação ao coeficiente de correlação (c.c.= 0.95).
Pico	G & A	Valores acima do “ótimo” não alteraram a forma da hidrógrafa calculada nos períodos chuvosos. Para valores menores houve um mal ajuste no mês de maior precipitação, porém nada que prejudicasse a avaliação e comparação das hidrógrafas calculadas e observadas.
Estiagem	G & A	Bom ajuste nos meses de poucas chuvas, em relação as vazões neste período sofreram uma pequena variação de 3%, nada que comprometa o volume neste período.

Tabela 8.23 – Análise das características mediante alteração do parâmetro TETS.

<b>Parâmetro TETS – umidade de saturação do solo</b>		
Q média	G & A	A escolha de valores acima do “ótimo” para este parâmetro indicaram uma pequena influência na vazão média calculada do período. Para valores acima do “ótimo” houve um menor volume escoado, significando que o solo reteve uma maior quantidade de água. Valores abaixo do “ótimo” geraram vazões médias maiores que as da situação anterior, porém não tão distantes destas. Na situação de um solo saturado a resposta gerada pelo modelo pode ser diferente da apresentada nesta análise, prevalecendo neste caso o escoamento superficial e sub-superficial.
Pico	G & A	Na ocasião de valores adotados acima do “ótimo” há um bom ajuste do modelo, de forma a representar bem os períodos de intensas chuvas. Para situações contrárias, nota-se aumento nos picos principalmente no meses mais chuvosos do período. Neste caso um baixo valor de TETS gera parcelas mais significativas de escoamento e menores taxas de infiltração.
Estiagem	G & A	Aos períodos de estiagem ocorreu um ótimo ajuste do modelo. A análise das vazões nestes meses de poucas precipitações favoreceram a representação dos escoamentos na área de estudo, pois variaram muito pouco.

Tabela 8.24 – Análise das características mediante alteração do parâmetro ALFA.

<b>Parâmetro ALFA – coeficiente da função exponencial de infiltração</b>		
Q média	T & C	O parâmetro ALFA é derivado da expressão empírica do método de T & C, trata-se de uma constante dependente das características do solo. Variações ocorridas em torno do valor “ótimo” indicou pequenas alterações na vazão média do período e não influi e nem modifica o coeficiente de correlação dado com as alterações realizadas..
Pico	T & C	Com relação aos picos, o parâmetro ALFA mostra-se pouco sensível, mesmo para valores acima de 1 (adotado pelos autores). É interessante notar que este coeficiente depende de outros parâmetros aqui analisados, principalmente os que caracterizam a umidade presente no solo.
Estiagem	T & C	Permitiu um bom ajuste nos períodos de estiagem, com pequenas alterações nas vazões para os meses menos chuvosos. Não gerou alterações significativas no volume, sendo bem representativo nas regiões baixas destas curvas analisadas.

Nota-se que os parâmetros definidos nesta etapa como parâmetros específicos de cada método são os mais influentes nas modificações realizadas. Como pode ser notado, a condutividade hidráulica saturada (KHS), a capilaridade (SUC) e a umidade de saturação do solo (TETS) influem principalmente nos picos das hidrógrafas calculadas pelo método de Green & Ampt. Com relação a capacidade máxima de umidade do solo (SMAX) e capacidade mínima de infiltração (IFC), presentes nos métodos de Diskin & Nazimov e de Tan & O’Connor, ambos os parâmetros geram alterações semelhantes nas vazões média do período, e por último, o parâmetro ALFA, que não influi significativamente nas respostas geradas e tão pouco nos picos da hidrógrafa de vazão calculada, mesmo para valores elevados.

Assim, é possível resumir as análises da seguinte maneira: para os três métodos avaliados os parâmetros de infiltração respondem a mudanças em torno de seu valor ótimo de modo semelhante, gerando alterações no comportamento da hidrógrafa de vazão calculada. Isso mostra que a estimativa desse processo pode ser realizada levando-se em conta o teor de umidade ou propriedades do solo tais como presentes na expressão de Green & Ampt.

#### **Etapa 4 – Influência dos coeficientes dos postos pluviométricos no valor da chuva média na bacia.**

O coeficiente  $W_i$  é utilizado no cálculo da chuva média na bacia sendo representado pela relação entre chuva média de longo período na bacia e chuva média de longo período no posto. Para verificar se este coeficiente representa corretamente a chuva na área de estudo, realizou-se a seguinte análise: tomado o valor de  $W_i = 1$  e adotando-os aos 13 postos da bacia do Aguapei. Com isso fez-se a simulação aos períodos de estudo, considerando os valores de parâmetros já determinados previamente. Tal análise é apresentado na tabela 8.25.

Tabela 8.25 – Comparação entre os valores de vazão média calculado segundo valores adotados do coeficiente  $W_i$ .

<b>Período</b>	<b>Método</b>	<b>Q calc. (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q calc. (m<sup>3</sup>/s)</b>
<b>set/ago</b>		<b><math>W_i = P_{mb}/P_{mi}</math></b>	<b><math>W_i = 1</math></b>
73/74	<b>G &amp; A</b>	12.842	13.125
74/75		8.948	9.190
77/78		14.227	14.592
73/74	<b>D &amp; N</b>	12.839	13.108
74/75		8.694	8.848
77/78		15.936	16.089
73/74	<b>T &amp; C</b>	12.631	12.384
74/75		8.614	8.780
77/78		15.949	16.197

Nota-se que as diferenças encontradas são pequenas, da ordem de 2 %, de modo que a adoção de tais coeficientes determinados pela relação média é válida na representação da chuva média na bacia. No anexo I encontra-se o resumo dos resultados de vazão do período analisado mês a mês à ambas as situações apresentadas.

### **Etapa 5 – Influência da distribuição uniforme da chuva no comportamento geral do modelo de trabalho.**

A distribuição temporal da chuva é um dos principais aspectos a ser considerado em um estudo hidrológico. Devido a sua grande importância, foi tomado desde o início como uma das principais análises a serem realizadas nesta pesquisa.

Considerando-se que as chuvas apresentam variabilidade temporal significativa como se pode constatar nas análises efetuadas e descritas na etapa 1, para a obtenção do conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração pelo modelo de trabalho tornou-se necessária a adoção de uma distribuição temporal da chuva ao longo da bacia. Para determinação desta distribuição foram levantados dados de chuvas ocorridas em postos situados na localidade, e a seguir aplicadas em um programa próprio para esse fim, denominado *Temporal*.

Buscou-se essa distribuição na tentativa de melhor representar a variação da chuva no tempo. Sabe-se que a chuva pode variar ao longo do tempo e do espaço. Tais medições são de difícil obtenção e para que fossem conhecidas e disponíveis seriam necessários investimentos maciços para a aquisição de informações pluviométricas em tempo real. Logo, devemos trabalhar sempre com o máximo de informações possíveis e as disponíveis até o momento nos dirigiu para esse caminho.

Caso não fosse conhecida tais informações seria necessária a utilização de uma distribuição uniforme da chuva na área. E essa distribuição pode ser considerada como uma boa estimativa ?. Comparações apresentadas na tabela 8.26 mostram as diferenças encontradas entre os valores determinados por essas duas situações comentadas.

Tabela 8.26 – Comparação das vazões médias calculadas segundo a distribuição temporal da chuva adotada.

<b>Período set/ago</b>	<b>Método</b>	<b>Qcalc. (m<sup>3</sup>/s) distr. caract.</b>	<b>Coefficiente correlação</b>	<b>Qcalc. (m<sup>3</sup>/s) distr. unif.</b>	<b>Coefficiente correlação</b>
73/74	<b>G &amp; A</b>	12.842	0.95	9.232	0.67
74/75		8.948	0.90	6.843	0.47
77/78		14.227	0.94	11.505	0.90
73/74	<b>D &amp; N</b>	12.839	0.95	11.065	0.63
74/75		8.694	0.89	7.250	0.66
77/78		15.936	0.95	14.126	0.87
73/74	<b>T &amp; C</b>	12.631	0.95	10.490	0.62
74/75		8.614	0.89	7.073	0.68
77/78		15.949	0.95	14.034	0.91

Nota-se que as modificações nos valores são bastantes significativas, como apresentado indiretamente pelo coeficiente de correlação, que registra a diferença entre um valor de vazão gerado num processamento e o valor observado. Verifica-se pela análise dos resultados em certos casos a uma vazão inferior da ordem de 40 %. Para melhor visualização do efeito gerado devido a escolha do tipo de distribuição temporal da chuva, são apresentadas, no anexo 2, as hidrógrafas de vazão determinadas pelo modelo de trabalho a cada período analisado com uso de uma distribuição uniforme da chuva. As figuras 8.12 e 8.13 ilustram essas diferenças.

Nota-se claramente que, a representação do processo hidrológico fica comprometido pela adoção de uma distribuição uniforme, principalmente em períodos de intensas ocorrências de precipitações. A uniformidade gera situações de perda de informações e dessa forma idealização de falsa realidade.

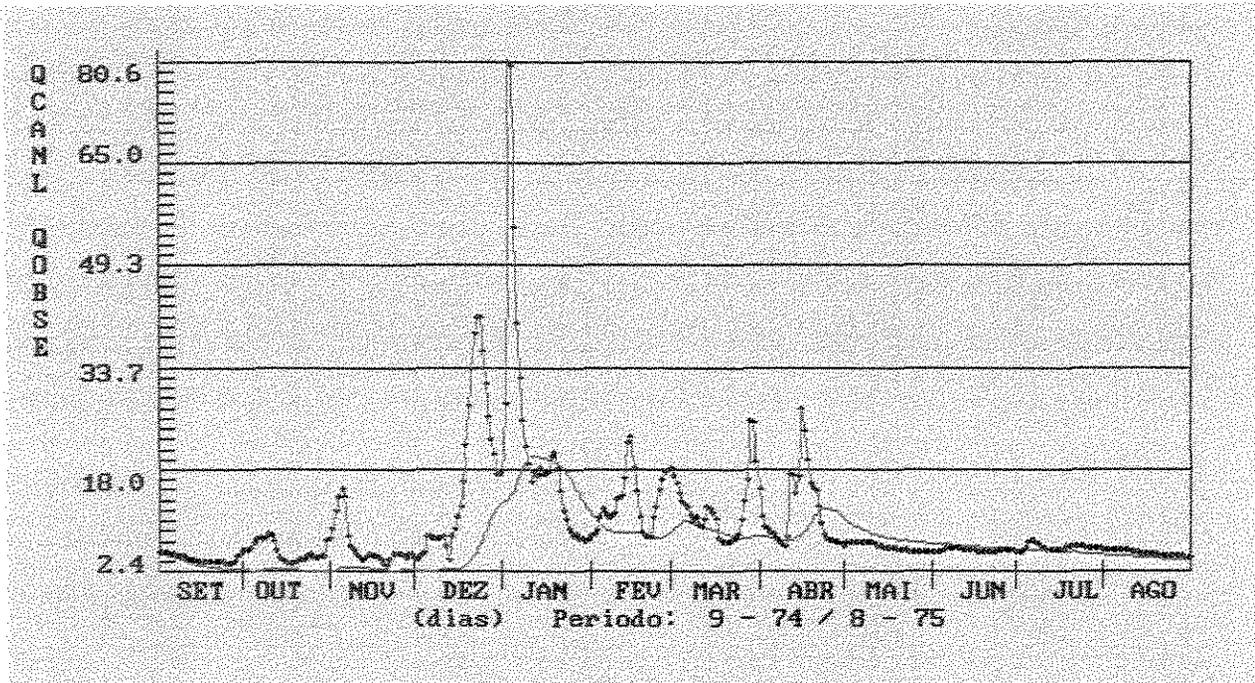


Figura 8.12 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) segundo a distribuição uniforme.

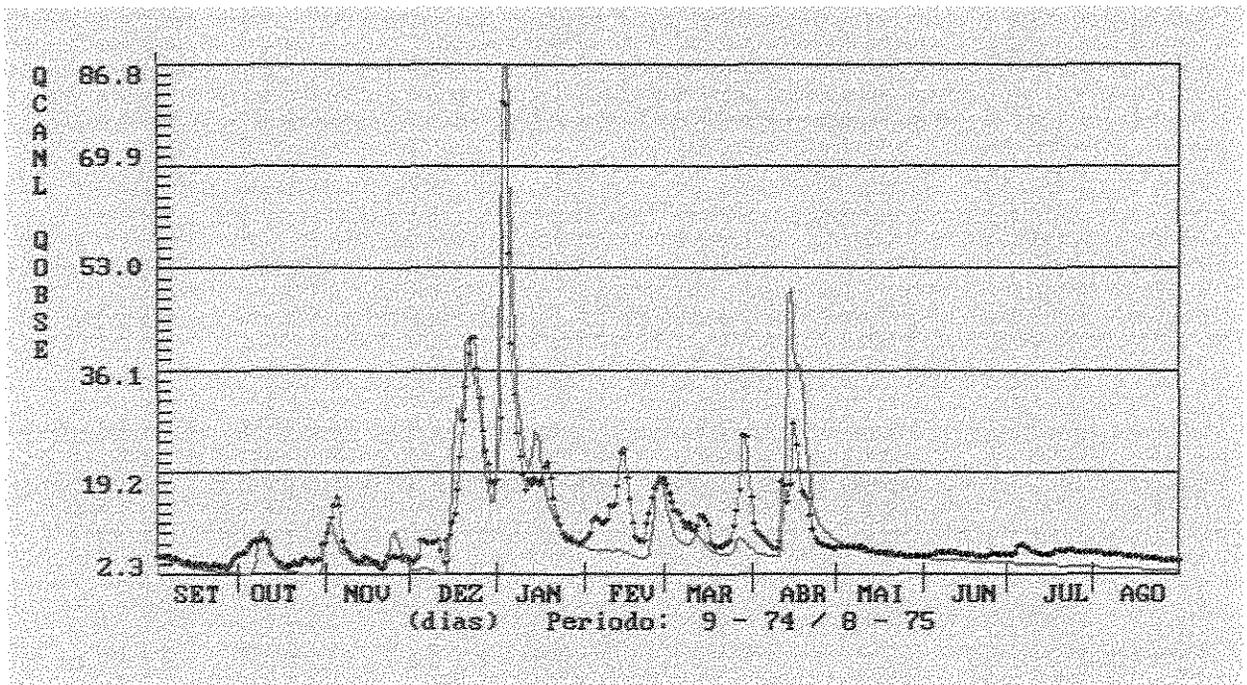


Figura 8.13 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva azul) segundo a distribuição característica.

---

## **Etapa 6 –Tentativa de verificação da inconsistência aos dados observados pertencentes a bacia do Aguapei.**

A qualidade de dados observados, tanto de chuva quanto vazão representam um papel fundamental na obtenção de resultados confiáveis quando utilizados em modelos hidrológicos ou mesmo no uso cotidiano. Porém pode ocorrer situações em que os dados coletados na área de interesse carreguem consigo imprecisões de magnitudes diversas. Tais inconsistências levam a geração de uma falsa realidade, mascarando assim fatos de ocorrência real ou enfocando dessa forma situações não reais ou até mesmo inexistentes.

A qualidade do dado hidrológico está ligada a diversos fatores, dos quais destacam-se principalmente aqueles relacionados ao aparelho utilizado, podendo este inclusive apresentar algum tipo de defeito a princípio não notado na sua instalação; e, na aquisição desse dado pelo observador que pode se enganar quando na retirada da leitura do aparelho. Geralmente esse tipo de ocorrência é muito variável, sendo própria de observador para observador e tornando-se assim um fator muito relativo.

Prever a não ocorrência de tais acontecimentos é difícil. O que se aconselha é que sempre diante desse tipo de situação seja realizada, se possível, uma verificação de todos os dados até então conhecidos.

Na pesquisa desenvolvida não se realizou um estudo específico para verificar a ocorrência de imprecisões nos dados observados. No entanto, notam-se algumas inconsistências, como no exemplo apresentado na figura 8.14. Nesse sentido procura-se destacar a importância da qualidade de um dado hidrológico. O período escolhido está compreendido entre fev/mar de 1976. É mostrada a comparação entre o hidrograma observado (curva vermelha) e o próprio hietograma da chuva (curva verde), apresentado em unidade de vazão. Nota-se que, no mês de fevereiro, a hidrógrafa de vazão observada apresenta um pico que é formado antes da chegada de uma grande chuva representada pela curva verde.

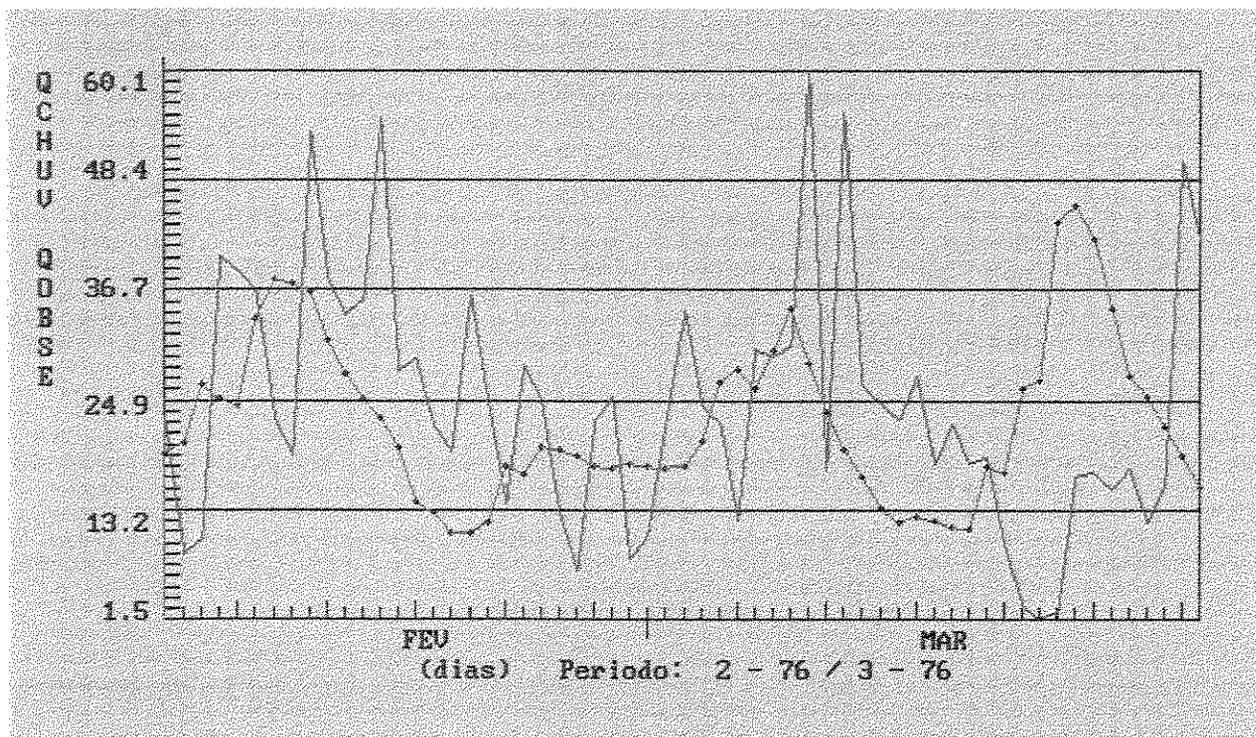


Figura 8.14 – Comparação entre hidrograma observado (curva vermelha) e hietograma de chuva (curva verde) – verificação de imprecisões nos dados observados.

### 8.3 Resultados Obtidos pelo Modelo de Trabalho as Bacias dos rios Capivari-Monos e Itatinga.

Na bacia do rio Capivari-Monos desenvolveu-se o estudo com a utilização de intervalos horários na análise dos eventos de enchentes. A escolha desta bacia foi feita devido às suas características peculiares com índices pluviométricos bastante altos, onde a altura anual média é da ordem de 2500 mm e grande variabilidade na área, com totais anuais médios variando entre 1800 mm no seu limite interior e 3500 mm na parte mais chuvosa próxima a escarpa da serra. Além disso, sua cobertura vegetal é toda de floresta fechada da mata atlântica e seu solo raso é bastante rochoso próximo a superfície.

---

Dessa forma, conhecendo-se algumas informações da localidade foi realizado então a coleta de dados. Nesta fase foi necessário a busca de informações de chuva nos postos pluviométricos e pluviográficos.

Por ser uma bacia com estas características e de pequenas dimensões, 95.1 Km<sup>2</sup>, é mínima a disponibilidade de dados contínuos em intervalos horários. Apesar disto, considerou-se que seria interessante a aplicação do modelo de trabalho procurando explorar as informações contidas nos poucos dados e, analisar uma localidade, de particular importância, quanto à hidrologia.

Definido quais os postos a serem utilizados, conforme apresentados no item 8.1 deste capítulo, iniciou-se os processamentos de cada evento com o modelo de trabalho. Das 7 enchentes escolhidas a princípio para análise, 3 foram de imediato descartadas devido a ausência de dados de chuva nos dias em que foram registradas as maiores ondas de cheia.

Com os outros 4 eventos restantes definiu-se o conjunto “ ótimo ” de parâmetros de infiltração a cada método aplicado. Observe que nas tabelas 8.27, 8.30 e 8.32 a discrepância apresentada entre os valores de vazão (calculada x observada) estimados pelo modelo a cada evento analisado é significativa, gerando neste caso um baixo coeficiente de correlação, inclusive, para certos eventos, valores negativos.

É apresentado nas tabelas 8.28, 8.29 e 8.31 os valores de parâmetros determinados pelo modelo de trabalho e, para melhor visualização dos eventos ocorridos na bacia, as hidrógrafas de vazão dadas nas figuras 8.15 a 8.26.

Tabela 8.27 – Valores de vazão e coeficiente de correlação para as enchentes da bacia do rio Capivari-Monos – método de Green & Ampt.

<b>Evento (enchente)</b>	<b>Método</b>	<b>Q calculada (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q observada (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Coeficiente de correlação</b>
jan/76	<b>G &amp; A</b>	79,338	78,150	- 0,08
mar/78		28,765	28,765	0,10
nov/79		9,877	26,139	- 0,66
abr/81		34,370	34,370	- 0,77

Tabela 8.28 – Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Green & Ampt para as enchentes analisadas – bacia do rio Capivari-Monos.

<b>Modelo LABSHI – versão horária (Green &amp; Ampt)</b>	
<b>Parâmetros de infiltração</b>	<b>Valores “ótimos”</b>
CINFINI - Valor inicial da capacidade de infiltração (mm/h)	1.21
EVASUP – coeficiente da evaporação – superfície	0.61
EVASOL – coeficiente da evaporação – subsolo	0.49
KHS – condutividade hidráulica saturada (mm/h)	3.41
SUC – altura de sucção capilar (mm)	9.0
TETS – umidade de saturação do solo	0.5
VCC – capacidade de campo do solo (%)	0.16
KSUP – coeficiente de deflúvio superficial	0.73
KSSP – coef. separação escoamento subsuperficial-subterrâneo.	1.0
KSBT – coeficiente de deflúvio subterrâneo	1.0
NSUP – expoente para o deflúvio superficial	0.6
NSSP – expoente para o deflúvio sub-superficial	1.0
NSUB – expoente para o deflúvio subterrâneo	1.0

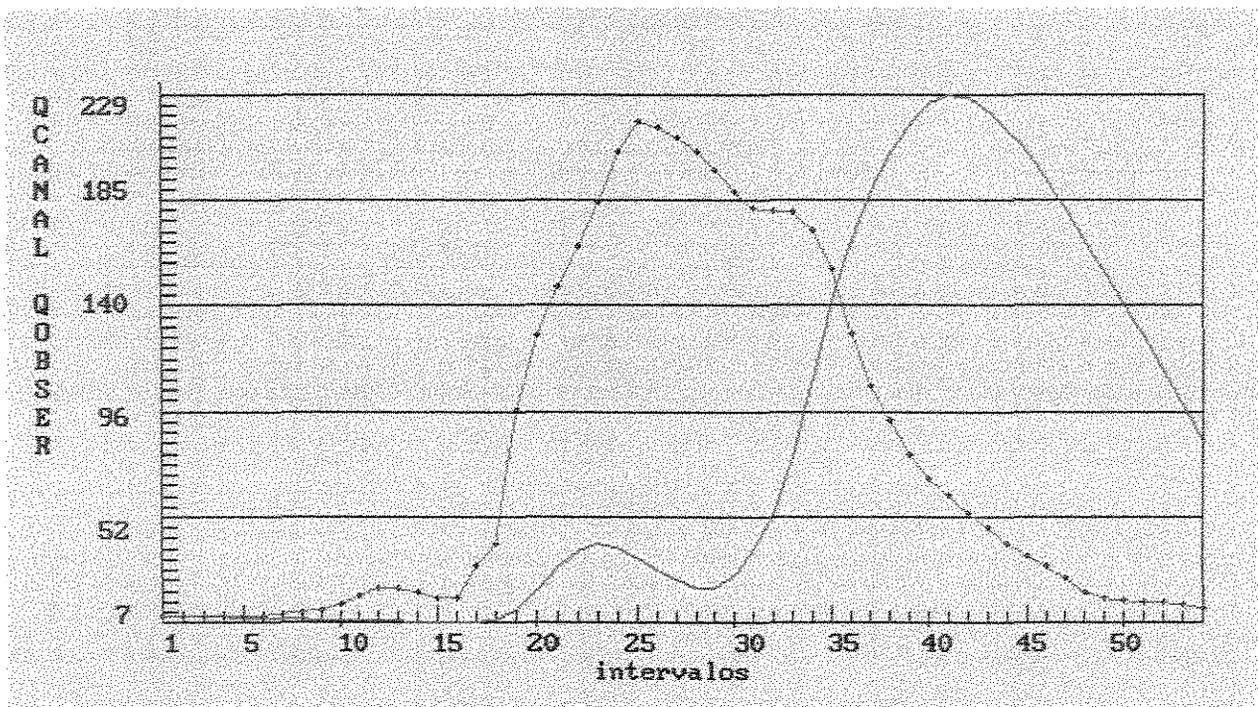


Figura 8.15 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Green & Ampt para a enchente de jan/76.

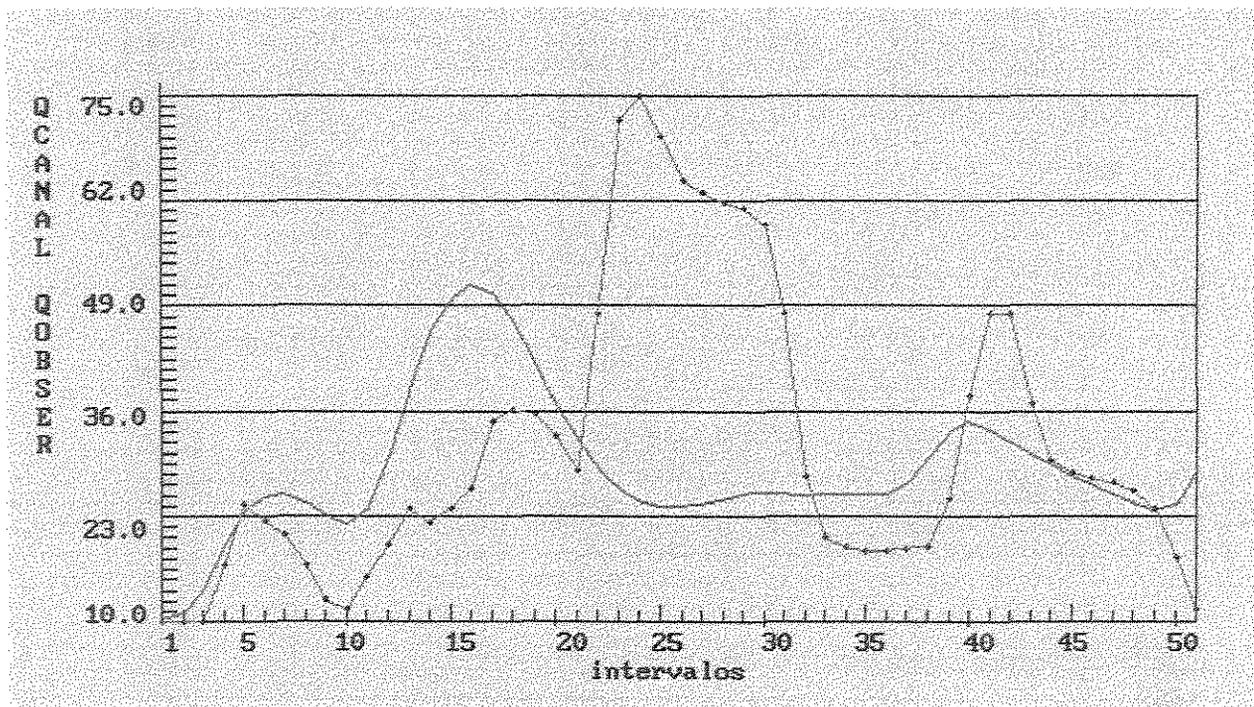


Figura 8.16 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) – método de Green & Ampt para a enchente de mar/78.

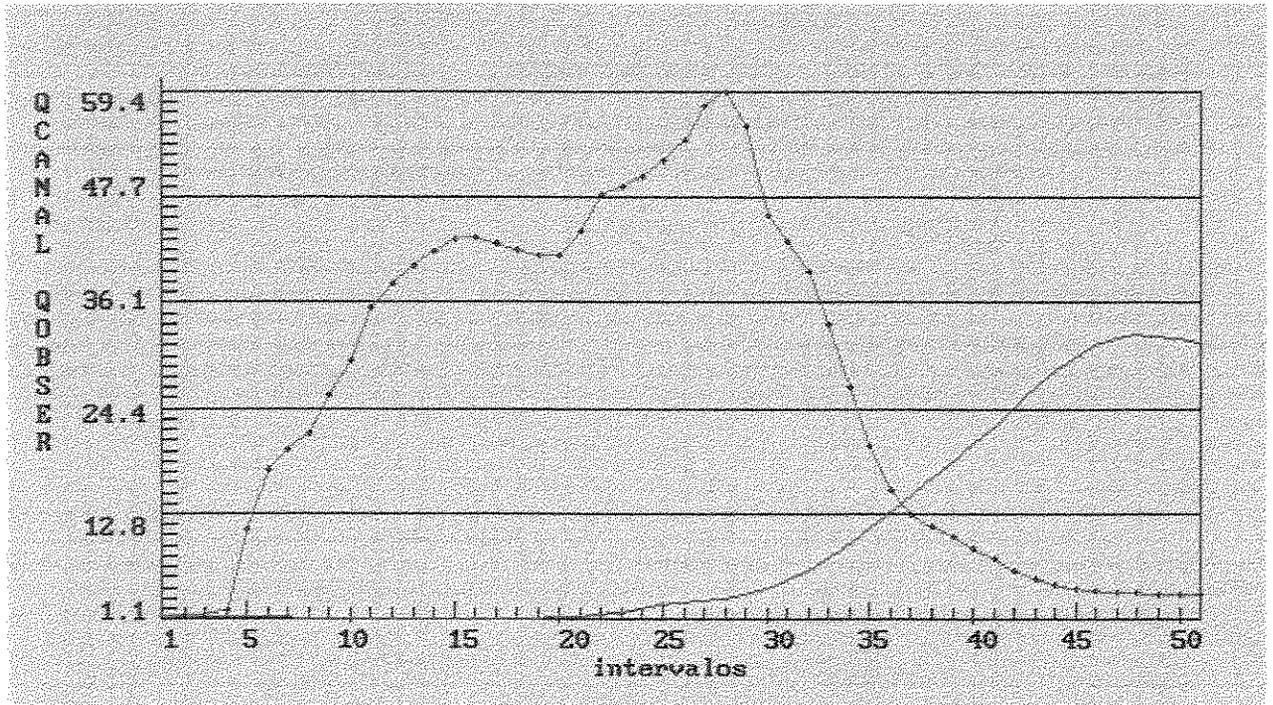


Figura 8.17 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Green & Ampt para a enchente de nov/79.

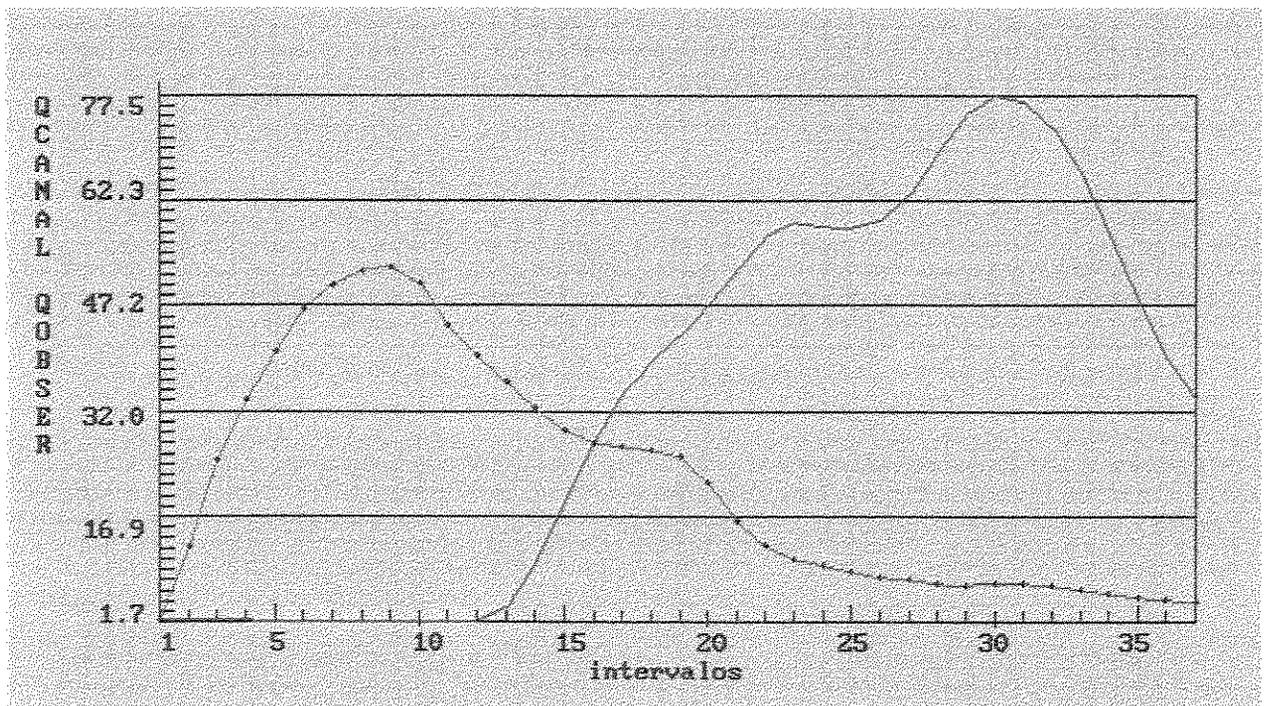


Figura 8.18 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Green & Ampt para a enchente de abr/81.

Tabela 8.29 – Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Diskin & Nazimov para as enchentes analisadas – bacia do rio Capivari-Monos.

<b>Modelo LABSHI – versão horária ( Diskin &amp; Nazimov )</b>	
<b>Parâmetros de infiltração</b>	<b>Valores “ótimos”</b>
SMAX – capacidade máxima de umidade do solo (mm)	12
VCC – capacidade de campo do solo (%)	0.16
IFC – capacidade mínima de infiltração (mm/h)	0.2
EVASUP – coeficiente da evaporação – superfície	0.61
EVASOL – coeficiente da evaporação – subsolo	0.65
KSUP – coeficiente de deflúvio superficial	0.5
KSSP – coef. separação escoamento subsuperficial-subterrâneo.	1.0
NSUP – expoente para o deflúvio superficial	0.65
IFI – capacidade inicial de infiltração (mm/h)	1.21

Tabela 8.30 – Valores de vazão e coeficiente de correlação para as enchentes da bacia do rio Capivari-Monos – método de Diskin & Nazimov.

<b>Evento (enchente)</b>	<b>Método</b>	<b>Q calculada (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q observada (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Coeficiente de correlação</b>
jan/76	<b>D &amp; N</b>	78.964	78.150	- 0.09
mar/78		27.676	31.596	0.37
nov/79		15.805	26.139	- 0.58
abr/81		37.532	22.054	- 0.82

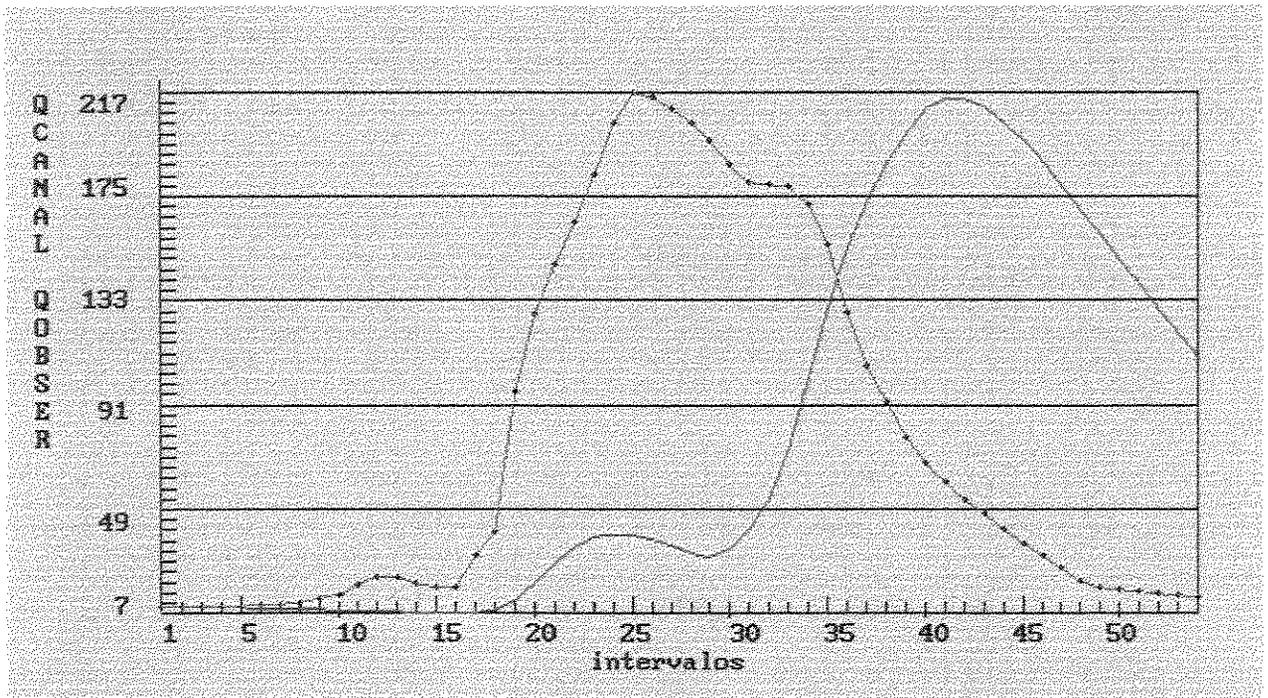


Figura 8.19 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Diskin & Nazimov para a enchente de jan/76.

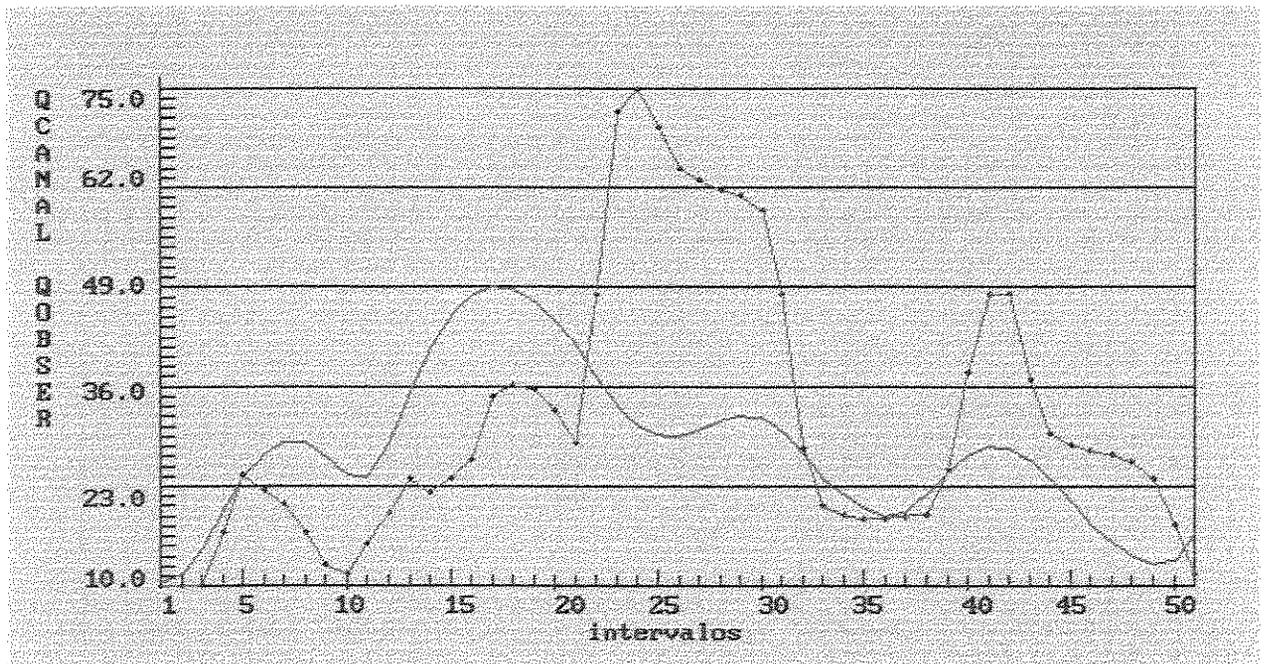


Figura 8.20 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Diskin & Nazimov para a enchente de mar/78.

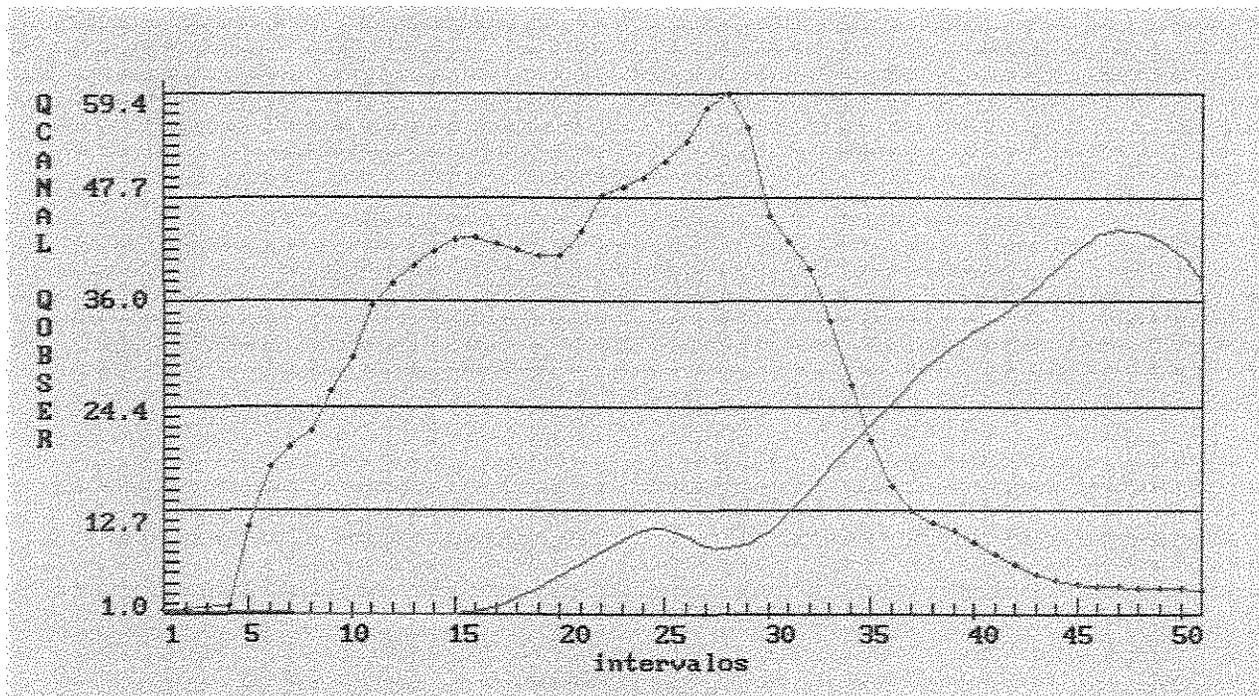


Figura 8.21 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Diskin & Nazimov para a enchente de nov/79.

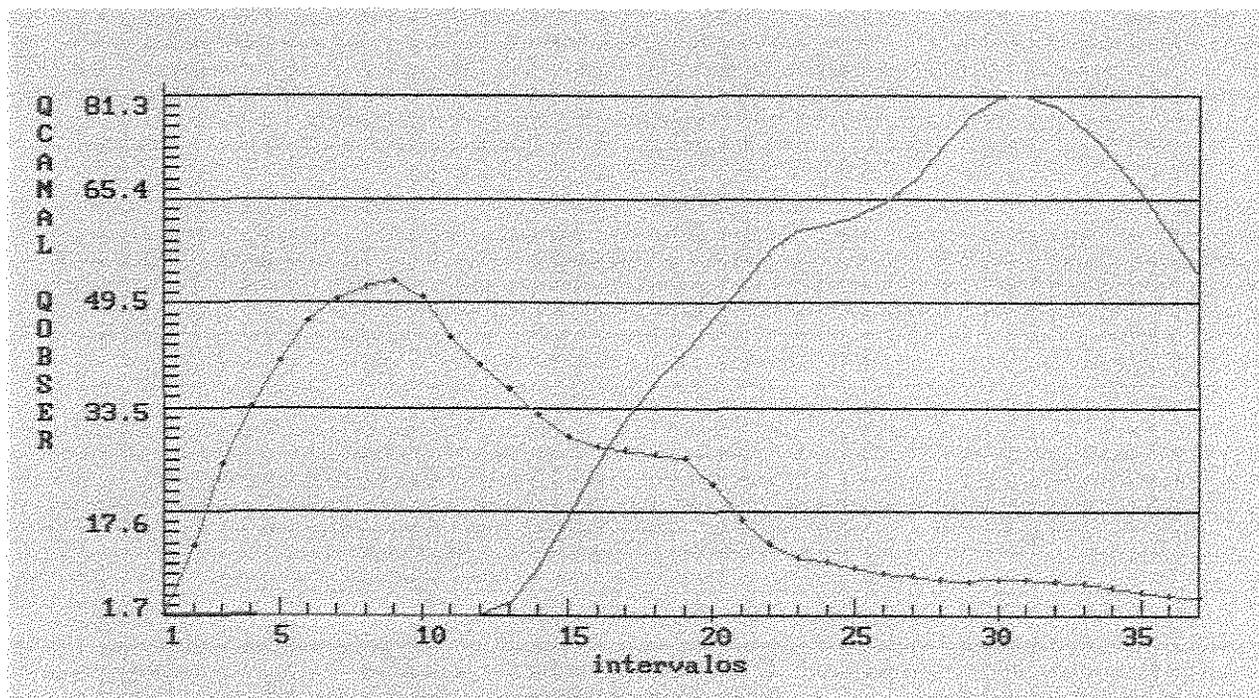


Figura 8.22 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Diskin & Nazimov para a enchente de abr/81.

Tabela 8.31 – Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Tan & O’Connor para as enchentes analisadas – bacia do rio Capivari-Monos.

<b>Modelo LABSHI – versão horária ( Tan &amp; O’Connor )</b>	
<b>Parâmetros de infiltração</b>	<b>Valores “ótimos”</b>
SMAX – capacidade máxima de umidade do solo (mm)	12
VCC – capacidade de campo do solo (mm)	0.16
IFC – capacidade mínima de infiltração (mm/h)	0.2
EVASUP – coeficiente da evaporação – superfície	0.6
EVASOL – coeficiente da evaporação – subsolo	0.5
KSUP – coeficiente de deflúvio superficial	1.8
KSSP – coef. separação escoamento subsuperficial-subterrâneo.	1.3
NSUP – expoente para o deflúvio superficial	1.21
ALFA – coeficiente da função exponencial de infiltração	1.0
IFI – capacidade inicial de infiltração (mm/h)	0.74

Tabela 8.32 – Valores de vazão e coeficiente de correlação para as enchentes da bacia do rio Capivari-Monos – método de Tan & O’Connor.

<b>Evento (enchente)</b>	<b>Método</b>	<b>Q calculada (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q observada (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Coeficiente Correlação</b>
jan/76	T & C	48.366	78.150	0.33
mar/78		18.821	31.596	- 0.07
nov/79		9.774	26.139	- 0.54
abr/81		22.847	22.054	- 0.63

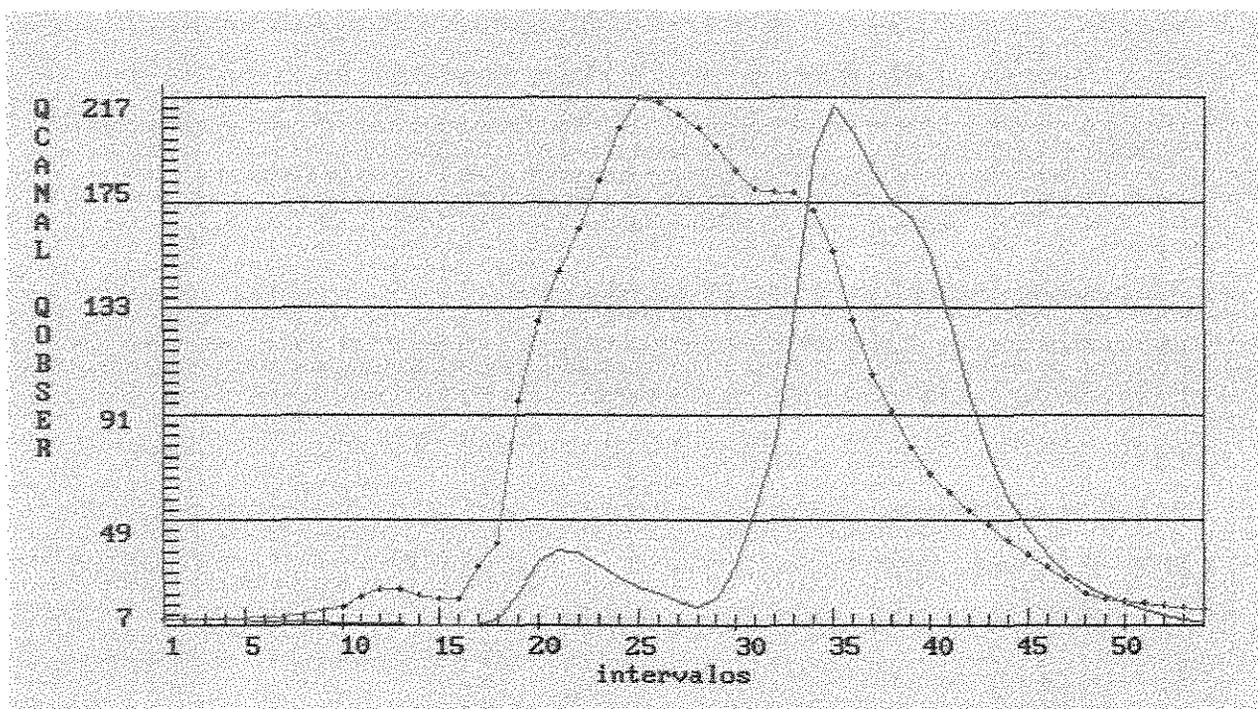


Figura 8.23 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Tan & O'Connor para a enchente de jan/76.

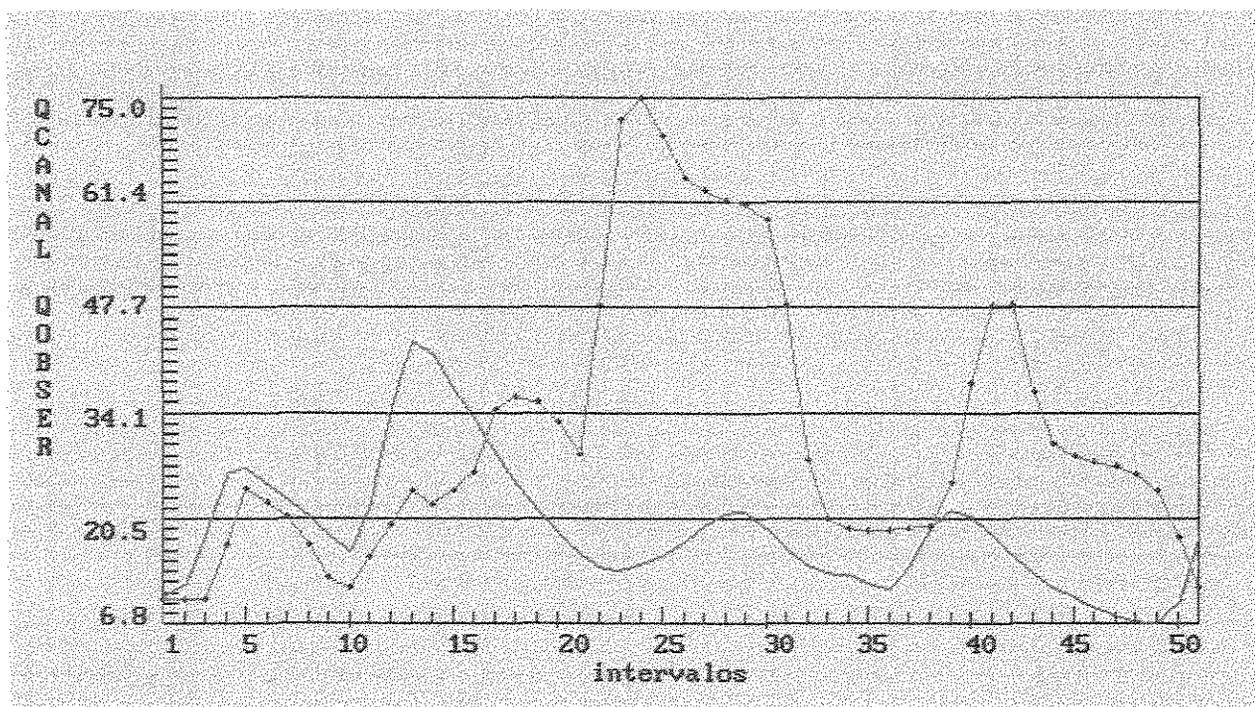


Figura 8.24 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Tan & O'Connor para a enchente de mar/78.

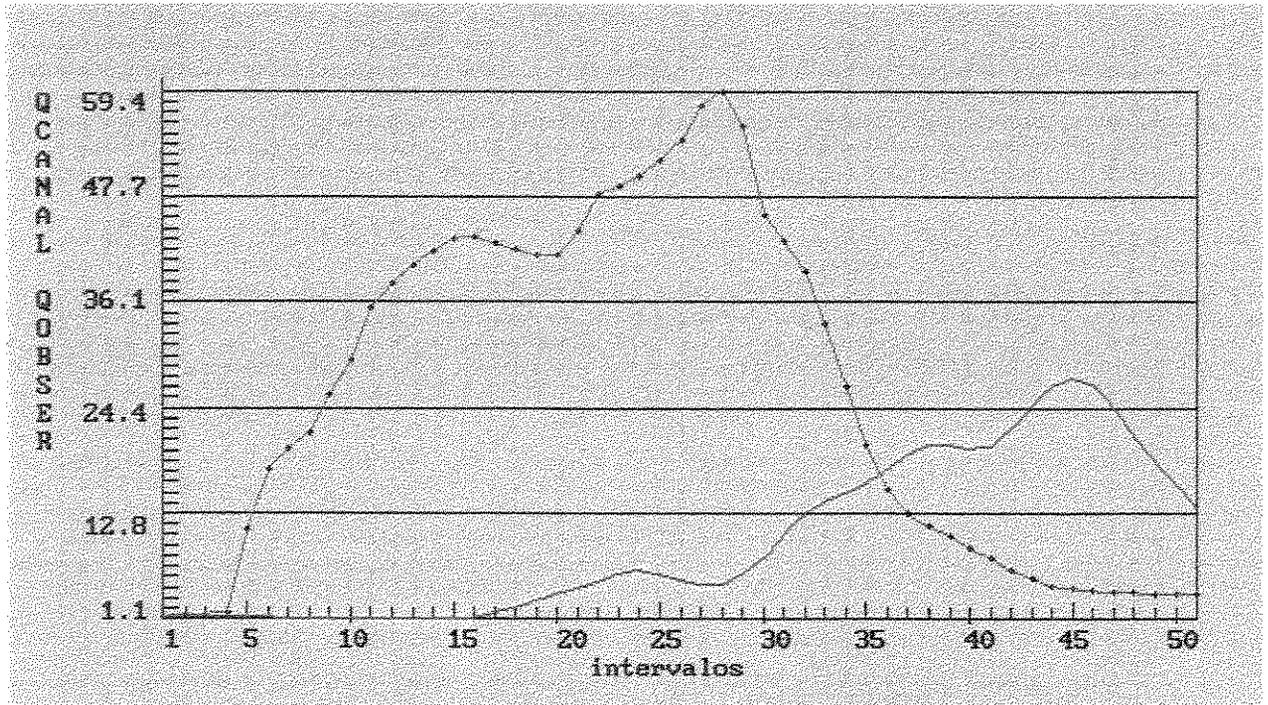


Figura 8.25 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Tan & O'Connor para a enchente de nov/79.

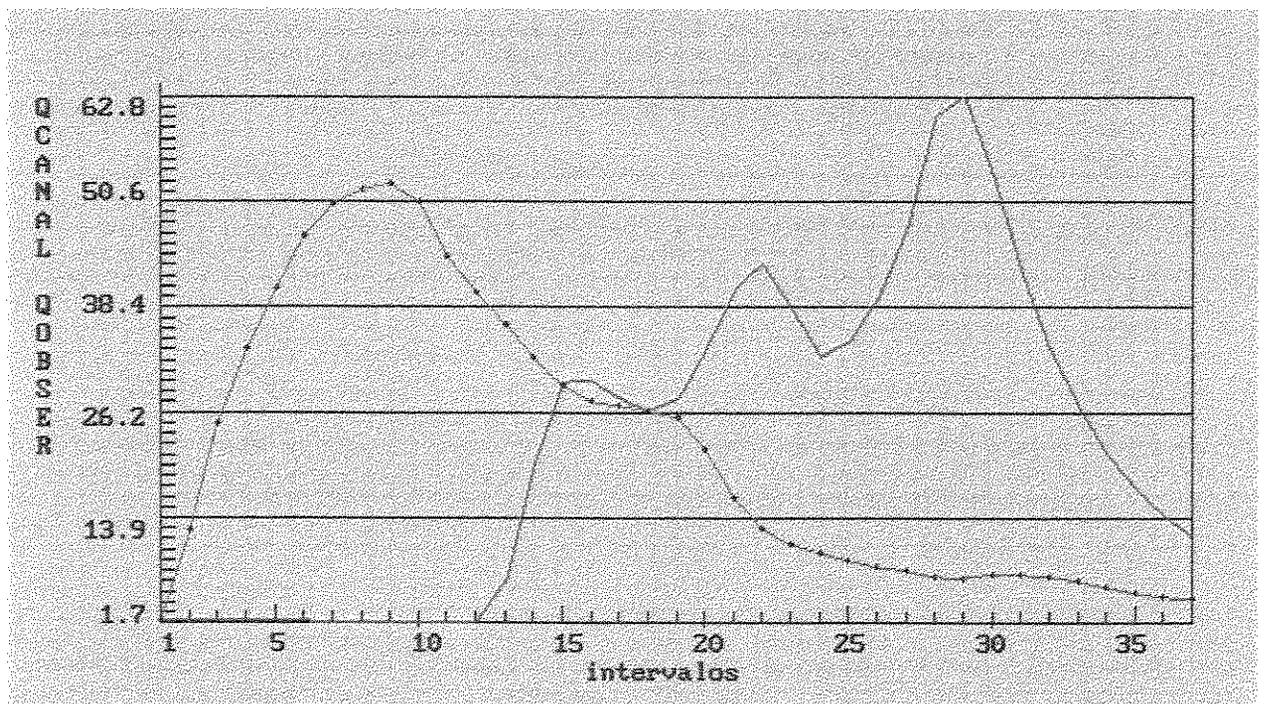


Figura 8.26 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Tan & O'Connor para a enchente de abr/81.

Nota-se pela análise das figuras apresentadas que os dados coletados dos postos pluviográficos Pilões e Curva da Onça, localizados próximos a bacia do rio Capivari-Monos não representam, de forma correta, a onda de cheia registrada na seção fluviométrica de estudo. Diante dessa situação, buscou-se analisar uma outra bacia, localizada na mesma região, e com as mesmas características, ou seja, região extremamente chuvosa e disposta na vertente atlântica – serra do mar. A bacia do rio Itatinga, de área de 98.76 Km<sup>2</sup> foi adotada no estudo de eventos, sendo para tanto utilizadas as seguintes enchentes com dados disponíveis: dez/86, mar/87 e fev/88. O posto base foi tomado como sendo o posto pluviográfico localizado na bacia. No entanto, pela falta de dados de evaporação na bacia do rio Itatinga, tomou-se os valores médios diários do posto Casagrande apesar da localização próxima a bacia do rio Capivari-Monos, já que existe a semelhança entre as bacias. O conjunto de valores “ótimo” de parâmetros de infiltração para esta bacia, vazões calculada e observada segundo a utilização dos métodos propostos são apresentados nas tabelas 8.33 a 8.38, assim como as hidrógrafas para cada evento em questão.

Tabela 8.33 – Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Green & Ampt para as enchentes analisadas – bacia do rio Itatinga.

<b>Modelo LABSHI – versão horária ( Green &amp; Ampt )</b>	
<b>Parâmetros de infiltração</b>	<b>Valores “ótimos”</b>
CINFINI - Valor inicial da capacidade de infiltração (mm/h)	0.42
EVASUP – coeficiente da evaporação – superfície	0.3
EVASOL – coeficiente da evaporação – subsolo	0.4
KHS – condutividade hidráulica saturada (mm/h)	2.8
SUC – altura de sucção capilar (mm)	9.0
TETS – umidade de saturação do solo	0.4
VCC – capacidade de campo do solo (%)	0.16
KSUP – coeficiente de deflúvio superficial	1.5
KSSP – coef. separação escoamento subsuperficial-subterrâneo.	1.0
KSBT – coeficiente de deflúvio subterrâneo	1.0
NSUP – expoente para o deflúvio superficial	0.81
NSSP – expoente para o deflúvio sub-superficial	1.0

Tabela 8.34 – Valores de vazão e coeficiente de correlação para as enchentes da bacia do rio Itatinga – método de Green & Ampt.

Evento (enchente)	Método	Q calculada (m <sup>3</sup> /s)	Q observada (m <sup>3</sup> /s)	Coefficiente de correlação
dez/86	G & A	95.586	146.690	0.92
mar/87		92.234	76.500	0.56
fev/88		106.738	116.196	0.93

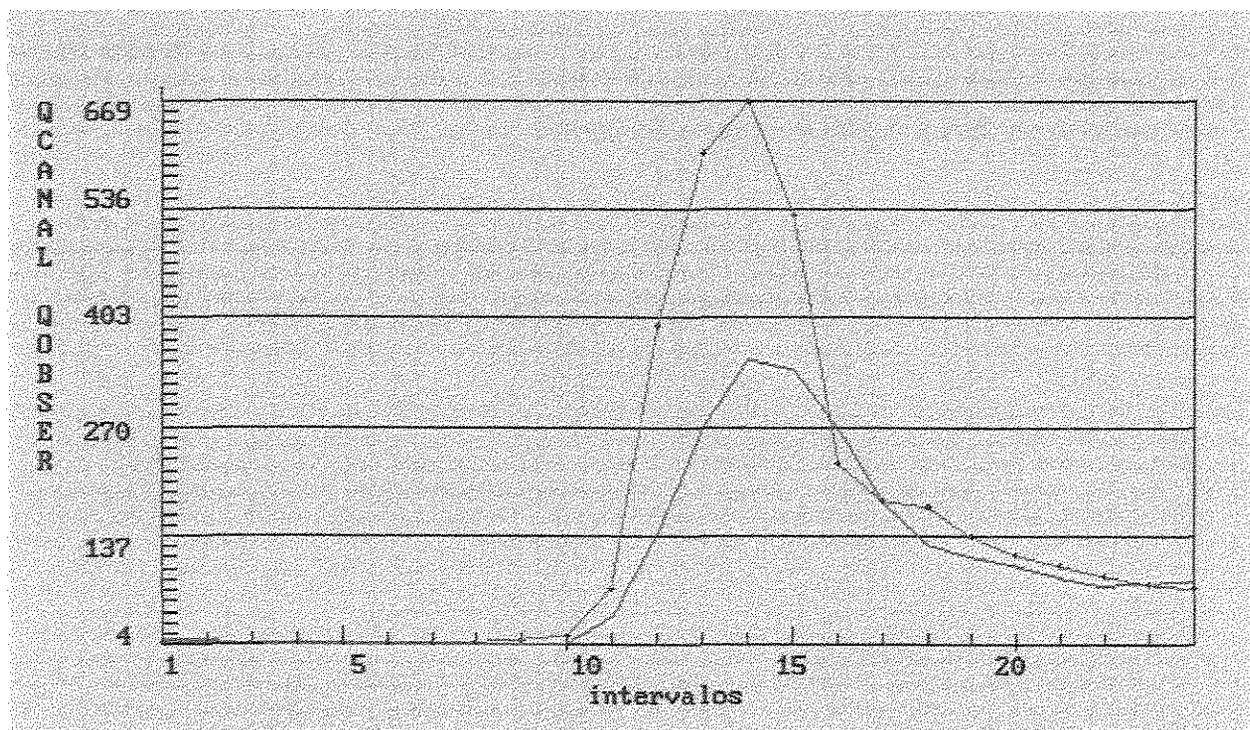


Figura 8.27 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Green & Ampt para a enchente de dez/86.

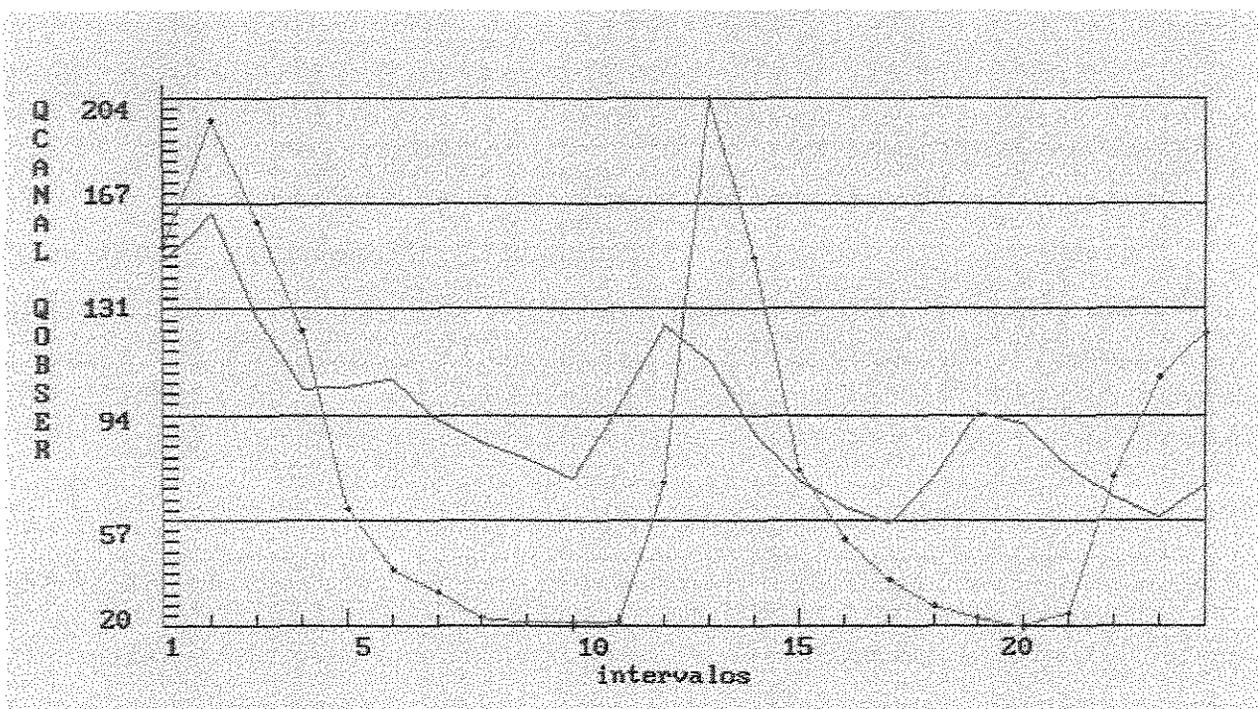


Figura 8.28 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Green & Ampt para a enchente de mar/87.

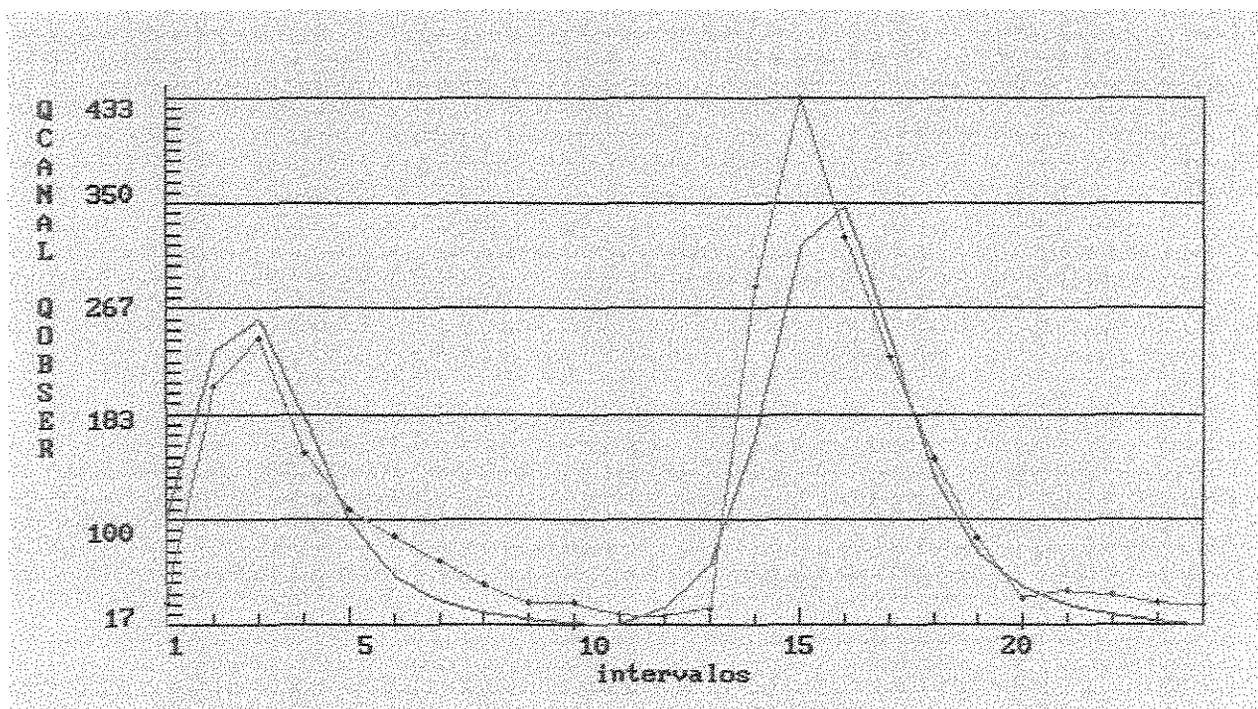


Figura 8.29 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha ) - método de Green & Ampt para a enchente de fev/88.

Tabela 8.35 – Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Diskin & Nazimov para as enchentes analisadas – bacia do rio Itatinga.

<b>Modelo LABSHI – versão horária ( Diskin &amp; Nazimov )</b>	
<b>Parâmetros de infiltração</b>	<b>Valores “ótimos”</b>
SMAX – capacidade máxima de umidade do solo (mm)	12
VCC – capacidade de campo do solo (%)	0.16
IFC – capacidade mínima de infiltração (mm/h)	0.1
EVASUP – coeficiente da evaporação – superfície	0.3
EVASOL – coeficiente da evaporação – subsolo	0.4
KSUP – coeficiente de deflúvio superficial	1.48
KSSP – coef. separação escoamento subsuperficial-subterrâneo.	1.0
NSUP – expoente para o deflúvio superficial	1.3
IFI – capacidade inicial de infiltração (mm/h)	0.42

Tabela 8.36 – Valores de vazão e coeficiente de correlação para as enchentes da bacia do rio Itatinga – método de Diskin & Nazimov.

<b>Evento (enchente)</b>	<b>Método</b>	<b>Q calculada (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q observada (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Coeficiente Correlação</b>
dez/86	<b>D &amp; N</b>	101.776	146.690	0.96
mar/87		123.161	76.500	0.43
fev/88		124.560	116.196	0.95

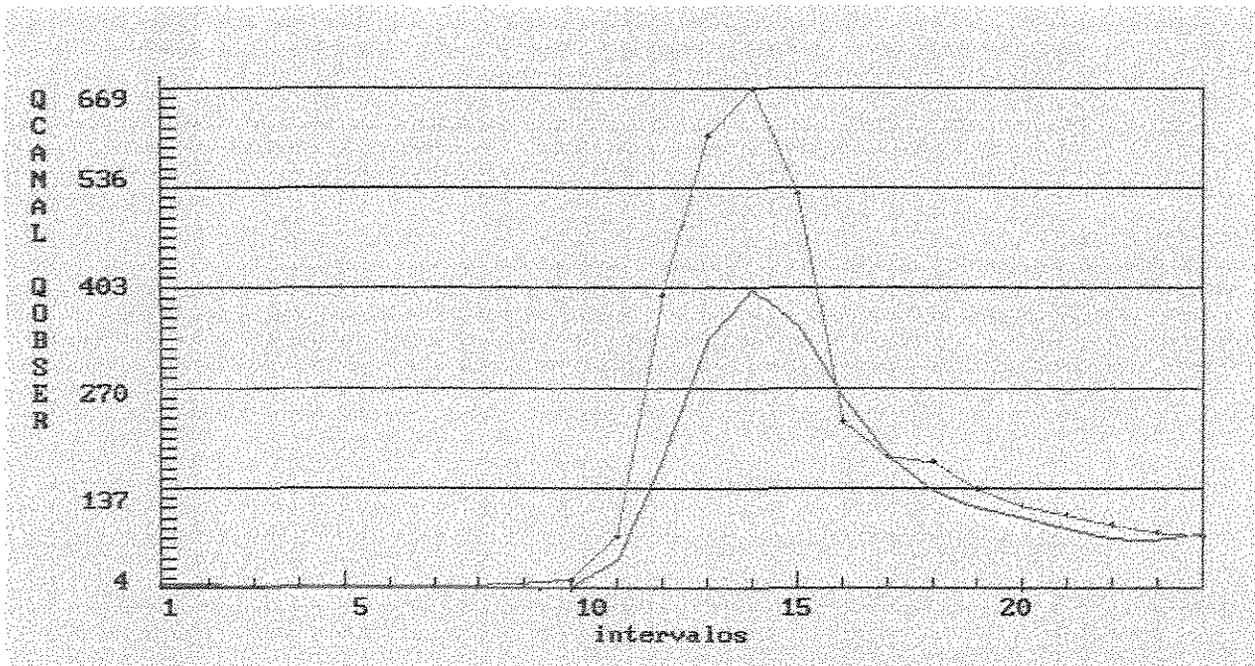


Figura 8.30 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Diskin & Nazimov para a enchente de dez/86.

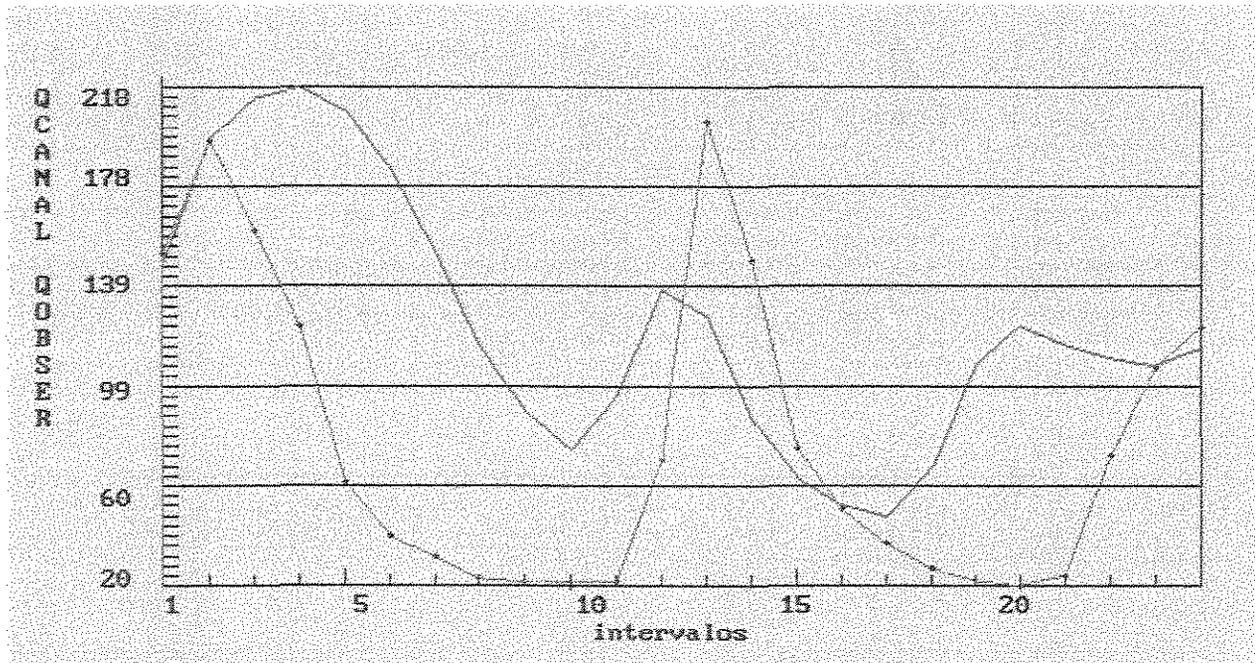


Figura 8.31 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Diskin & Nazimov para a enchente de mar/87.

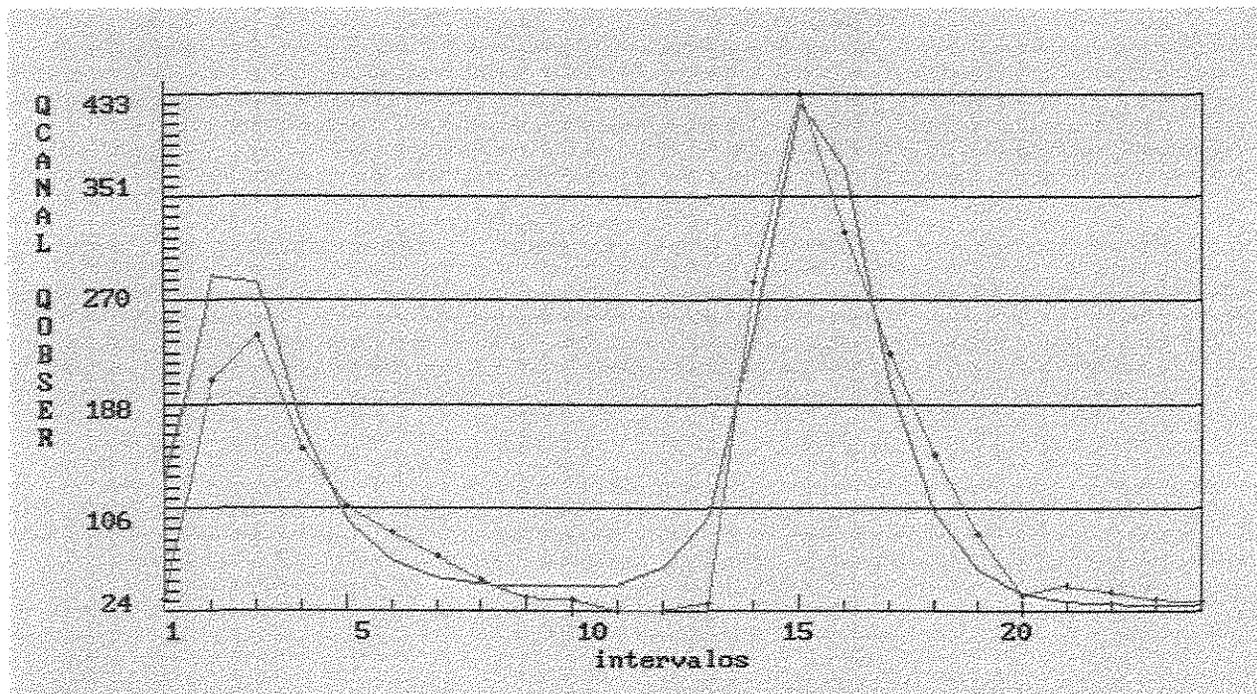


Figura 8.32 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Diskin & Nazimov para a enchente de fev/88.

Tabela 8.37 – Conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração determinados através do método de Tan & O’Connor para as enchentes analisadas – bacia do rio Itatinga.

<b>Modelo LABSHI – versão horária ( Tan &amp; O’Connor )</b>	
<b>Parâmetros de infiltração</b>	<b>Valores “ótimos”</b>
SMAX – capacidade máxima de umidade do solo (mm)	12
VCC – capacidade de campo do solo (mm)	0.16
IFC – capacidade mínima de infiltração (mm/h)	0.1
EVASUP – coeficiente da evaporação – superfície	0.3
EVASOL – coeficiente da evaporação – subsolo	0.4
KSUP – coeficiente de deflúvio superficial	0.94
KSSP – coef. separação escoamento subsuperficial-subterrâneo.	1.3
NSUP – expoente para o deflúvio superficial	0.42
ALFA – coeficiente da função exponencial de infiltração	1.0
IFI – capacidade inicial de infiltração (mm/h)	1.23

Tabela 8.38 – Valores de vazão e coeficiente de correlação para as enchentes da bacia do rio Itatinga – método de Tan & O’Connor.

Evento (enchente)	Método	Q calculada (m <sup>3</sup> /s)	Q observada (m <sup>3</sup> /s)	Coefficiente Correlação
dez/86	T & C	52.727	146.690	0.96
mar/87		76.731	76.500	0.59
fev/88		62.220	116.196	0.94

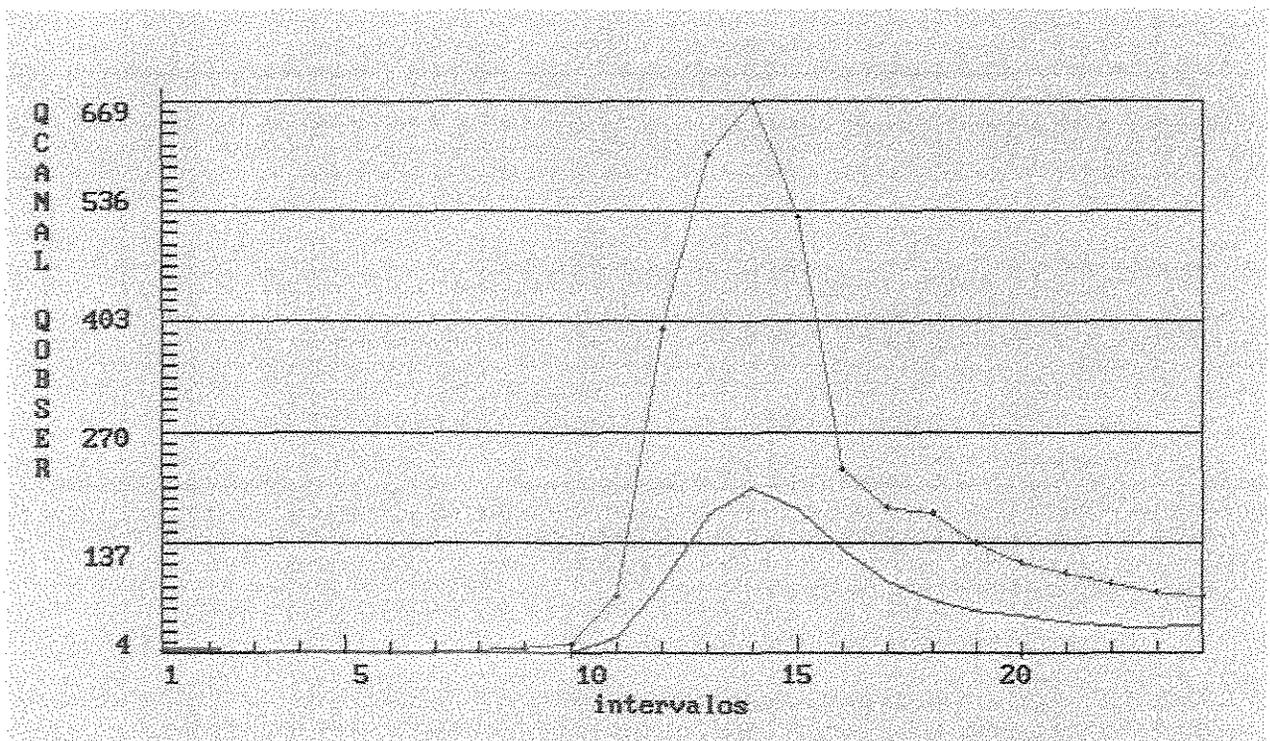


Figura 8.33 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Tan & O’Connor para a enchente de dez/86.

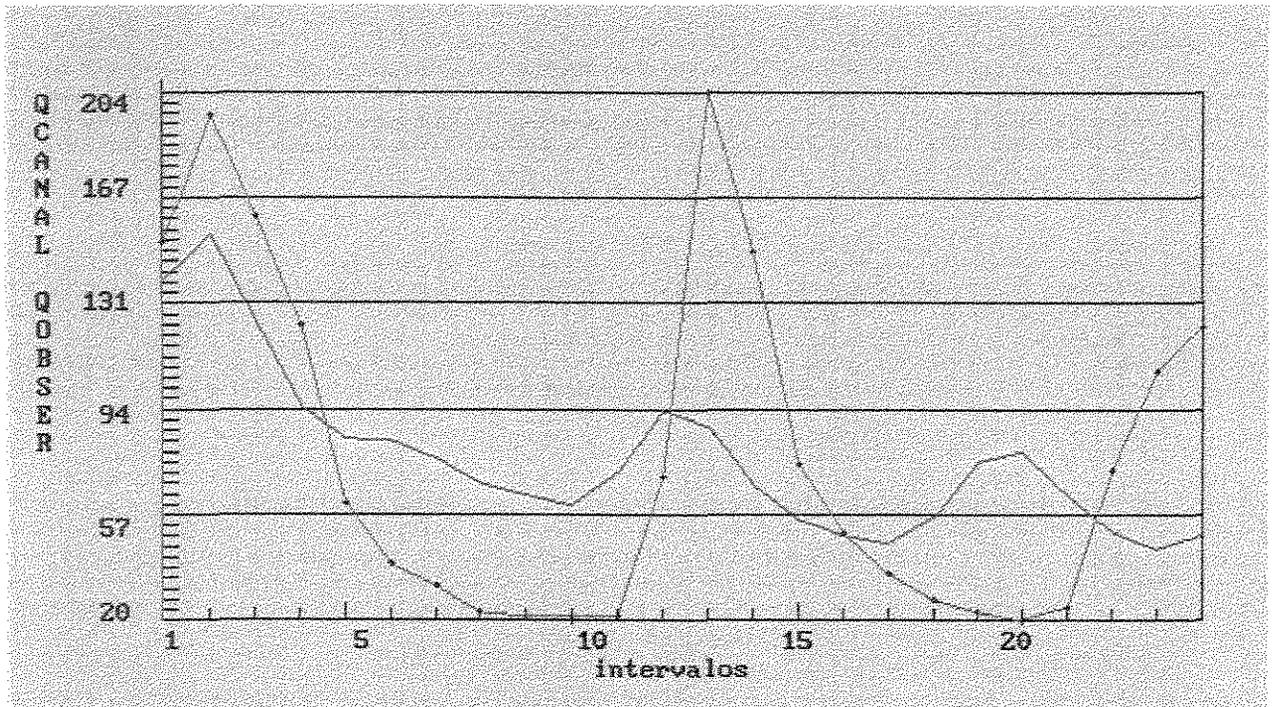


Figura 8.34 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Tan & O'Connor para a enchente de mar/87.

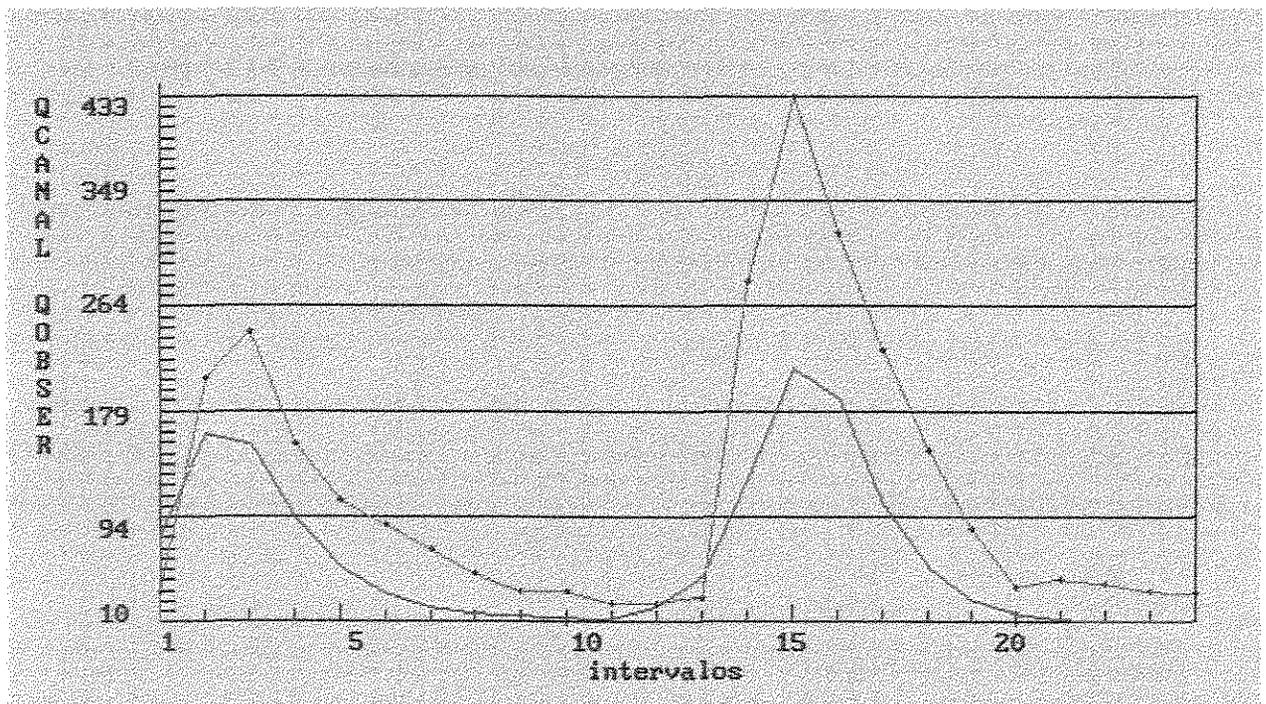


Figura 8.35 – Hidrógrafa de vazão calculada (curva verde) e observada (curva vermelha) - método de Tan & O'Connor para a enchente de fev/88.

Com as respostas geradas pelo modelo de trabalho para as bacias dos rios Capivari-Monos e Itatinga verifica-se a deficiência dos dados de chuva dessa região no estado de São Paulo. Diante da análise a cada método nessas duas localidades percebe-se a dificuldade de realização de um estudo comparativo do processo de infiltração como era nosso objetivo para essas bacias. O problema basicamente é a amostragem de chuva na área que é bastante deficitária, no entanto deve-se lembrar que é o tipo de informação que se conhece disponível do local.

#### 8.4 Comparação dos Valores de Parâmetros de Infiltração.

Os valores de parâmetros de infiltração são comparados neste item com a finalidade de mostrar a grande variabilidade apresentada nas tabelas disponíveis na literatura em termos de valores úteis. Os valores são disponíveis na grande maioria dos trabalhos técnicos desenvolvidos envolvendo o processo de infiltração. Vale a pena ressaltar a importância destes parâmetros uma vez que, a escolha dependendo da sua grandeza gera resposta imprecisa e irreal. A tabela 8.39 apresenta alguns dos parâmetros conforme uso dos métodos e equações propostas no estudo. Para tanto tomou-se apenas os valores de parâmetros relacionados a bacia do Aguapei.

Tabela 8.39 – Comparação dos valores de parâmetros de infiltração apresentados na literatura técnica e valores determinados no estudo pelo modelo de trabalho.

Fonte	KHS (mm/h)	SUC (mm)	SMAX (mm)	IFI (mm/h)	IFC (mm/h)
LABSHI	2.13	9,8	60	4.1	3.0
Tabela 5.1	6.8 – 25.9				
Tabela 5.2	1.051 – 50.04				
Tabela 5.3		74.3 – 238.3			
Tabela 5.4	0.31 – 7.78				
Tabela 5.5					0.947 – 1.198
Tabela 5.6			8.0 – 11.9	174 - 204	5.10 – 16.02

A análise destes parâmetros apresentados aqui nos indica que é necessário um certo cuidado ao adotar valores da literatura. É muito mais adequado procurar utilizar e calibrar um modelo para a própria bacia. A própria variabilidade entre diferentes fontes mostra isso, como por exemplo para o parâmetro KHS (condutividade hidráulica saturada), de fundamental importância. Nota-se que na literatura indica nos extremos valores entre 0.31 e 50.04, ou seja, uma variação de mais de 10000 %.

Segundo **Cleary (1989) apud Simões e Magalhães (1991)**, a condutividade hidráulica saturada é um dos poucos parâmetros na natureza para o qual encontram-se variações de mais de doze ordens de grandeza, cerca de um trilhão de vezes.

# 9

## Conclusões

---

Apesar de sua natureza complexa, envolvendo diversas grandezas sujeitas à larga variação espacial e temporal, o fenômeno de infiltração pode ser simulado em modelos hidrológicos do tipo chuva-deflúvio através de metodologias simples e fisicamente significativas, como a equação de Green & Ampt conforme Gupta, o modelo de Diskin & Nazimov e a equação de Tan & O'Connor, mostrando-se eficiente na determinação do conjunto “ótimo” dos parâmetros envolvidos em cada método analisado no modelo de trabalho LABSHI.

Nas bacias do Aguapei, Capivari-Monos e Itatinga, selecionadas no estudo basicamente pelas diversidades apresentadas, verificou-se que, a escassez de dados era considerável e que grande parte das informações coletadas de postos pluviométricos locais apresentavam falhas levando, dessa forma, a limitação do período de estudo para a bacia do Aguapei. Já para as duas outras bacias a realização de um estudo comparativo teve de ser descartada após várias tentativas de correção dos dados locais e simulações realizadas com uso de informações de chuvas horárias, tendo notadamente verificado com as respostas geradas pelo modelo que, a amostragem da chuva na área, que é a única disponível não é suficiente e impossibilita um estudo mais preciso, já que se depende diretamente dessas informações.

Embora tenha surgido dificuldades na determinação desse conjunto de valores devido principalmente ao grande número de variáveis e parâmetros envolvidos no modelo de trabalho e específicos de cada método, foi possível verificar após várias análises realizadas que: a distribuição temporal da chuva na bacia influi de forma decisiva no comportamento da infiltração. Para tanto foram comparados os resultados obtidos com a adoção de distribuição

uniforme e com uma distribuição característica definida após levantamento e característica de um conjunto de chuvas intensas ocorridas numa das localidades de estudo – bacia do Aguapei obtendo melhores representações com a distribuição característica, na aplicação ao modelo LABSHI.

Com relação aos métodos propostos no modelo de trabalho, observa-se para a bacia do Aguapei uma boa representação dos métodos de Green & Ampt, Diskin & Nazimov e Tan & O'Connor, tendo este último em particular apresentado diferenças mais significativas em termos de valores de vazão média do período e menor sensibilidade de ajuste nas ocorrências de picos de vazões elevadas.

Inserido no modelo de trabalho, o método de Green & Ampt, que está relacionado diretamente com as principais propriedades físicas do solo como a condutividade hidráulica saturada e capilaridade, resultou numa melhor representação do processo de infiltração. Ambos os parâmetros apresentam-se pouco sensíveis a alterações em torno do seu valor “ótimo” gerando elevado coeficiente de correlação aos períodos analisados.

Avaliando o método de Diskin & Nazimov verifica-se uma importante característica mediante a comparação das respostas geradas ao método de Green & Ampt. Assumindo que ambos os processos de infiltração e percolação dependem do teor de umidade do solo constatou-se a validade da aplicação desta metodologia na estimativa da infiltração. No momento em que a umidade decresce, sendo representada por uma variável no modelo, há uma maior infiltração no solo e conseqüentemente uma maior percolação, sendo verificada indiretamente pela aumento da vazão média no período.

Por último, o método de Tan & O'Connor foi o que apresentou as maiores diferenças observadas nos períodos analisados, de forma a não comprometer a sua utilização na estimativa da infiltração. Comparações aos outros dois métodos indicou-nos que, mesmo com a aplicação de uma relação empírica do ponto de vista prático, as respostas geradas são representativas e condizem a situação de ocorrência real na bacia do Aguapei. O fato da infiltração estar

intimamente dependente do teor de umidade do solo tal situação é aqui tratada como uma nova alternativa à aquelas equações empíricas o qual relacionam explicitamente a variação da infiltração ao longo do tempo somente pelas propriedades do solo.

O conjunto “ótimo” de parâmetros de infiltração estimado nos métodos utilizados para a bacia do Aguapei pelo modelo LABSHI poderá ser utilizado para futuros estudos de regionalização para outras bacias do estado que apresentem características semelhantes a analisada. Apesar destes valores apresentarem grandes variações em relação aos disponíveis na literatura técnica são úteis na aplicação de estudos de processos hidrológicos, haja visto o conhecimento do intervalo de tempo diário, definido e utilizado como base no estudo em questão.

O desenvolvimento do estudo mostrou-se eficiente nas estimativas de parâmetros de infiltração e na possibilidade de análise do comportamento dos parâmetros representativos do processo de infiltração, por meio de diferentes expressões aplicadas em um modelo chuva-deflúvio e levantou-nos a possibilidade de reafirmar sobre a necessidade e importância dos dados hidrológicos de uma forma geral.

Problemas comuns de dados, como os que foram notados nas bacias dos rios Itatinga e Capivari-Monos embora mais realçados pelas peculiaridades destas bacias, estão presentes em muitos casos, particularmente para pequenas bacias do nosso estado, e apesar de serem na maioria das vezes os disponíveis ou únicos, como os dessas duas bacias, acabam dificultando a realização de um estudo ou mascarando falsas informações diante de seu uso sem um prévio cuidado inicial.

# 10

## Recomendações

---

A principal e primeira recomendação é de dar continuidade a pesquisa em outras bacias do estado com a utilização de modelos chuva-deflúvio para um melhor conhecimento dos processos hidrológicos e em particular da infiltração, e na obtenção de parâmetros próprios característicos de cada bacia para que, dessa forma, possa então passar para um estudo de regionalização de modo a se prescindir o uso de dados de literatura, obtida para outras localidades não adequadas para as condições específicas encontradas no Estado de São Paulo.

A carência de dados para a determinação das propriedades hídricas dos solos é uma constante na simulação do processo de infiltração, não tendo sido este estudo uma exceção a regra. Além disto há uma grande dificuldade na realização de estudos que envolvam essas informações hidrológicas particularmente para pequenas bacias, principalmente na aquisição destes dados e também na garantia de sua qualidade. No entanto a busca de soluções que viabilizem e melhorem sua características deve ser entendida como um esforço constante. Diante desse desafio, é sugerido medidas que visem minimizar tais dificuldades.

Já que existe a necessidade do uso de dados hidrológicos, investir no desenvolvimento de técnicas que utilizem, com eficiência, os dados escassos existentes.

No que diz respeito a determinação dos parâmetros relativos ao processo de infiltração, mais pesquisas são necessárias no sentido de se reduzir as incertezas na sua estimativa. Uma maneira, por exemplo, seria através do uso de informações existentes em ensaios de campo. Uma vez que, a nível

nacional, as informações realmente disponíveis são de granulometria (percentual de argila, areia e silte), deve-se investigar uma forma de uso destas informações na estimação de parâmetros de infiltração.

Investimentos para a obtenção de informações pluviométricas e fluviométricas contínuas, que podem ser suprida sem dúvida por uma adequada rede, inclusive telemétrica ou mesmo o uso de medidas dadas por radar meteorológicos.

Na simulação da infiltração por modelos chuva-deflúvio em escala de bacia, o efeito da distribuição temporal da chuva a ser adotada nos processamentos deve ser conhecido ou estimado a partir de análises de chuvas locais, facilitando assim o estudo hidrológico a ser realizado e adoção de valores de parâmetros disponíveis na literatura técnica.

## **Anexos**

---

**ANEXO 1** - Valores de chuva mensal e vazão (calculada e observada) apresentados pelo modelo de trabalho aos períodos processados para a situação de valores adotados ao coeficiente dos postos  $W_i$  dado pela relação  $P_{mb}/P_{mi}$  – bacia do Aguapei.

**ANEXO 2** - Visualização gráfica da alteração do comportamento da hidrógrafa de vazão à situação adotada de distribuição uniforme da chuva - bacia do Aguapei.

**ANEXO 3** - Apresentação de parâmetros relacionados ao modelo de trabalho (versão diária) - fase bacia e fase canal - valores adotados nos processamentos aos períodos analisados.

**ANEXO 4** - Demais equações de infiltração desenvolvidas a partir dos princípios de escoamento da água em meios porosos.

## Anexo 1

---

Valores de chuva mensal e vazão (calculada e observada) apresentados pelo modelo de trabalho aos períodos processados para a situação de valores adotados ao coeficiente dos postos  $W_i$  dado pela relação  $P_{mb}/P_{mi}$  à bacia do Aguapei.

---

*Sistema LABSHI - Prof Valter Hernandez / DHS / ENG CIVIL / UNICAMP*

---

Process: 1 Resumo dos resultados do período 1973 – 1974 com  $W_i = P_{mb}/P_{mi}$

BACIA	MES	CHUVA MENSAL (mm)	VAZAO CALCULADA (m <sup>3</sup> /s)	(mm)	VAZAO OBSERVADA (m <sup>3</sup> /s)	(mm)
1	SET	54.438	5.014	11.018	5.561	12.219
1	OUT	101.473	3.668	8.061	6.586	14.471
1	NOV	110.815	4.967	10.914	6.144	13.499
1	DEZ	233.809	8.629	18.962	8.840	19.424
1	JAN	281.677	20.630	45.331	21.022	46.191
1	FEV	126.379	13.303	29.231	16.138	35.460
1	MAR	382.157	42.201	92.730	37.621	82.665
1	ABR	40.009	17.746	38.994	13.348	29.329
1	MAI	49.220	9.711	21.338	8.692	19.099
1	JUN	153.536	12.565	27.609	14.352	31.536
1	JUL	0.058	12.565	24.257	9.395	20.645
1	AGO	14.771	7.648	7.648	5.898	12.960

---

---

*Sistema LABSHI - Prof Valter Hernandez / DHS / ENG CIVIL / UNICAMP*


---

 Process: 1 Resumo dos resultados do período 1974 – 1975 com  $W_i = P_{mb}/P_{mi}$ 

BACIA	MES	CHUVA MENSAL (mm)	VAZAO CALCULADA (m <sup>3</sup> /s)	(mm)	VAZAO OBSERVADA (m <sup>3</sup> /s)	(mm)
1	SET	28.752	3.635	7.986	4.483	9.851
1	OUT	116.437	3.395	7.460	5.617	12.342
1	NOV	86.612	4.163	9.148	6.269	13.775
1	DEZ	350.131	14.594	32.068	17.108	37.592
1	JAN	138.981	25.539	56.118	21.714	47.714
1	FEV	198.676	10.057	22.099	13.344	29.322
1	MAR	93.777	9.351	20.546	12.205	26.818
1	ABR	95.154	15.602	34.284	11.462	25.185
1	MAI	7.007	7.140	15.689	6.167	13.552
1	JUN	8.384	5.818	12.783	5.712	32.551
1	JUL	27.208	5.209	11.445	6.181	13.582
1	AGO	0.000	4.257	9.354	5.242	11.519

---



---

*Sistema LABSHI - Prof Valter Hernandez / DHS / ENG CIVIL / UNICAMP*


---

 Process: 1 Resumo dos resultados do período 1977 – 1978 com  $W_i = P_{mb}/P_{mi}$ 

BACIA	MES	CHUVA MENSAL (mm)	VAZAO CALCULADA (m <sup>3</sup> /s)	(mm)	VAZAO OBSERVADA (m <sup>3</sup> /s)	(mm)
1	SET	47.364	4.702	10.333	7.749	17.028
1	OUT	97.045	5.272	11.585	6.554	14.402
1	NOV	207.615	10.346	22.733	13.813	30.352
1	DEZ	408.089	60.546	133.038	45.076	99.047
1	JAN	171.908	15.463	33.976	16.213	35.625
1	FEV	103.622	8.834	19.412	9.287	20.407
1	MAR	107.881	11.160	24.523	10.178	22.365
1	ABR	31.026	7.740	17.007	7.254	15.940
1	MAI	152.352	17.349	38.121	10.931	24.019
1	JUN	22.572	10.953	24.067	8.462	18.594
1	JUL	119.632	12.007	26.383	10.943	24.046
1	AGO	0.616	8.514	18.708	7.157	15.725

---

Valores de chuva mensal e vazão (calculada e observada) apresentados pelo modelo de trabalho aos períodos processados para a situação de valores adotados ao coeficiente dos postos  $W_i = 1$  à bacia do Aguapei.

---

*Sistema LABSHI - Prof Valter Hernandez / DHS / ENG CIVIL / UNICAMP*

---

Process: 1 Resumo dos resultados do período 1973 – 1974 com  $W_i = 1$

BACIA	MES	CHUVA MENSAL (mm)	VAZAO CALCULADA (m <sup>3</sup> /s)	(mm)	VAZAO OBSERVADA (m <sup>3</sup> /s)	(mm)
1	SET	54.820	5.419	11.910	5.561	12.219
1	OUT	101.10	3.302	87.250	6.586	14.471
1	NOV	111.51	5.219	11.470	6.144	13.499
1	DEZ	235.38	9.078	19.950	8.840	19.424
1	JAN	283.76	19.195	42.180	21.022	46.191
1	FEV	127.09	9.722	21.360	16.138	35.460
1	MAR	386.40	52.325	114.98	37.621	82.665
1	ABR	40.180	14.506	31.87	13.348	29.329
1	MAI	49.370	8.644	18.99	8.692	19.099
1	JUN	154.44	12.877	28.29	14.352	31.536
1	JUL	0.0600	10.183	22.38	9.395	20.645
1	AGO	14.820	6.830	15.01	5.898	12.960

---

---



---

*Sistema LABSHI - Prof Valter Hernandez / DHS / ENG CIVIL / UNICAMP*

---

Process: 1    Resumo dos resultados do período 1974 – 1975 com  $W_i = 1$

BACIA	MES	CHUVA MENSAL (mm)	VAZÃO CALCULADA (m <sup>3</sup> /s)	(mm)	VAZÃO OBSERVADA (m <sup>3</sup> /s)	(mm)
1	SET	28.69	3.631	7.98	4.483	9.851
1	OUT	117.68	4.069	8.94	5.617	12.342
1	NOV	87.20	5.961	13.10	6.269	13.755
1	DEZ	352.95	16.982	37.31	17.108	37.592
1	JAN	139.82	25.529	56.09	21.714	47.714
1	FEV	201.08	7.922	17.41	13.344	29.322
1	MAR	94.92	7.810	17.16	12.205	26.818
1	ABR	95.08	16.337	35.90	11.462	25.185
1	MAI	7.080	5.943	13.06	6.167	13.552
1	JUN	8.480	4.648	10.21	5.712	12.551
1	JUL	27.35	4.004	8.80	6.191	13.582
1	AGO	0.000	3.341	7.34	5.242	11.519

---



---



---

*Sistema LABSHI - Prof Valter Hernandez / DHS / ENG CIVIL / UNICAMP*

---

Process: 1    Resumo dos resultados do período 1977 – 1978 com  $W_i = 1$

BACIA	MES	CHUVA MENSAL (mm)	VAZÃO CALCULADA (m <sup>3</sup> /s)	(mm)	VAZÃO OBSERVADA (m <sup>3</sup> /s)	(mm)
1	SET	47.48	4.881	10.73	7.749	17.028
1	OUT	97.89	6.954	15.28	6.554	14.402
1	NOV	208.15	12.786	28.09	13.813	30.352
1	DEZ	412.32	72.754	159.86	45.076	99.047
1	JAN	172.18	14.546	31.96	16.213	35.625
1	FEV	103.02	9.790	21.51	9.287	20.407
1	MAR	108.37	11.703	25.72	10.178	22.365
1	ABR	30.78	7.281	16.00	7.254	15.940
1	MAI	153.65	21.193	46.57	10.931	24.019
1	JUN	22.70	10.669	23.44	8.462	18.594
1	JUL	121.02	13.280	29.18	10.943	24.046
1	AGO	0.650	7.234	15.90	7.157	15.725

---

## Anexo 2

---

Visualização gráfica da alteração do comportamento da hidrógrafa de vazão à situação adotada de distribuição uniforme da chuva – bacia do Aguapei.

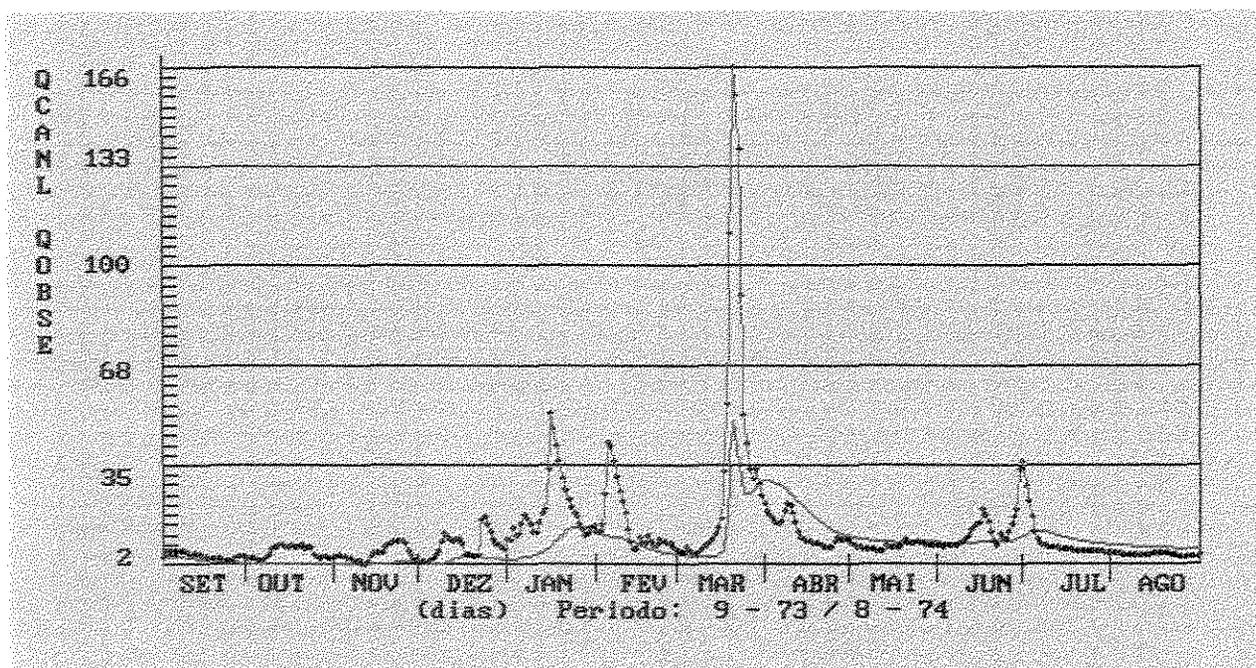


Figura 1 – Hidrógrafas de vazão calculada (verde) e observada (azul) no modelo de trabalho ao método de Green & Ampt – período de Set/73 a Ago/74.

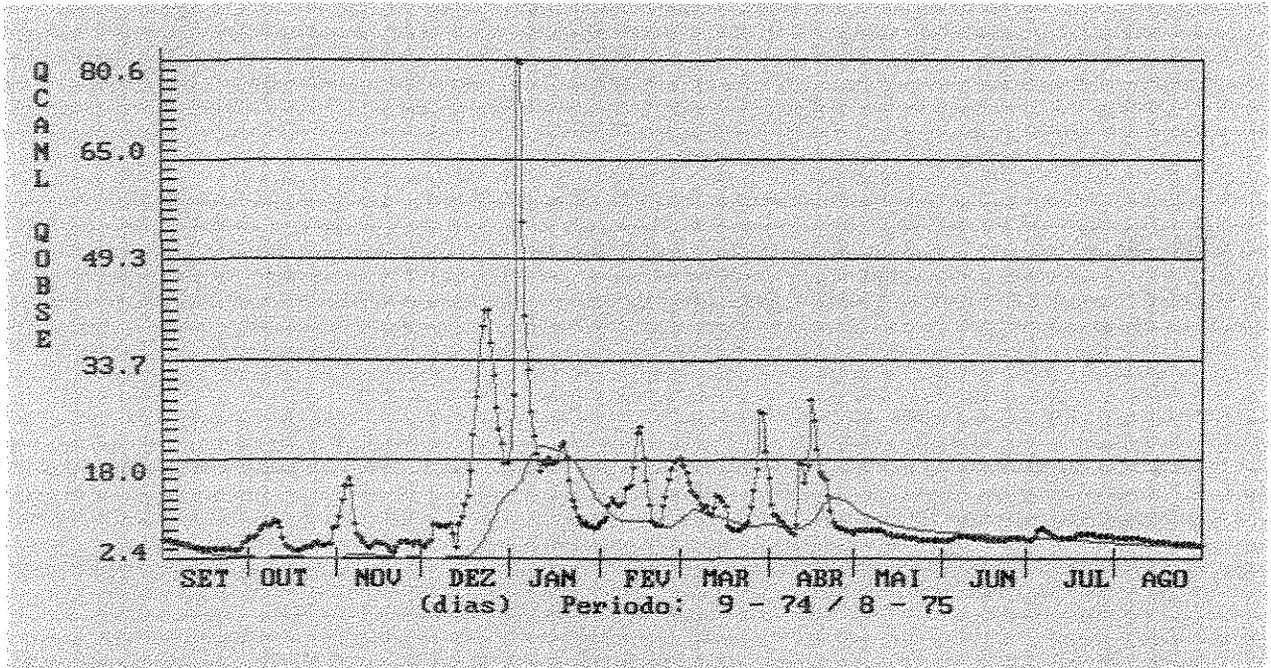


Figura 2 – Hidrógrafas de vazão calculada (verde) e observada (azul) no modelo de trabalho ao método de Green & Ampt – período de Set/74 a Ago/75.

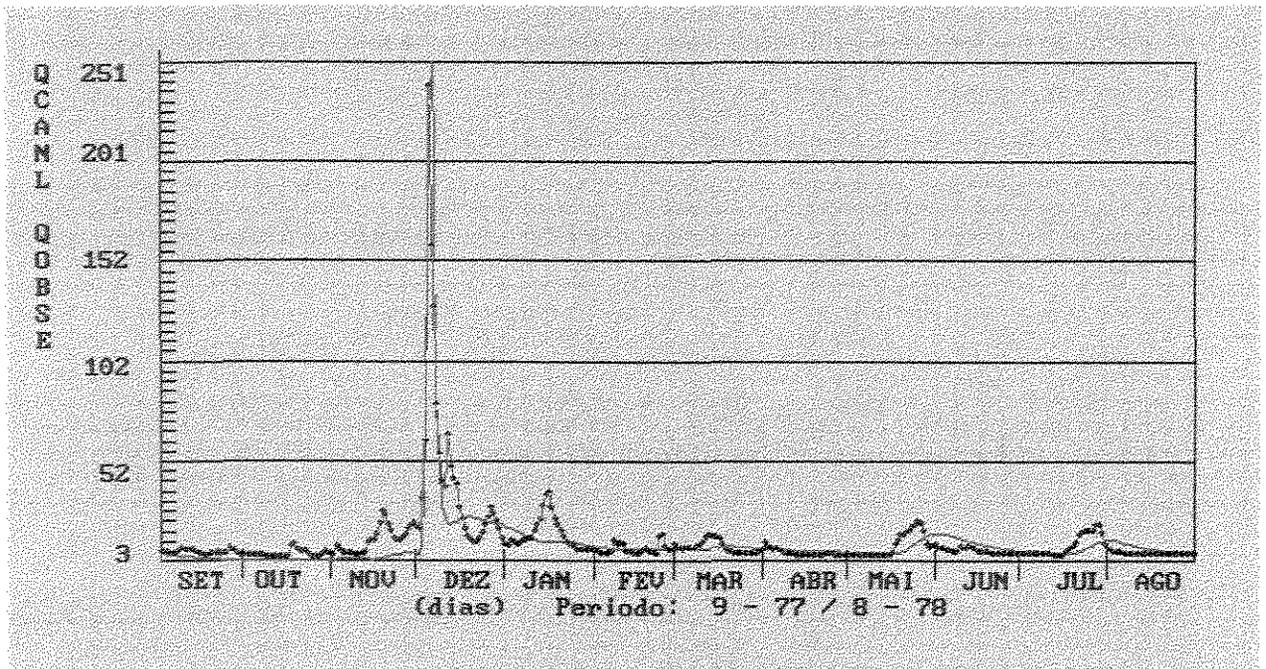


Figura 3 – Hidrógrafas de vazão calculada (verde) e observada (azul) no modelo de trabalho ao método de Green & Ampt – período de Set/77 a Ago/78.

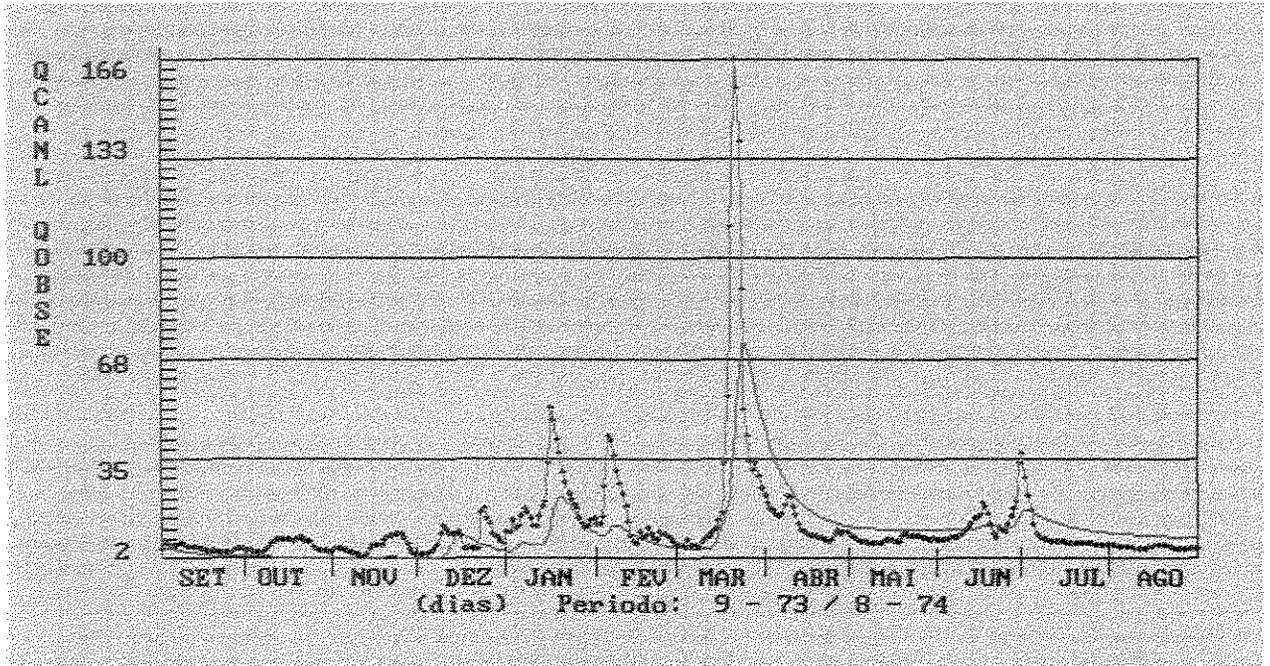


Figura 4 – Hidrógrafas de vazão calculada (verde) e observada (azul) no modelo de trabalho ao método de Diskin & Nazimov – período de Set/73 a Ago/74.

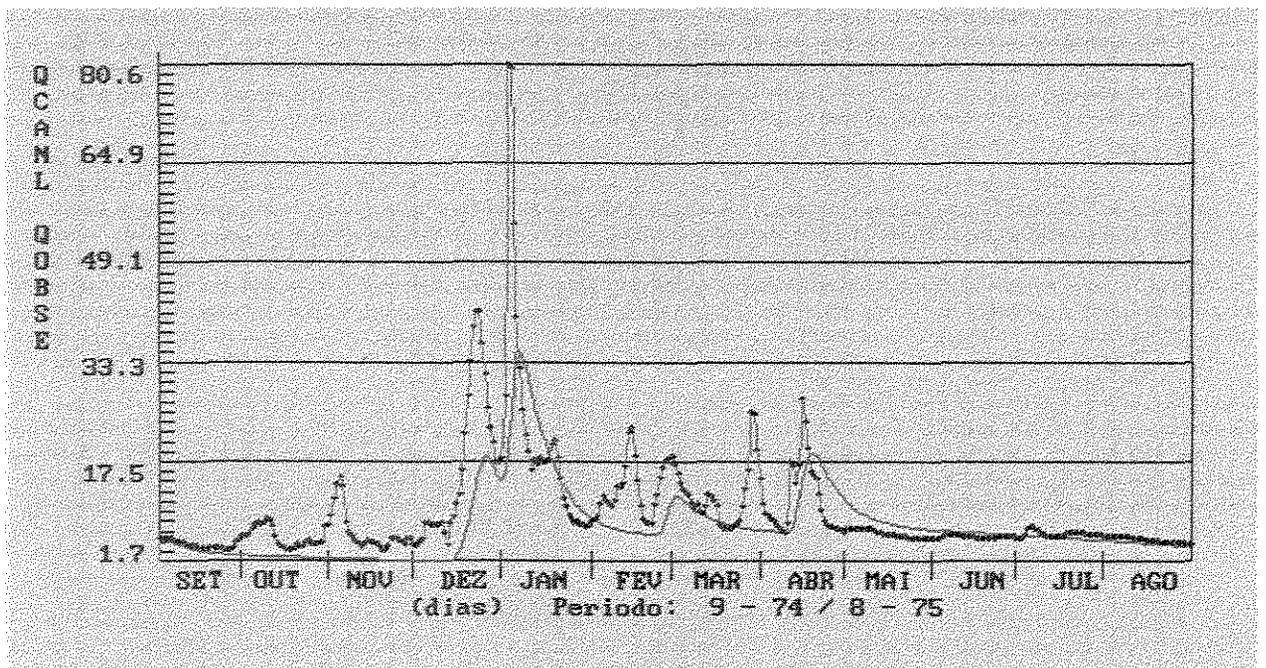


Figura 5 – Hidrógrafas de vazão calculada (verde) e observada (azul) no modelo de trabalho ao método de Diskin & Nazimov – período de Set/74 a Ago/75.

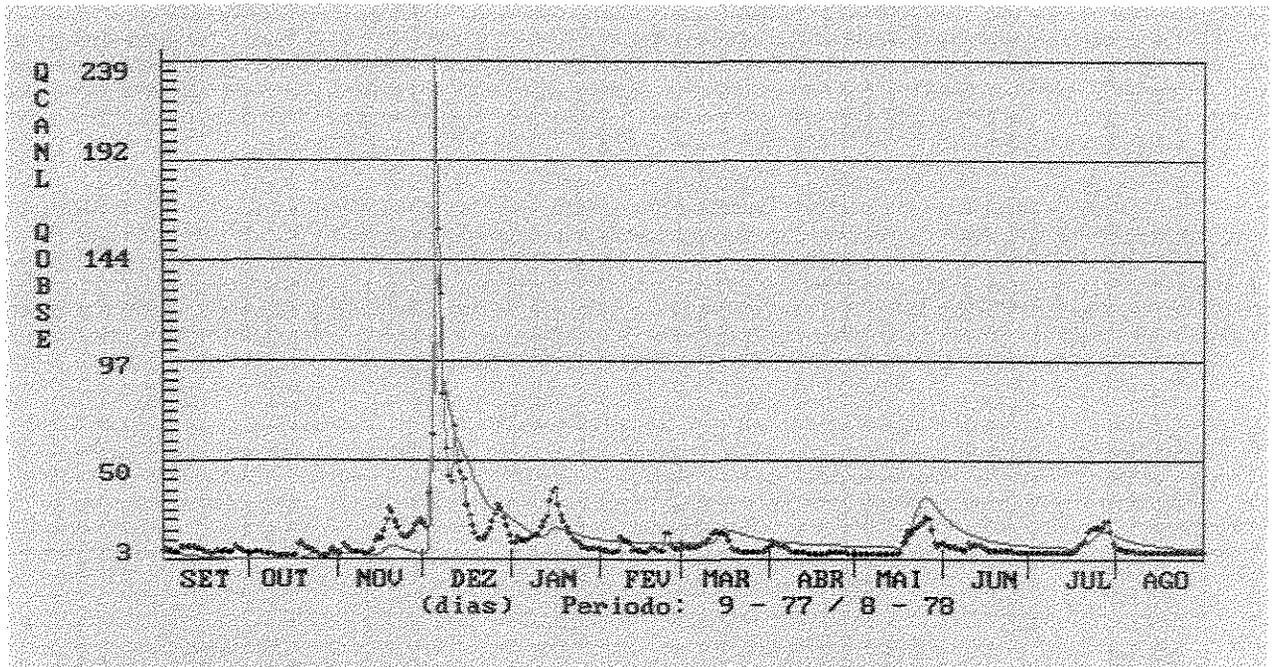


Figura 6 – Hidrógrafas de vazão calculada (verde) e observada (azul) no modelo de trabalho ao método de Diskin & Nazimov – período de Set/77 a Ago/78.

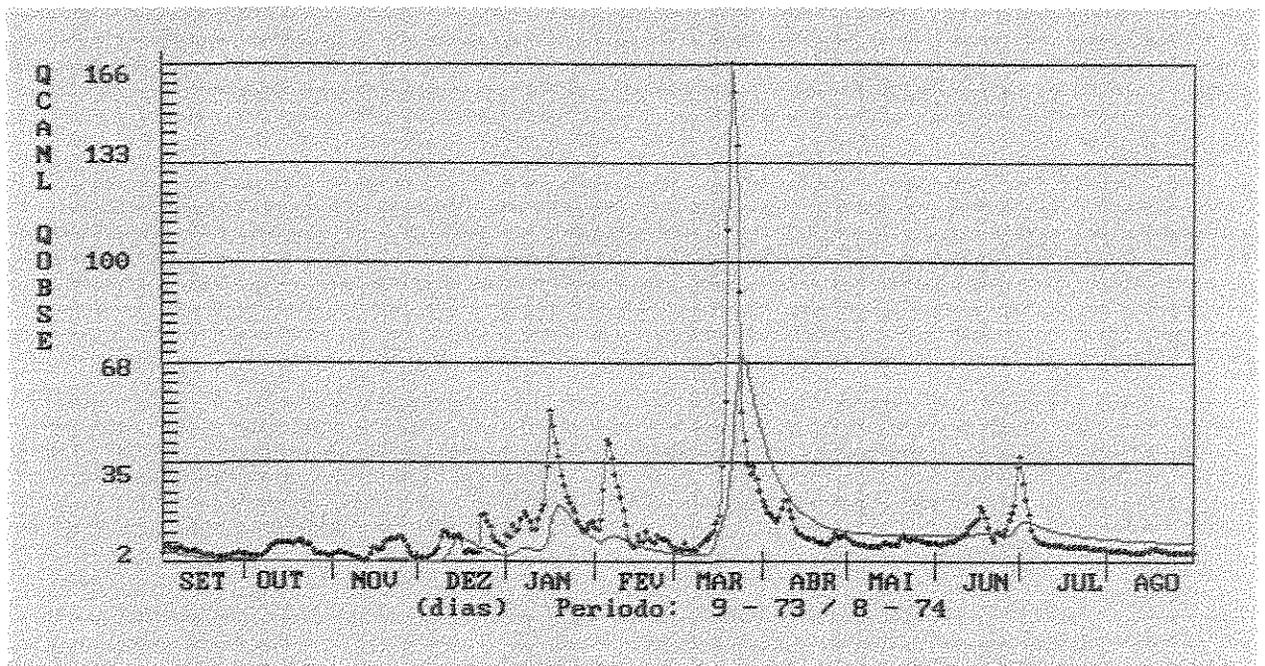


Figura 7 – Hidrógrafas de vazão calculada (verde) e observada (azul) no modelo de trabalho ao método de Tan & O'Connor – período de Set/73 a Ago/74.

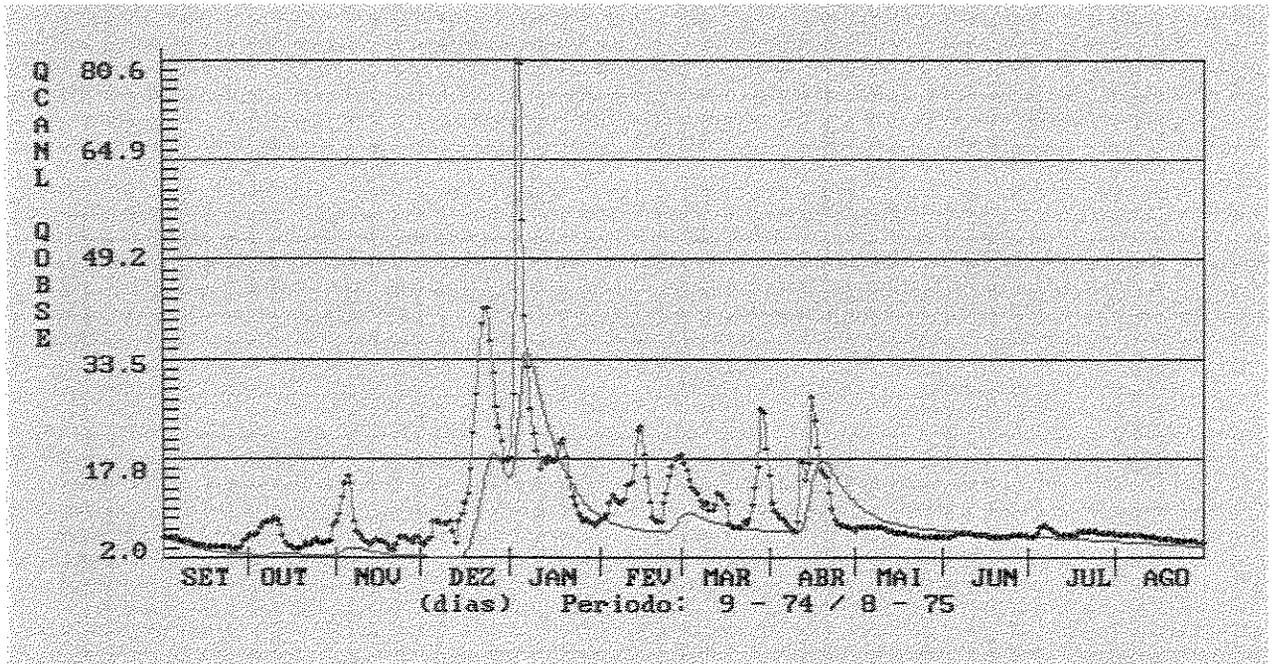


Figura 8 – Hidrógrafas de vazão calculada (verde) e observada (azul) no modelo de trabalho ao método de Tan & O'Connor – período de Set/74 a Ago/75.

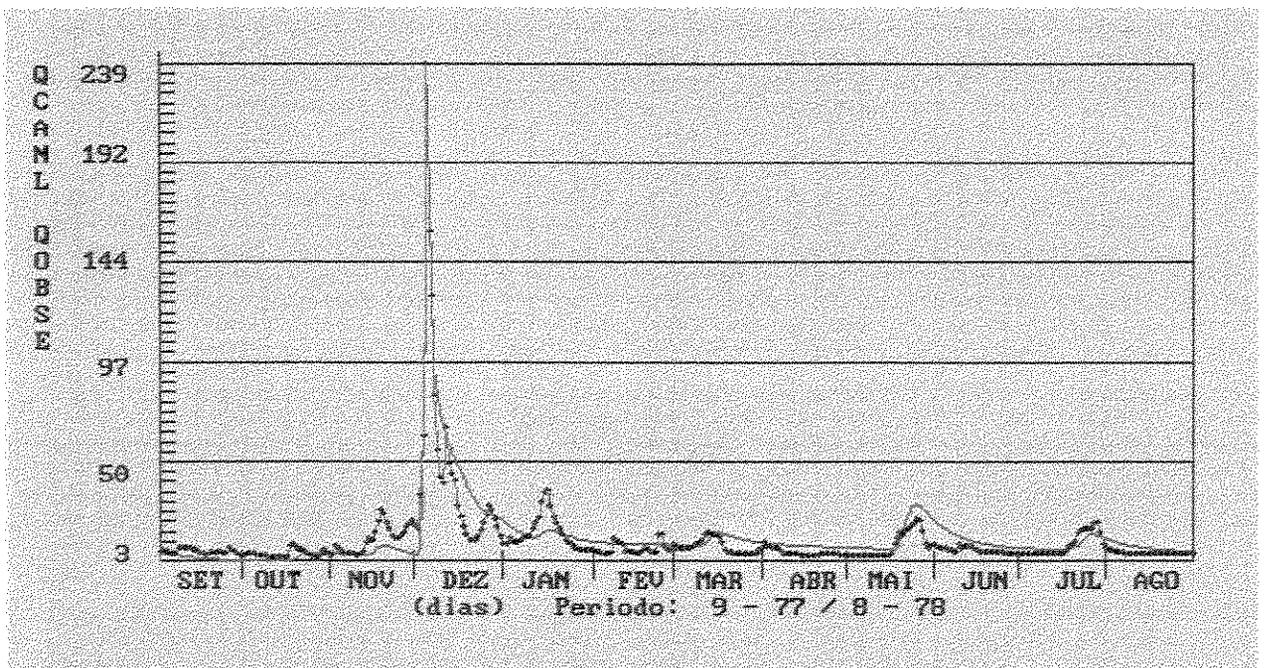


Figura 9 – Hidrógrafas de vazão calculada (verde) e observada (azul) no modelo de trabalho ao método de Tan & O'Connor – período de Set/77 a Ago/78.

## Anexo 3

---

Apresentação de parâmetros relacionados ao modelo de trabalho (versão diária) - fase bacia e fase canal - valores adotados nos processamentos aos períodos analisados.

---

*Sistema LABSHI - Prof Valter Hernandez / DHS / ENG CIVIL / UNICAMP*

---

**\*\* Tempos de acumulação e Fases das sub-bacias \*\***

---

Variáveis:	1	2	3	4	5	6
	TB	TT	TS	FB	FT	FS
	(h)	(h)	(h)	--	--	--
	2054	250	12	2	1	1

---

- 
- TB : tempo de acumulação das fases subterrâneas;  
 TT : tempo de acumulação das fases sub-superficiais;  
 TS : tempo de acumulação das fases superficiais;  
 FB : número de fases subterrâneas;  
 FT : número de fases sub-superficiais;  
 FS : número de fases superficiais.
-

---

*Sistema LABSHI - Prof Valter Hernandez / DHS / ENG CIVIL / UNICAMP*

---

**\*\* Coeficientes e Fases dos Trechos \*\***

---

variáveis: 1      2      3

---

KTS      NC      FC

46.27      0.20      3

---

KTS :      constante do tempo de acumulação das fases canal;

NC :      expoente para o tempo de acumulação das fases canal;

FC :      número de fases do canal.

---

## Anexo 4

---

Demais equações de infiltração desenvolvidas a partir dos princípios de escoamento da água em meios porosos.

### Equação de Kostiakov

Conforme reportado por **Mein e Larson (1971)**, a equação de Kostiakov data de 1932, sendo reconhecida na seguinte forma:

$$F = b t^c$$

em que:

- F : altura total infiltrada;
- t : tempo a partir do início da infiltração;
- b,c: constantes da equação de Kostiakov.

A constante b da equação de Kostiakov caracteriza o tipo de solo e o teor de umidade inicial, enquanto c depende apenas do tipo de solo. Essa equação de forma exponencial e bastante simples, é normalmente usada em estudos de irrigação por inundação, sendo as constantes b e c ajustadas para dados de campo. No entanto não é possível estimar o instante de saturação da superfície e, conseqüentemente, o início do escoamento superficial.

## Equação de Horton

Apresentada em 1939, esta é sem dúvida a mais conhecida equação de infiltração, sendo empregada em diversos modelos chuva-deflúvio. A partir de uma série de experimentos de campo, Horton verificou que a infiltração se comportava como um fenômeno natural de exaustão, podendo ser descrita através da seguinte equação exponencial:

$$f = IFC + (IFI - IFC) e^{-k t}$$

em que:

- f : capacidade de infiltração;
- IFC: capacidade mínima de infiltração;
- IFI : capacidade inicial de infiltração;
- k : constante da equação de Horton.

A constante k está associada à umidade inicial e ao tipo de solo e, assim como os demais parâmetros, é obtida por meio de calibração. Apesar de sua popularidade, a equação de Horton apresenta o sério inconveniente de ser diretamente dependente do tempo, não levando em consideração o volume disponível para infiltração.

## Equação de Holtan

A formulação empírica de **Holtan (1961)** explicita a capacidade de infiltração  $f$  como:

$$f = IFC + E F_p^N$$

em que:

$E, N$  : constantes da equação de Holtan;

$F_p$  : volume de infiltração acumulado até a saturação.

O termo  $F_p$  da equação de Holtan pode ser definido como porosidade disponível, igual à capacidade inicial de armazenamento do solo subtraída do volume de água já infiltrado. Em seu estudo experimental, Holtan obteve valores de  $N$  sempre iguais a 1.387, enquanto  $E$  variou entre 25 e 80%, sem, no entanto, apresentar clara relação com o solo ou com a cobertura vegetal. A fim de separar o efeito do solo e da vegetação, Holtan introduziu um fator ( $Z$ ) devido ao tipo de cobertura vegetal, ficando a equação com o seguinte aspecto:

$$f = IFC + 0.62 Z F_p^{1.387}$$

Apesar do empirismo de seus parâmetros, a equação de Holtan se adequa bem a modelos hidrológicos, pois torna a capacidade de infiltração dependente da umidade do solo e, indiretamente, do tempo. Embora relacione a umidade do solo, a equação de Holtan não foi tomada como amostra para análise neste estudo comparativo.

## Equação de Philip

Assumindo que a condutividade hidráulica e a difusividade são funções da umidade do solo, e portanto variam com o decorrer do tempo, **Philip (1957,1969)** resolveu a equação de Richards, obtendo uma série infinita como expressão para o volume infiltrado. Desprezando os termos da série à exceção dos dois primeiros, ficou-se com a seguinte equação:

$$F = s t^{1/2} + Khs t$$

que, por diferenciação, fornece a taxa de infiltração como:

$$f = \frac{1}{2} s t^{-1/2} + Khs$$

Os termos da equação de Philip representam, respectivamente, os efeitos do potencial capilar e do potencial gravitacional. Para escoamento horizontal através do solo, o efeito gravitacional pode ser desprezado e a equação 4.6 se reduz a:

$$F = s t^{1/2}$$

O parâmetro  $s$  pode ser determinado a partir da análise do avanço da frente úmida horizontal em relação ao tempo. Philip denominou este parâmetro de sorptividade do solo (sorptivity), sendo o mesmo função do potencial matricial.

## Referências Bibliográficas

---

- Azevedo, L.G.T.; Fontane, D. G.; Porto, R. L. - Sistemas Especialistas para Calibração de um Modelo Chuva-Vazão. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 9 e Simpósio Luso Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, 5, Anais.** ABRH/APRH, Rio de Janeiro, v.1, p. 316-327, 1991.
- Bradford, J.M.; Huang, C. - Mechanisms of Crust Formation: Physical Components. In: M.E. Sumner e B.A. Stewart (editors), **Advances in Soil Science, Soil Crusting Chemical and Physical Processes.**, Chelsea, IL, P. 55-72. 1993.
- Brakensiek, D.L.; Rawls, W.J. - **Agricultural Management Effects on Soil Water Processes.** Part II: Green and Ampt Parameters for Crusting Soils. *Trans. ASAE*, 26(6): 1753-1759. 1983.
- Caicedo, N. - **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** Carlos E. Tucci (org.), Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v.4, cap.8, p.300-307, 1993.
- Cruz, R.H.S.; Porto, R.L. - Uso da Função de Perdas de Modelo Hidrológico em Estudos de Regionalização e na Determinação de Parâmetros de Infiltração. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 9 e Simpósio Luso Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, 5, Anais.** ABRH/APRH, Rio de Janeiro, v.1, p. 191-199, 1991.

- Diskin, M.H.; Nazimov, N. - Linear Reservoir With Feedback Regulated Inlet as a Model for the Infiltration Process. **Journal of Hydrology**, v. 172 - nos. 1-4, p. 313-330, November 1995.
- Diskin, M.H.; Nazimov, N. - Ponding Time and Infiltration Capacity Variation During Steady Rainfall. **Journal of Hydrology**, v. 178 - nos. 1-4, p. 369-380, March 1996.
- Diskin, M.H.; Simon, E. - A Procedure for the Selection of Objective Functions for Hydrologic Simulation Models. **Journal of Hydrology**, v. 34 - nos. 1-2, p. 129-149, 1977.
- Diskin, M.H.; Simon, E. - The Relationship Between the Time Bases of Simulation Models and their Structure. **Water Resources Bulletin**, v.15, no. 6, p. 1716-1732, 1979.
- EPUSP/DAEE/ABRH. - **Curso de Engenharia Hidrológica**. Hidrologia Dinâmica, v. 1, p. e1-e16. São Paulo, 1983.
- Ferguson, B. K. – **Stormwater Infiltration**. cap.3, p.95 . USA, 1994.
- Fill, H. D. - Informações Hidrológicas. **Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 1, cap. 2, p. 138-142. São Paulo. 1987.
- Franciss, F. O. – **Hidráulica de Meios Permeáveis: Escoamento em Meios Porosos**. Editora da Universidade de São Paulo, 1980.
- Gupta, R.S. - **Hydrology and Hydraulic Systems**. Prentice Hall, New York, p. 90-97, 1989.

- Hernandez, V.- **Modelo LABSHI**. Documentação do programa; Departamento de Recursos Hídricos da Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP - Campinas, Dezembro, 1998. (não publicado).
- Holtan, H.N. - **A Concept for Infiltration Estimates in Watershed Engineering**. ARS paper 41-51, Agricultural Research Service/U.S.D.A. 1961.
- International Commission on Irrigation and Drainage. **Dicionário de Termos Técnicos de Irrigação e Drenagem**. Viçosa: Associação Brasileira de Irrigação e Drenagem, 1978. 615 p.
- Kachroo, R.K., River Flow Forecasting. Part 5. Application of a Conceptual Model. **Journal of Hydrology**, v. 133 - nos. 1-2, p. 141-178, 1992.
- Kao, C.S.; Hunt, J.R., - Prediction of Wetting Front Movement During One-Dimensional Infiltration Into Soils. **Water Resources Research**, v.32, n.1, p.55-64, January 1996.
- Kelman, J. – Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos. Nobel / ABRH, São Paulo, cap. 4, p.363. 1987.
- Lopes, J.E.G.; Porto, R. L. - Técnica de Pesquisa Global de Parâmetros para Calibração de Modelos Chuva-Vazão. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 9 e Simpósio Luso Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, 5, Anais**. ABRH/APRH, Rio de Janeiro, v.1, p. 305-315, 1991.
- Magalhães, P. C. - **Engenharia Hidrológica**. In: Hidrologia Superficial, ABRH, Rio de Janeiro, v.1, cap. 4, p.275-278, 1989.

- Mein, R.G.; Larson, C.L. - Modeling the Infiltration Component of the Rainfall-Runoff Process. Bulletin 43, **Water Resources Research**. Center, University of Minnesota, Minneapolis, 72 pp. 1971.
- Musgrave, G.W.; Holtan, H.N. - **Handbook of Applied Hydrology**. A Compendium of Water Resources Technology.; Ven Te Chow, P.h.D, editor in chief, New York, Section 12, p 12.1-12.29, 1964.
- Philip, J.R. - **The Theory of Infiltration 1. The Infiltration Equation and its Solution**. Soil Sci. 83(5): 345-357. 1957
- Philip, J.R. - **The Theory of Infiltration**. Adv. Hydrosoc. 5, 215-296. 1969.
- Prevedello, C L. - **Física do Solo com Problemas Resolvidos**. Curitiba - PR., cap. 6, p. 250-275, 1996.
- Reedy, M.- **Hydrologic Analysis and Design**. R. H. Mc Cuen - Prentice Hall, Section 8.5, p. 371-374, 1989.
- Risse, L. M.; Nearing, M. A ; Zhang, X. C. – Variability in Green – Ampt Effective Hydraulic Conductivity Under Fallow Conditions. **Journal of Hydrology**, v. 169 - nos. 1-4, p. 1-24, July 1995.
- Ross, J. L. S.; MOROZ, I.C. – **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo** – Laboratório de Geomorfologia. Depto Geografia – FFLCH-USP / Laboratório de Cartografia Geotécnica – Geologia Aplicada – IPT/FAPESP. São Paulo, 1997.

- Setzer, J. ; Porto, R. L. – Tentativa de Avaliação do Escoamento Superficial de Acordo com o Solo e seu Recobrimento Vegetal nas Condições do Estado de São Paulo. **Boletim Técnico DAEE**, v.2, n.2, p.82-102, mai/ago 1979.
- Silveira, A.L.; Louzada, J.A.; Beltrame, L. - **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Carlos E. Tucci (org.), Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v.4, cap.9, p.335-372, 1993.
- Simões, A.P.; Magalhães, P.C. - Estimação dos Parâmetros de Infiltração de Green-Ampt a Partir de Propriedades dos Solos.In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 9 e Simpósio Luso Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos, 5, Anais**. ABRH/APRH, Rio de Janeiro, v.1, p. 181-190, 1991.
- Singh, V. P. - **Hydrologic Systems, Watershed Modeling**. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, v.2, 1989.
- Singh, V. P. - **Computer Models of Watershed Hydrology**. Water Resources Publications, Vijay P. Singh, editor in chief., Colorado, USA, Chapter 1, p.1-21, 1995.
- Sorooshian, S.; Gupta, V. K. - **Computer Models of Watershed Hydrology**. Water Resources Publications, Vijay P. Singh, editor in chief., Colorado, USA, Chapter 2, p.23-67, 1995.
- Tan, B. Q., O' Connor, K.M. - Application of Empirical Infiltration Equation in the SMAR Conceptual Model. **Journal of Hydrology**, v. 185 - nos. 1-4, p. 275-295, November 1995.
- Tucci, C.E.M. - **Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Autores Flávio Terra Bart...et al, São Paulo, Nobel: ABRH, cap.3, p.213-263, 1987.

Tucci, C.E.M. - **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Carlos E. Tucci (org.), Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v.4, cap.1, p.25-31, 1993.

Villela, S.M., Mattos, A. - **Hidrologia Aplicada**. Mc Graw-Hill do Brasil. Capítulo 4, p.69-72, São Paulo, 1975.

Wanielista, M. ; Kersten, R. ; Eaglin, R. – **Hydrology : Water Quantity and Control**., 2nd ed., chapter 5.3, p. 148-153, 1997.

## **Abstract**

---

Boni, R.C. Comparative Study of the Infiltration Through the Application Rainfall-Runnof Model to State of the São Paulo's Watersheds. Campinas, Ability of Civil Engineering, State University of Campinas, 1999.

Due to the use alterations and occupation of the soil, the fluvimetrics data of long period end up integrating those effects, elapsing non stationary series. For that reason the interest of simulation models of the rainfall-runnof process has been intensifying in the last decades. In that process, one of the studies basic elements went to infiltration, through the use of the rainfall-runnof model LABSHI, developed in the Department of Resources Hydrologics of the Ability of Civil Engineering of UNICAMP by the teacher Dr. Valter Hernandez. The main objective of the work consists of a comparative analysis of the infiltration by means of different expressions. For so much, the use of expressions that represent the process such as the Green & Ampt expression quite mencionet in the literature, as described by Gupta (1989), the Diskin & Nazimov (1995) expression, and the one of Tan & O'Connor (1995), providing the calculation of the rate of infiltration of water in the soil through data observed in the basins in study. The research takes as base three state of the São Paulo 's basin, where the determination of the local parameters can serve as element for future studies of regionalization for other basins of the state. Comparations of the results generated by the rainfall-runnof model to the propused methods validates its use in the study of the infiltration, showing a better adjustment for the Green & Ampt method to the studied periods.

Key Words: Infiltration, rainfall-runnof model, hidrologic simulation.