

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO MODELO SWMM PARA
AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO EM DUAS BACIAS PERIURBANAS
EM SANTA MARIA-RS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Gustavo Antonio Pereira Bastos

**Santa Maria, RS, Brasil
2007**

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO MODELO SWMM PARA
AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO EM DUAS BACIAS PERIURBANAS
EM SANTA MARIA-RS**

Por

Gustavo Antonio Pereira Bastos

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM,RS) como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil.**

Orientador: Prof.^aDr^a. Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva

Santa Maria, RS, Brasil

2007

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO MODELO SWMM PARA
AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO EM DUAS BACIAS
PERIURBANAS EM SANTA MARIA-RS**

elaborada por

Gustavo Antonio Pereira Bastos

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

COMISSÃO EXAMINADORA:

**Prof^a. Dr^a. Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva
(Presidente/Orientador)**

Prof. PhD/DIC Joel Avruch Goldenfum (UFRGS)

Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva (UFSM)

Santa Maria, 14 de Março de 2007.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Vander Soares Bastos e Elisabeth Castilhos Jacinto Pereira e ao meu irmão Rafael, pelo apoio, carinho, incentivo, compreensão durante esta etapa tão difícil.

A minha namorada e colega Claudia Santos d'Avila pelo carinho, apoio, dedicação e incentivo.

A professora Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva pela oportunidade, orientação e amizade nestes dois anos.

Ao professor João Batista Dias de Paiva pelo auxílio e conselhos indispensáveis.

Aos meus colegas de mestrado, pela amizade e companheirismo neste período.

Aos bolsistas de iniciação científica pela amizade e ajuda em trabalhos de campo e no laboratório em especial ao Maikel Bruck Martins.

Aos funcionários Astério do Carmo, Eliomar Pappis e em especial ao Alcides Sartori pela amizade e ajuda nos trabalhos de campo.

Aos grandes amigos e colegas, pela amizade e apoio nos trabalhos, especialmente durante as disciplinas.

Ao CT-HIDRO/MCT/CNPq, através do edital Nº 043/2004, pela bolsa de mestrado.

RESUMO

Dissertação de Mestrado

Curso de pós-graduação em Engenharia Civil

Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO MODELO SWMM PARA AVALIAÇÃO DO ESCOAMENTO EM DUAS BACIAS PERIURBANAS EM SANTA MARIA-RS

Autor: Gustavo Antonio Pereira Bastos

Orientador: Prof^a. Dr^a. Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 14 de Março de 2007.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o modelo SWMM para as bacias hidrográficas urbanas Alto da Colina e Sítio do Tio Pedro, em Santa Maria-RS, através da variação dos parâmetros envolvidos na calibração, buscando a melhor representação dos processos envolvidos no escoamento pluvial. Para a bacia Alto da Colina, as simulações foram feitas de maneira separada para a parte rural e urbana da bacia. A bacia Sítio do Tio Pedro foi discretizada em 11 sub-bacias. As bacias Alto da Colina II, Alto da Colina I e Sítio do Tio Pedro têm áreas de 1,44, 1,89 e 0,39 km² e porcentagens de áreas impermeáveis de 3,82, 8,69 e 13,09% respectivamente. O enfoque principal do trabalho foi a calibração de eventos de cheia selecionados para as respectivas bacias e o entendimento dos parâmetros envolvidos nas simulações. Para a bacia Alto da Colina II foram selecionados dez eventos, e para a bacia Sítio do Tio Pedro foram selecionados oito eventos. Na bacia Alto da Colina I, a simulação foi feita apenas para quatro eventos. Foram utilizadas algumas técnicas de geoprocessamento para o levantamento das características físicas e do uso e ocupação do solo. Também foram realizados alguns trabalhos de campo, com a utilização de técnicas de topografia, com o objetivo de obter as seções transversais representativas dos trechos de arroio. Os resultados obtidos na calibração dos parâmetros foram satisfatórios. Para a discretização adotada na bacia hidrográfica Alto da Colina II foi obtido um coeficiente de correlação médio entre os valores calculados e observados de 0,94 e erros médios na vazão de pico e volume escoado, de 1,16% e 4,71%, respectivamente, para os eventos simulados. Na discretização aplicada à bacia hidrográfica Alto da Colina I obteve-se um coeficiente de correlação médio de 0,99, porém com erros médios na vazão de pico e volume escoado de 0,63% e 13,44%, respectivamente. Para a bacia hidrográfica Sítio do tio Pedro o coeficiente de correlação médio encontrado foi de 0,93 e erros médios na vazão de pico e volume escoado, de 4,43% e 5,55%, respectivamente. A análise de sensibilidade foi realizada para as bacias Alto da Colina II e Sítio do Tio Pedro, e os parâmetros que apresentaram sensibilidade elevada nas duas bacias foram o de Infiltração (I) e o coeficiente de rugosidade de Manning para os módulos Runoff e Extran, respectivamente.

ABSTRACT

M.Sc. Dissertation

Post Graduation Program in Civil Engineering

Universidade Federal de Santa Maria

ANALYSIS OF THE SWMM MODEL PARAMETERS FOR RUNOFF EVALUATION IN TWO PERIURBAN BASINS IN SANTA MARIA-RS

Author: Gustavo Antonio Pereira Bastos

Advisor: Prof^a. Dr^a. Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva

Date and Local: Santa Maria, March 14th 2007.

The objective of this research was to evaluate SWMM model for the urban drainage basins Alto da Colina and Sítio do Tio Pedro at Santa Maria-RS, through the variation of the parameters involved in the calibration, searching the best representation of the processes involved in the pluvial drainage pattern. For the basin Alto da Colina the simulations had been made in separate way for the agricultural and urban part of the basin. The basin Sítio do Tio Pedro was discretizada in 11 sub-basins. The basins Alto da Colina II, Alto da Colina and Sítio do Tio Pedro have areas of 1,44, 1,89 and 0,39 km² and percentages of impervious areas of 3,82, 8,69 and 13.09% respectively. The main focus of the work was on the calibration of inundation events for the respective basins and the agreement of the involved parameters in the simulations. For the basin Alto da Colina II ten events had been selected, and for the basin Sítio do Tio Pedro eight events had been selected. In the basin Alto da Colina I the simulation it was made only for four events. Techniques of geoprocessing for the survey of the physical characteristics and the land use. Also some works of field had been carried through, with the use of topography techniques with the objective to get the representative transversal sections of the stream. The results gotten in the calibration of the parameters had been satisfactory. For the discretisation adopted in the basin Alto da Colina II it was obtained a medium correlation coefficient between the values calculated and observed of 0,94 and average error in the discharge peak and drained storage of 1,16% and 4,71% respectively for the simulated events. In the applied discretisation of the basin Alto da Colina it was obtained a medium correlation coefficient of 0,99, however with average error in the discharge peak and drained storage of 0,63% and 13,44% respectively. For the basin Sítio do Tio Pedro the medium correlation coefficient was of 0,93 and average errors in the discharge peak and drained storage of 4,43% and 5,55%, respectively. The sensitivity analysis was carried through for the basins Alto da Colina II and Sítio do Tio Pedro and the parameters that showing higher sensibility in the two basins were capacity of Infiltration (I) and the Manning's roughness coefficient for the modules Runoff and Extran, respectively.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Relação entre os módulos estruturais do modelo SWMM. (Fonte: Garcia, 2005)	31
FIGURA 2 – Localização da bacia hidrográfica Alto da Colina (Fonte: Meller, 2004).....	40
FIGURA 3 - Localização das estações de monitoramento na bacia Alto da Colina ..	40
FIGURA 4 - Estação fluviográfica de monitoramento Alto da Colina I.....	41
FIGURA 5 - Estação pluviográfica Vila Maria.....	42
FIGURA 6 - Estação fluviográfica de monitoramento Alto da Colina II.....	42
FIGURA 7 - Uso do solo para o ano de 2004.....	45
FIGURA 8 - Vazões mínimas instantâneas e médias mensais na estação AC II no período de junho de 2001 a março de 2002.....	47
FIGURA 9 - Vazões máximas instantâneas na estação AC II no período de junho de 2001 a março de 2002	48
FIGURA 10 - Vazões mínimas instantâneas e médias mensais na estação AC I no período de junho de 2001 a março de 2002.....	49
FIGURA 11 - Vazões máximas instantâneas na estação AC I no período de junho de 2001 a março de 2002	49
FIGURA 12 – Curva-chave da estação ACII	50
FIGURA 13 – Curva-chave da estação ACI (Fonte: Meller, 2004).....	51
FIGURA 14 - Valores da precipitação diária na estação pluviográfica Vila Maria no período selecionado	51
FIGURA 15 - Discretização da bacia hidrográfica Alto da Colina II em 6 sub-bacias.....	52
FIGURA 16 - Discretização da bacia hidrográfica incremental Alto da Colina I em 8 sub-bacias.....	54
FIGURA 17 – Concepção dos canais e sub-bacias para a simulação detalhada na bacia Alto da Colina II	55
FIGURA 18 – Concepção dos canais e sub-bacias para a simulação detalhada na bacia Alto da Colina I	57
FIGURA 19 – Seção transversal característica dos trechos 40, 50, 80 e 90.....	58
FIGURA 20 – Seção transversal característica do trecho 70	58
FIGURA 21 – Seção transversal característica dos trechos 10, 20 e 30.....	58
FIGURA 22 – Seção transversal característica dos trechos 130 e 140.....	59
FIGURA 23 – Localização da bacia hidrográfica Sitio do Tio Pedro.	59

FIGURA 24 - Localização das estações de monitoramento na bacia Sítio do Tio Pedro.....	60
FIGURA 25 - Estação fluviográfica de monitoramento Sítio do Tio Pedro	61
FIGURA 26 - Estação pluviográfica Sítio do Tio Pedro	61
FIGURA 27 - Uso do solo na bacia STP	64
FIGURA 28 - Vazões mínimas instantâneas e médias mensais na estação STP I no período de maio de 2003 a dezembro de 2003.....	66
FIGURA 29 - Vazões máximas instantâneas na estação STP I no período de maio de 2003 a dezembro de 2003.....	66
FIGURA 30 - Curva-chave da estação STP (Fonte: Bellinaso, 2002).....	67
FIGURA 31 - Valores da precipitação diária na estação pluviográfica Sítio do Tio Pedro no período selecionado.....	68
FIGURA 32 - Discretização da bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro em 11 sub-bacias.....	69
FIGURA 33 – Concepção dos canais e sub-bacias para a simulação detalhada.....	70
FIGURA 34 – Seção transversal característica dos trechos 100 e 110.....	71
FIGURA 35 – Seção transversal característica dos trechos 60 e 70.....	72
FIGURA 36 – Seção transversal característica dos trechos 80 e 90.....	72
FIGURA 37 – Seção transversal característica dos trechos 10, 20, 30 e 40.....	72
FIGURA 38 – Influência dos parâmetros do módulo Runoff na vazão de pico - ACII83	
FIGURA 39 – Influência dos parâmetros do módulo Runoff na vazão de pico – STP	83
FIGURA 40 – Influência dos parâmetros do módulo Runoff no volume escoado – ACII	85
FIGURA 41 – Influência dos parâmetros do módulo Runoff no volume escoado – STP	86
FIGURA 42 – Influência do parâmetro W na vazão de pico e no volume escoado – ACII	87
FIGURA 43 – Influência do parâmetro W na vazão de pico e no volume escoado - STP	87
FIGURA 44 – Influência do parâmetro AI na vazão de pico e no volume escoado – ACII	88
FIGURA 45 – Influência do parâmetro AI na vazão de pico e no volume escoado - STP	88

FIGURA 46 – Influência do parâmetro n na vazão de pico e no volume escoado - ACII	89
FIGURA 47 – Influência do parâmetro n na vazão de pico e no volume escoado - STP	89
FIGURA 48 – Influência do parâmetro d na vazão de pico e no volume escoado - ACII	90
FIGURA 49 – Influência do parâmetro d na vazão de pico e no volume escoado - STP	90
FIGURA 50 – Influência do parâmetro l na vazão de pico e no volume escoado - ACII	91
FIGURA 51 – Influência do parâmetro l na vazão de pico e no volume escoado - STP	91
FIGURA 52 – Influência do parâmetro n_c na vazão de pico e no volume escoado – ACII	92
FIGURA 53 – Influência do parâmetro n_c na vazão de pico e no volume escoado – STP	92
FIGURA 54 – Evento do dia 05/06/2001 (ACII) - condição de escoamento A	94
FIGURA 55 – Evento do dia 19/07/2001 (ACII) - condição de escoamento A	95
FIGURA 56 – Evento do dia 13/09/2001 (ACII) - condição de escoamento A	95
FIGURA 57 – Evento do dia 30/09/2001 (ACII) - condição de escoamento A	96
FIGURA 58 – Evento do dia 15/10/2001 (ACII) - condição de escoamento A	96
FIGURA 59 – Evento do dia 13/11/2001 (ACII) - condição de escoamento A	97
FIGURA 60 – Evento do dia 31/01/2002 (ACII) - condição de escoamento B	97
FIGURA 61 – Evento do dia 20/02/2002 (ACII) - condição de escoamento B	98
FIGURA 62 – Evento do dia 11/03/2002 (ACII) - condição de escoamento B	98
FIGURA 63 – Evento do dia 25/03/2002 (ACII) - condição de escoamento B	99
FIGURA 64 – Evento do dia 05/06/2001 (ACI).....	103
FIGURA 65 – Evento do dia 13/11/2001 (ACI).....	104
FIGURA 66 – Evento do dia 20/02/2002 (ACI).....	104
FIGURA 67 – Evento do dia 11/03/2002 (ACI).....	105
FIGURA 68 – Evento do dia 08/07/2003 condição de escoamento A	108
FIGURA 69 – Evento do dia 16/11/2003 - condição de escoamento A.....	109
FIGURA 70 – Evento do dia 08/12/2003 - condição de escoamento A.....	109
FIGURA 71 – Evento do dia 15/12/2003 - condição de escoamento A.....	110

FIGURA 72 – Evento do dia 22/05/2003 condição de escoamento B	110
FIGURA 73 – Evento do dia 01/06/2003 condição de escoamento B	111
FIGURA 74 – Evento do dia 24/07/2003 condição de escoamento B	111
FIGURA 75 – Evento do dia 12/11/2003 - condição de escoamento B	112
FIGURA 76 – Variação do coeficiente de rugosidade de Manning em função da precipitação total do evento – AC II	118
FIGURA 77 – Variação do coeficiente de rugosidade de Manning em função da precipitação total do evento – AC I	118
FIGURA 78 – Variação do coeficiente de rugosidade de Manning em função da precipitação total do evento – STP	119
FIGURA 79 – Variação do armazenamento em função da precipitação total do evento – AC II	121
FIGURA 80 – Variação do armazenamento em função da precipitação total do evento – AC I	121
FIGURA 81 – Variação do armazenamento em função da precipitação total do evento – STP	122
FIGURA 82 – Calibração do evento do dia 31/01/2002 na bacia Alto da Colina II para comparação entre as equações de Infiltração	124
FIGURA 83 – Calibração do evento do dia 11/03/2002 na bacia Alto da Colina II para comparação entre as equações de Infiltração	124
FIGURA 84 – Calibração do evento do dia 24/07/2003 na bacia Sítio do Tio Pedro para comparação entre as equações de Infiltração	125
FIGURA 85 – Calibração do evento do dia 08/12/2003 na bacia Alto da Colina II para comparação entre as equações de Infiltração	125
FIGURA 86 – Variação do parâmetro I_b em função do volume total escoado – ACII	127
FIGURA 87 – Variação do parâmetro I_b em função do volume total escoado – AC I	128
FIGURA 88 – Variação do parâmetro I_b em função do volume total escoado - STP	128
FIGURA 89 – Variação do coeficiente de rugosidade no canal em função do volume total escoado – AC II	131
FIGURA 90 – Variação do coeficiente de rugosidade no canal em função do volume total escoado – AC I	132

FIGURA 91 – Variação do coeficiente de rugosidade no canal em função do volume total escoado – STP	132
FIGURA 92 – Caixa para adição de novos módulos	145
FIGURA 93 – Caixa de entrada de dados no módulo Runoff.....	145
FIGURA 94 – Caixa de entrada de dados para sub-bacias, no módulo Runoff	146
FIGURA 95 – Ilustração de uma rede de drenagem em ambiente SIG, no aplicativo PCSWMM 2003.....	146
FIGURA 96 – Esquematização das sub-bacias (Fonte: Garcia, 2005)	149
FIGURA 97 – Representação do reservatório não linear das sub-bacias (Fonte: Garcia 2005).....	150
FIGURA 98 – Esquema do escoamento subterrâneo (Fonte: Garcia, 2005)	152
FIGURA 99 – Método de Euler modificado para a descarga baseado nas projeções de $t+\Delta t/2$ e $t+\Delta t$.(Fonte: Garcia, 2005).....	156

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Resumo das principais características dos aplicativos citados	38
TABELA 2 - Resumo dos principais processos simulados pelos aplicativos.....	38
TABELA 3 - Características físicas da Bacia Hidrográfica Alto da Colina	43
TABELA 4 – Resultado da classificação de uso e ocupação do solo.....	46
TABELA 5 - Características das sub-bacias na discretização detalhada para a bacia AC II	53
TABELA 6 - Características das sub-bacias na discretização detalhada para a bacia AC I	54
TABELA 7 – Características do canal para a discretização detalhada.....	56
TABELA 8 – Características do canal para a discretização detalhada.....	57
TABELA 9 - Características físicas da Bacia Hidrográfica Sitio do Tio Pedro	62
TABELA 10 – Resultado da classificação de uso e ocupação do solo.....	65
TABELA 11 - Características das sub-bacias na discretização detalhada para a bacia Sitio do Tio Pedro.....	69
TABELA 12 – Características do canal para a discretização detalhada.....	71
TABELA 13 – Características dos eventos selecionados da estação pluviográfica Vila Maria para as simulações na bacia Alto da Colina II.....	80
TABELA 14 – Características dos eventos selecionados da estação pluviográfica Sitio do Tio Pedro para as simulações na bacia Sitio do Tio Pedro	80
TABELA 15 – Características dos eventos selecionados da estação pluviográfica Vila Maria para as simulações na bacia Alto da Colina I.....	81
TABELA 16 – Comparação com os resultados obtidos por Meller (2004) - ACII	99
TABELA 17 – Parâmetros obtidos na calibração do modelo para bacia ACII com discretização detalhada.....	100
TABELA 18 – Conjunto dos valores médios dos parâmetros obtidos para cada grupo da bacia ACII durante as calibrações.....	101
TABELA 19 – Resultados obtidos para simulações utilizando os conjuntos de parâmetros médios obtidos para a bacia ACII.....	101
TABELA 20 – Comparação com os resultados obtidos por Meller (2004) - ACI	105
TABELA 21 – Parâmetros obtidos na calibração do modelo para bacia ACI com discretização detalhada.....	106

TABELA 22 – Conjunto dos valores médios dos parâmetros obtidos para a bacia AC durante as calibrações	107
TABELA 23 – Resultados obtidos para simulações utilizando o conjunto de parâmetros médios obtidos para a bacia ACI.....	107
TABELA 24 – Parâmetros obtidos na calibração do modelo para bacia STP com discretização detalhada.....	113
TABELA 25 – Conjunto dos valores médios dos parâmetros obtidos para cada grupo da bacia STP durante as calibrações.....	114
TABELA 26 – Resultados obtidos para simulações utilizando os conjuntos de parâmetros médios obtidos para a bacia STP.....	114
TABELA 27 – Parâmetros obtidos nas calibrações das equações de infiltração	123
TABELA 28 – Ajustes obtidos nas calibrações das equações de infiltração	123
TABELA 29 - Classificação superficial da sub-bacia (Huber e Dickinson, 1992)	148
TABELA 30 - Pontos de controle utilizados no georreferenciamento da imagem do satélite Ikonos para a bacia Alto da Colina	163
TABELA 31 - Pontos de controle utilizados no georreferenciamento da imagem do satélite Ikonos para a bacia Sítio do Tio Pedro	165
TABELA 32 – Características das canalizações da bacia Alto da Colina.....	167
TABELA 33 – Coordenadas (x,y) das seções irregulares utilizadas para representação dos trechos da bacia Alto da Colina	167
TABELA 34 – Características dos bueiros da bacia Sítio do Tio Pedro	169
TABELA 35 – Coordenadas (x,y) das seções irregulares utilizadas para representação dos trechos da bacia Sítio do Tio Pedro.....	169

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Área
AI	Parâmetro de porcentagens de área impermeável
As	Área da superfície do nó
C'	Constante adimensional
C _#	Número de Courant
C _d	Coeficiente de descarga dos orifícios
C _w	Coeficiente de descarga dos vertedores
D	Declividade
DHI	Danish hydraulic institute
$\Delta H_{\text{máx}}$	Nível máximo da superfície d'água no nó
d _i	Altura de armazenamento em áreas impermeáveis
d _p	Altura de armazenamento em áreas permeáveis
Δt	Passo de tempo (intervalo de tempo)
E	Eficiência de Nash e Sutcliffe
EPA	Environmental protection agency
g	Aceleração gravitacional
GHIDROS	Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
GIS	Geographic information system
h	Profundidade
ha	Hectare
H _{máx}	Nível máximo da superfície d'água no passo de tempo
I	Capacidade de infiltração no solo
I ₀	Parâmetro de Infiltração máxima ou inicial
I _b	Parâmetro de Infiltração mínima ou final
k	Coeficiente de decaimento da equação de Horton
k _c	Coeficiente de compacidade
L	Comprimento do canal ou conduto
I _f	Declividade da linha de energia.
I ₀	Declividade do leito
I _e	Largura do retângulo equivalente
L _w	Largura da soleira
m	Metro
m ³	Metro cúbico
mm	Milímetro
MOUSE	Modelling of Urban Sewers
n	Coeficiente de rugosidade de Manning
n _i	Coeficiente de rugosidade de Manning áreas impermeáveis
n _p	Coeficiente de rugosidade de Manning áreas permeáveis
n _c	Coeficiente de rugosidade de Manning no leito do canal
n _r	Coeficiente de rugosidade de Manning na margem direita do canal
n _l	Coeficiente de rugosidade de Manning na margem esquerda do canal
Q	Vazão ou descarga
Q _p	Vazão de pico
Q _{pcal}	Vazão de pico calculada
Q _{pobs}	Vazão de pico observada
R	Coeficiente de correlação
R	Raio hidráulico
RMS	Erro médio quadrático

s	Segundos
S	Declividade equivalente do conduto
S_0	Desvio padrão dos dados observados
S_c	Desvio padrão dos dados calculados
S_f	Declividade da linha de energia
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SWMM	Storm Water Management Model
t	Tempo
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
v	Velocidade
V	Volume
V(t)	Velocidade no conduto
V_{esc}	Volume escoado
$V_{esc\ cal}$	Volume escoado calculado
$V_{esc\ obs}$	Volume escoado observado
W	Largura da sub-bacia
x	Distância
x,y	Coordenadas
y	Profundidade

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Objetivos.....	19
1.1.1 Objetivo Geral.....	19
1.1.2 Etapas	20
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1 Gerenciamento da urbanização em bacias hidrográficas	21
2.2 Modelos de drenagem urbana e equações fundamentais do escoamento	24
2.2.1 Equações fundamentais	24
2.2.2 Classificação dos Modelos	26
2.2.3 Calibração dos modelos	26
2.2.4 Aplicativos utilizados na drenagem	27
2.2.5 Análise e aplicações do modelo SWMM.....	34
2.2.6 Considerações finais	37
3 DESCRIÇÃO E MONITORAMENTO DAS ÁREAS EM ESTUDO ...	39
3.1 Bacia Hidrográfica Alto da Colina.....	39
3.1.1 Localização da Bacia Hidrográfica Alto da Colina	39
3.1.2 Estações de Monitoramento	40
3.1.3 Determinação das características físicas da bacia hidrográfica	43
3.1.4 Clima e solo.....	44
3.1.5 Tipologias de uso e ocupação do solo.....	44
3.1.6 Dados fluviográficos	47
3.1.7 Curva-chave utilizada	50
3.1.8 Dados pluviográficos	51
3.1.9 Discretização da bacia.....	52
3.1.10 Discretização do Arroio.....	55
3.1.11 Seções transversais	57
3.2 Bacia Hidrográfica Sitio do Tio Pedro	59
3.2.1 Localização da Bacia Hidrográfica Sitio do Tio Pedro	59
3.2.2 Estações de Monitoramento	60
3.2.3 Determinação das características físicas da bacia hidrográfica	62
3.2.4 Clima e solo.....	62
3.2.5 Tipologias de uso e ocupação do solo.....	63

3.2.6	Dados fluviográficos	65
3.2.7	Curva-chave utilizada	67
3.2.8	Dados pluviográficos	67
3.2.9	Discretização da bacia.....	68
3.2.10	Discretização do Arroio.....	70
3.2.11	Seções transversais	71
4	APLICAÇÃO DO MODELO SWMM	73
4.1	Análise de sensibilidade.....	73
4.2	Calibração do modelo SWMM	74
4.2.1	Calibração do módulo Runoff	75
4.2.2	Calibração do módulo Extran	76
4.3	Estabilidade do modelo	77
4.4	Representação do sistema de drenagem no modelo SWMM.....	78
4.5	Classificação dos Eventos	79
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO DA APLICAÇÃO DO MODELO	82
5.1	Análise de sensibilidade.....	82
5.1.1	Sensibilidade dos parâmetros do módulo Runoff	82
5.1.2	Sensibilidade do módulo Extran	91
5.2	Resultado da calibração do modelo para a bacia Alto da Colina II	93
5.3	Resultado da calibração do modelo para a bacia Alto da Colina I	102
5.4	Resultado da calibração do modelo para a bacia Sítio do Tio Pedro.....	108
5.5	Análise dos parâmetros obtidos na calibração do módulo Runoff	115
5.5.1	Coeficiente de rugosidade de Manning para as sub-bacias	115
5.5.2	Armazenamento em depressões.....	119
5.5.3	Parâmetros de infiltração.....	122
5.6	Análise dos parâmetros obtidos na calibração do módulo Extran.....	129
6	CONCLUSÕES.....	133
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	137
	ANEXOS	143
	ANEXO A – Janelas de apresentação do aplicativo PCSWMM 2003.....	144
	ANEXO B – Equacionamentos e Procedimentos Utilizados pelos Módulos Runoff e Extran.....	147

ANEXO C – Pontos de controle utilizados no georeferenciamento da imagem do satélite Ikonos para a bacia Alto da Colina.....	162
ANEXO D – Pontos de controle utilizados no georeferenciamento da imagem do satélite Ikonos para a bacia Sítio do Tio Pedro.....	164
ANEXO E – Dados das seções dos canais e canalizações para a bacia Alto da Colina.....	166
ANEXO F – Dados das seções dos canais e bueiros para a bacia Sítio do Tio Pedro.....	168

1 INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos brasileiros têm sofrido um grande impacto nos últimos anos devido ao crescimento urbano, em especial nas grandes cidades, onde estes problemas são cada vez mais visíveis. Um fator que contribui significativamente para o aumento desse problema é a forma desordenada como este crescimento está se dando, e também a falta de iniciativa por parte das autoridades e da própria população no sentido de ao menos amenizar esses efeitos que estão se tornando cada vez mais devastadores.

Dentre os efeitos mais acentuados podem-se destacar o aumento das cheias, que vêm ocorrendo com maior frequência nos grandes centros. Isso ocorre devido à impermeabilização de grandes áreas, que antes permeáveis, armazenavam naturalmente grande quantidade de água, e que passam a serem produtoras de escoamento superficial adicional, e desta maneira acarretam graves problemas em locais mais a jusante, combinado com a prática cada vez mais comum e sem critérios da canalização dos rios e córregos, resultando no aumento da frequência de cheias e alagamentos, causando grandes prejuízos materiais e humanos.

Segundo Tucci (2002), para controlar o impacto da urbanização é necessário desenvolver uma série de ações ordenadas de forma a buscar equilibrar o desenvolvimento com as condições ambientais das cidades.

A ação coordenada entre os poderes públicos, estaduais, federais e municipais é essencial para encontrar um caminho viável, legal, institucional e econômico para solucionar o problema.

É importante um estudo mais aprofundado das etapas de concepção, projeto, implantação e/ou operação dos sistemas de drenagem, que estão diretamente ligados aos problemas das cheias em áreas urbanas.

Avaliar as respostas hidráulicas e hidrológicas, em cada uma destas etapas torna-se uma tarefa difícil devido à falta de informação e de atualização das informações existentes, uma vez que dados hidrológicos de pequenas bacias urbanas são praticamente inexistentes. No entanto, dados de boa qualidade são essenciais no desenvolvimento e aprimoramento de modelos.

O estudo e a compreensão dos fatores que integram o processo de urbanização são de grande importância, pois servem de ponto de partida para a

elaboração de medidas que visem à maximização do uso dos recursos hídricos disponíveis e a convivência harmônica com a população.

Junto com assuntos econômicos e sociais, a preocupação com os impactos nos sistemas de drenagem urbana, tem resultado em uma necessidade de sistemas de gerenciamento e obtenção de informações nesses sistemas devido às condições climáticas variáveis.

Surge então a necessidade de utilização de ferramentas que facilitem a realização de ações preventivas e corretivas na drenagem urbana, analisando a bacia de maneira integrada. Isso vem sendo feito, com o desenvolvimento e utilização de ferramentas computacionais, que facilitam o processo de aquisição de dados, e juntamente com informações georreferenciadas, aumentam a qualidade dos bancos de dados, e facilitam sua manipulação.

Desse modo, as ferramentas computacionais aliadas à modelagem matemática se tornaram indispensáveis, através do uso de aplicativos que simulam a drenagem urbana promovendo uma análise abrangente nos vários campos da mesma, através da vinculação de diversos modelos numa estrutura modular.

O conhecimento dos parâmetros, utilizados nos modelos para representar os processos hidrológicos, é de grande importância, e a atribuição de valores constantes para estes parâmetros, se torna difícil devido à heterogeneidade do solo, vegetação e topografia, principalmente quando analisados para diferentes eventos de chuva que variam no espaço e no tempo.

Ter um total conhecimento dos modelos, em especial dos seus parâmetros, é fundamental para avaliar e comparar as respostas dadas por eles para as mais diversas situações, com aquelas observadas na realidade.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Análise dos parâmetros de calibração do modelo SWMM como elemento para compreensão dos processos envolvidos na estimativa de cheias em bacias urbanas.

1.1.2 Etapas

- Utilização de dados de monitoramento hidrológico e de uso do solo de duas bacias urbanas monitoradas, com diferentes graus de urbanização e declividade na cidade de Santa Maria;
- Utilização de técnicas de geoprocessamento para o levantamento das características físicas das bacias e do processo de urbanização.
- Calibração dos eventos de cheia e o entendimento dos parâmetros envolvidos na simulação.
- Realização de análise de sensibilidade do modelo SWMM, tendo em vista o grau de discretização e avaliação da calibração para diferentes faixas de eventos de cheias.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Gerenciamento da urbanização em bacias hidrográficas

As bacias submetidas a um processo de urbanização sofrem mudanças nas suas características físicas, hidrológicas e hidráulicas, e a magnitude dessas mudanças depende fundamentalmente da intensidade do processo de impermeabilização do solo (Sanchez, 1987).

Segundo Genz e Tucci (1995), os principais impactos que decorrem do desenvolvimento de uma área urbana sobre os processos hidrológicos estão ligados à forma de ocupação da terra, e também ao aumento das superfícies impermeáveis em grande parte das bacias que se localizam próximas a zonas de expansão urbana ou inseridas no perímetro urbano.

Dentre os fatores que proporcionam a transformação ambiental, Santos (2005) destaca o desmatamento e a ocupação das margens dos cursos d'água urbanos para fins de habitação como os principais fatores de degradação ambiental, acelerando o processo de erosão do solo e conseqüente assoreamento dos igarapés, que são pequenos cursos d'água amazônicos caracterizados por pouca profundidade e por correrem quase que no interior da mata desempenhando um importante papel como vias de comunicação, o que acaba gerando uma diminuição no nível de qualidade de vida da parcela populacional que habita aqueles locais.

O desenvolvimento urbano brasileiro tem produzido um impacto significativo na infra-estrutura de recursos hídricos. Para o controle deste impacto é necessário desenvolver uma série de ações ordenadas de forma a buscar equilibrar o desenvolvimento, com as condições ambientais das cidades, Tucci (2002).

O descaso do poder público em relação à política de urbanização se faz sentir de maneira expressiva sobre a infra-estrutura urbana relacionada aos recursos hídricos, especialmente sobre o sistema de drenagem pluvial. O aumento da amplitude das vazões de pico devido à impermeabilização das áreas urbanas leva ao colapso os sistemas de drenagem, que trabalham sob condições não projetadas se revelando ao mesmo tempo ineficientes e de alto custo. (Meller e Paiva, 2004).

Tucci (2002) acrescenta que se mudanças substanciais na forma de gerenciar o espaço das cidades não sejam tomadas o mais breve possível, o prejuízo para a

população e para o ambiente podem se tornar irreversíveis. Esta herança será transferida para as próximas gerações e seremos lembrados principalmente pela nossa irresponsabilidade em não conter este tipo de desenvolvimento.

Segundo ele, a realidade brasileira necessita que mais profissionais se conscientizem do problema e busquem trabalhar para alterar esta realidade e sugere a criação do Plano Diretor de Drenagem integrado com os outros planos setoriais como esgotamento sanitário, resíduos sólidos, e principalmente o de desenvolvimento urbano, como forma para controlar o impacto da urbanização.

Para Ostrowsky (2002) é necessário que os Planos Diretores tenham uma visão integrada da bacia, e que as ações para o controle de enchentes não sejam tomadas para resolver problemas isolados, nem por um curto período de tempo através de obras emergenciais.

Garcia (2005) diz ser necessária uma conscientização quanto à importância dos estudos integrados de drenagem urbana, em nível de bacia hidrográfica. O desenvolvimento de projetos mais eficientes torna-se impossibilitado devido à falta de organização e de recursos financeiros que conduzam a drenagem urbana para um desenvolvimento sustentável.

As medidas de controle da inundação, segundo Tucci (1993), podem ser de dois tipos, estrutural e não-estrutural. As estruturais são aquelas em que os prejuízos decorrentes das enchentes são minimizados através de modificações realizadas no sistema fluvial, enquanto que as não estruturais são aquelas em que a redução nos prejuízos é acarretada por uma melhor convivência da população com as enchentes.

Ele destaca como medidas não estruturais a determinação das áreas de risco e a classificação das zonas devido ao grau de periculosidade a enchentes, possibilitando assim uma adequada urbanização, no processo de expansão da cidade.

Para que estas medidas surtam efeitos, é necessário que os projetos sejam bem elaborados e bem executados, sem causarem grandes modificações no ciclo hidrológico da região, procurando minimizar os impactos qualitativos e quantitativos, causados pela modificação do uso do solo.

O processo de ocupação urbana no Brasil tem contribuído para um aumento significativo na frequência das inundações, e, à medida que a cidade se urbaniza,

em geral ocorre o aumento das vazões máximas, devido ao acréscimo da capacidade de escoamento e impermeabilização das superfícies, (Tucci, 1997).

Nascimento e Heller (2005) comentam que os impactos físicos de maior monta estão relacionados com aumentos em volumes e velocidades de escoamento e com reduções de recarga de aquíferos decorrentes da impermeabilização de superfícies, implantação de canais artificiais (redes de microdrenagem), canalizações de cursos d'água, entre outras ações.

Os impactos de natureza física têm resultado em aumentos de frequência e gravidade de inundações, intensificação de processos erosivos com aumento da produção, transporte e deposição de sedimentos, mudança na morfologia fluvial e impactos sobre os ecossistemas aquáticos, causados por alterações em variáveis hidráulicas que caracterizam o escoamento (velocidades, profundidades, vazões).

Estas modificações no ciclo hidrológico, segundo Garcia (2005), são causadas pela impermeabilização, através de ruas pavimentadas, telhados, calçadas e pátios que oferecem menor resistência ao escoamento superficial que as condições naturais do solo, fazendo com que uma das etapas mais importantes do ciclo hidrológico, que é o processo de infiltração, diminua consideravelmente.

Para Pompêo (2000), a água exerce um papel importante no meio urbano, havendo necessidades de atendimento a demandas diferenciadas, questões relativas à sua qualidade, disponibilidade e escoamento. A gestão da água no meio urbano constitui grande parte do saneamento urbano, e é um caso particular da gestão de recursos hídricos. Em consequência, a ação institucional deve integrar, por um lado, a gestão de recursos hídricos e, por outro, o saneamento ambiental.

Além disso, o planejamento de atividades urbanas relacionadas à água deve estar integrado ao próprio planejamento urbano, incluindo-se aqui o desenho da malha urbana e sua expansão, o zoneamento de atividades, a rede viária e de transportes, fluxos de informações, aspectos paisagísticos, etc.

Choi e Ball (2002) dizem que a administração da quantidade e qualidade do escoamento superficial em áreas urbanas é uma tarefa complexa que se tornou um fator ambiental importante para populações urbanas.

Junto com assuntos econômicos e sociais, a preocupação com os impactos nos sistemas de drenagem urbana, tem resultado em uma necessidade de sistemas de gerenciamento e obtenção de informações, devido às condições climáticas variáveis.

Maksimovic (2001) comenta que, embora os princípios fundamentais que envolvam os processos de drenagem urbana sejam universais, é necessária a verificação local, nas condições climáticas específicas, que devem ser testadas com dados confiáveis.

2.2 Modelos de drenagem urbana e equações fundamentais do escoamento

Segundo Garcia (2005), para que as decisões tomadas pelos administradores e planejadores sejam confiáveis, faz-se necessário entender os processos e os reais impactos que ocorrem na bacia, devido às mudanças de sua composição natural.

Para entender melhor, representar e simular o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes da observada, a ciência desenvolveu uma ferramenta extremamente útil, o modelo hidrológico.

Sands et al (2002) destacam que a modelagem numérica de sistemas de drenagem tornou-se comum na pesquisa e no mundo da engenharia educacional, onde tempo ou duração normalmente não são o fator controlador na execução do estudo de engenharia. No passado, a quantidade de tempo para montar um modelo numérico freqüentemente impedia esta ferramenta de ser utilizada.

A Implementação de um sistema de modelagem de bacia para simulação dos fluxos em um sistema de águas pluviais exige que nas informações monitoradas sejam averiguadas a confiança e a robustez das condições de fluxos preditas (Choi e Ball, 2002).

Para Meller (2004), os modelos de drenagem urbana são compostos basicamente por duas partes seqüencialmente conectadas: um modelo hidrológico onde é feita a transformação da precipitação em escoamento superficial e um modelo hidráulico para propagação do escoamento em redes de condutos e canais.

2.2.1 Equações fundamentais

As equações fundamentais utilizadas para descrever o escoamento unidimensional à superfície livre baseiam-se nas leis da conservação da massa (equação da continuidade) e da quantidade do movimento baseada na 2ª Lei de Newton; as chamadas equações de Saint Venant (Meller, 2004).

As equações de Saint Venant são a base dos modelos de propagação do escoamento em canais e redes de condutos. A equação da continuidade descreve o balanço da massa no escoamento e a equação da quantidade do movimento descreve o balanço das forças sob condições dinâmicas (Ji, 1998).

A seguir, podem ser vistas as equações da continuidade e da quantidade de movimento, respectivamente, na forma não conservativa, embora sejam possíveis outras formas particulares de apresentação em função das variáveis dependentes.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(l_0 - l_f) \quad (2)$$

onde: Q =descarga (m^3/s); A =Área molhada (m^2); h =profundidade (m); g =aceleração da gravidade (m/s^2); x =distância na direção do escoamento (m); t = tempo (s); l_0 =declividade do leito e l_f =declividade da linha de energia.

Os primeiros dois termos do lado esquerdo da igualdade na equação da quantidade do movimento representam as forças de inércia, enquanto que o terceiro termo representa as forças de pressão. O termo do lado direito na equação representa as forças gravitacionais e de atrito.

De acordo com Garcia (2005), os modelos hidrodinâmicos completos não desprezam nenhum termo da equação da quantidade de movimento. Para a solução de suas equações são necessários métodos numéricos baseados em aproximações por diferenças finitas ou elementos finitos. Esses métodos podem ser explícitos ou implícitos.

Quando esquemas de diferenças finitas são aplicados na representação de um sistema é necessária a verificação de sua estabilidade.

Os esquemas explícitos caracterizam-se pela necessidade de intervalos de tempo muito pequenos de simulação, devido a sua estabilidade; já os esquemas implícitos possuem condições de estabilidade que podem ser atendidas com intervalos de tempo maiores (James et al, 2003).

2.2.2 Classificação dos Modelos

Cirilo (2003) classifica os modelos de propagação do escoamento em modelos de armazenamento e hidrodinâmicos.

Os modelos de armazenamento, como o próprio nome indica, consideram somente os efeitos do armazenamento na atenuação e deslocamento da onda de cheia, desprezando os efeitos de atrito levados em conta pela equação da quantidade do movimento.

Os modelos que utilizam as equações de Saint Venant são chamados de hidrodinâmicos, e podem ser classificados em simplificados ou completos, de acordo com a consideração ou não dos termos da equação da quantidade do movimento.

O modelo da onda cinemática é obtido da simplificação através da subtração dos termos de inércia e pressão.

Outra simplificação ocorre para o modelo de difusão, onde o termo de inércia na equação da continuidade é omitido.

Já o modelo hidrodinâmico completo utiliza as equações completas de Saint Venant.

2.2.3 Calibração dos modelos

A calibração do sistema de modelagem de bacias, quando os modelos de verificação são usados para avaliar os parâmetros de controle, consiste em ajustar os parâmetros dentro do modelo de verificação até que um acordo satisfatório entre as características hidrográficas previstas e as monitoradas seja alcançado (Choi e Ball, 2002).

Nesta etapa, segundo Moreira (2005), a determinação dos valores dos parâmetros do modelo pode se dar por tentativa e erro ou automaticamente. Pelo método de tentativa e erro, o usuário testa diferentes conjuntos de parâmetros, prosseguindo nesta operação, até alcançar um vetor de parâmetros que, quando utilizado no modelo, possa tanto quanto possível representar a resposta natural da bacia àquela precipitação. Este método é susceptível à experiência do usuário, onde usuários mais experientes por uma correta interpretação dos parâmetros podem convergir para valores coerentes com a precisão almejada mais rapidamente.

No método automático a busca por um vetor adequado de parâmetros, através de métodos matemáticos de otimização, é feita pela minimização (ou maximização) de uma função objetivo que mede o desvio entre as séries de vazão observada e simulada.

Conhecer os parâmetros utilizados nos modelos para representar os processos hidrológicos é de grande importância. A heterogeneidade do solo, vegetação e topografia dificultam a atribuição de um valor constante para os parâmetros. O entendimento da variação destes torna-se mais complexo quando analisados para diferentes eventos de chuva com variações espaciais e temporais (Garcia, 2005).

2.2.4 Aplicativos utilizados na drenagem

Vários aplicativos foram desenvolvidos nos últimos anos com a finalidade de promoverem uma análise mais abrangente nos vários campos da drenagem urbana, integrando a modelagem do escoamento superficial, propagação em redes de condutos, simulação da qualidade da água e transporte de sedimentos, através da vinculação de diversos modelos sob uma mesma plataforma numa estrutura modular.

Esses modelos geralmente descrevem processos com diferentes níveis de detalhamento e diferentes escalas de tempo. Um modelo pode ser detalhado, apropriado a pequenos intervalos de tempo e espaço, ou ser mais simples e genérico, podendo simular o comportamento de regiões maiores e/ou períodos de tempo mais longos. De fato, muitos modelos trabalham em diferentes escalas espaciais e temporais e eventualmente apresentam respostas diferentes para as simulações, em função de suas estruturas e processos de cálculo.

Fundamentalmente a maioria dos aplicativos apresentados neste item adotam teorias semelhantes, e entre eles destacam-se os modelos SOBEK, InfoWorks, MOUSE-DHI e SWMM que estão descritos sucintamente a seguir.

Modelo Sobek-Urban (WL | DELFT Hydraulics)

O aplicativo SOBEK foi desenvolvido pelo instituto holandês WL | Delft hydraulics em parceria com Instituto Holandês de Gerenciamento de Águas Interiores e Tratamento de Águas Servidas (Dutch Institute of Inland Water

Management and Wastewater Treatment (RIZA)) e empresas holandesas de consultoria em recursos hídricos (WL | DELFT Hydraulics, 2004).

Meller (2004) descreve o SOBEK-Urban como um software de dimensionamento e verificação de redes de condutos, que pode simular redes multiplamente conectadas (até 25.000 condutos), efeitos de jusante, inversões de fluxo, fluxo sob pressão, operação de bombas, vertedores e comportas, bueiros, orifícios, válvulas com sifão, deposição de sedimentos na rede, operação de sistemas em tempo-real e realiza a simulação hidrológica chuva-vazão para vários tipos de superfícies pavimentadas e não-pavimentadas. O programa pode ainda funcionar em conjunto com dois outros aplicativos, SOBEK-Rural e SOBEK-River, que incluem simulação hidrológica chuva vazão contínua, operação múltipla de reservatórios, ferramentas para análise e controle de cheias, estudo envolvendo qualidade da água e transporte de sedimentos em rios.

O aplicativo é dividido em 3 módulos principais: Rainfall Run-off, Water Flow e Real Time Control.

O módulo Rainfall Run-off faz a transformação chuva-vazão aplicada a vários tipos de superfícies como telhados, ruas e áreas de estacionamentos, utilizando o método racional integrado com o modelo de infiltração de Horton. Para simulação de processos mais detalhados incluindo áreas permeáveis ou rurais, industriais, com estruturas de controle do escoamento e integração com o escoamento subterrâneo pode-se optar pela integração com o aplicativo SOBEK-Rural.

O módulo Water Flow propaga o escoamento na rede de condutos. Resolve as equações completas de Saint Venant através do esquema do Delft Hydraulics Laboratory permitindo a simulação de inundações no sistema, escoamento supercrítico sem simplificação das equações, simulação de redes multiplamente conectadas e ressaltos hidráulicos, garantindo a solução para cada intervalo de tempo através de um algoritmo que adapta o intervalo de tempo a certas condições de fluxo.

O módulo real-time control mostra a que extensão a infraestrutura existente pode ser usada da melhor maneira. Permite a simulação de um complexo controle central de sistemas de esgoto em tempo real e que o sistema reaja otimizadamente aos níveis, às descargas e a altura pluvial em qualquer lugar no sistema de esgoto ou em seu ambiente, controlando as portas, as represas, a descarga da bomba, as bacias de retenção, etc.

O módulo real-time control também pode ser ligado ao Matlab, padrão para coordenadores de controle, e esta opção permite que você mesmo defina seu sistema de controle completo em Matlab.

Modelo InfoWorks (Wallinford Software)

Segundo Meller (2004) o InfoWorks surgiu inicialmente como um aplicativo para análise do escoamento em rede de condutos chamado Mainframe WASSP, em 1982 e a base operacional do aplicativo está fundamentada em sua quinta versão, o HydroWorks PM (1994). O HydroWorks possui sua estrutura dividida em 5 módulos principais para estimativa da carga de lavagem, simulação da qualidade da água na rede, construção de hietogramas de projeto, transformação chuva-vazão e propagação na rede de condutos e canais. O módulo chuva-vazão se divide em dois: um para separação do escoamento e outro para propagação na superfície.

A separação do escoamento pode ser feita por seis modelos: Horton, Green-Ampt, Soil Conservation Service (USA) e mais três modelos que utilizam coeficientes baseados nas características da superfície do solo.

A propagação superficial do escoamento pode ser feita através de cinco modelos: Double linear reservoir (Reservatório Linear Duplo), Large contributing área (Ampla Área de Contribuição), SPRINT (modelo de base física que simula a estrutura tridimensional da vegetação), Desbordes runoff model (Modelo de cheias no escoamento superficial) e SWMM runoff model.

Modelo Mouse (DHI)

O sistema MOUSE (Modelling of Urban Sewers), foi desenvolvido em 1984 e 1985 conjuntamente pelo Departamento of Sanitary Engineer da Universidade Técnica da Dinamarca e o Danish Hydraulic Institute (DHI). Em sua primeira versão apresentava-se como um software desenvolvido para a análise de sistemas de águas servidas. Consistia primeiramente em dois sistemas de banco de dados, um módulo computacional e um módulo avançado (Meller, 2004).

O software incluía inicialmente um banco de dados para a descrição da bacia, um para o desenvolvimento de séries históricas de precipitação, módulos para modelagem do escoamento superficial e através de redes de condutos, e um modelo

de qualidade da água e rotinas para apresentação gráfica dos dados de entrada e saída do modelo.

Destaca-se principalmente entre os aplicativos atualmente utilizados, por apresentar propriedades que simplificam seu uso e o tornam mais operacional, através de melhorias em sua interface gráfica facilitando a entrada e modificação de séries de dados, além de contar em sua estrutura com algoritmos para detecção de erros devido à incoerência ou ausência de dados ou parâmetros.

Na versão atual, o aplicativo é organizado em 13 módulos para simulação hidrológica chuva-vazão, propagação do escoamento, da qualidade da água, transporte de sedimentos, simulação de sistemas em tempo real, análise estatística dos dados de saída e ferramentas para apresentação dos resultados.

A transformação chuva-vazão pode ser feita através de 4 modelos, o método tempo-área (modelo A), o modelo da onda cinemática (modelo B), o modelo reservatório linear (modelos C1 e C2) e o hidrograma unitário.

Modelo SWMM (US EPA's)

O modelo SWMM (Storm Water Management Model) foi desenvolvido pela EPA (Environmental Protection Agency) nos anos finais da década de 60 e início da década de 70, sendo alvo de pesquisas até os dias de hoje. O modelo é composto por diversos módulos, possibilitando estudos de aspectos de hidrologia urbana e na determinação de ciclos de qualidade de água, incluindo precipitação, degelo, escoamento superficial, sub-superficial, escoamento através de redes de drenagem, armazenamento e tratamento (Hubber e Dickinson, 1992).

Segundo Garcia (2005) foi o primeiro modelo computacional para análise quali-quantitativa associada ao escoamento gerado em áreas urbanas. O SWMM é o aplicativo mais utilizado para simulação da drenagem urbana, principalmente por ser de domínio público e ter seu código de programação aberto, permitindo modificações ao longo dos últimos 30 anos.

O aplicativo permite análise quali-quantitativa dos problemas relacionados à drenagem e à investigação de alternativas de controle do escoamento, fornecendo subsídios para estimativas de custo para estruturas de armazenamento e tratamento. As soluções adotadas podem ser avaliadas através de simulações que fornecem como resultados hidrogramas, polutogramas e cargas de poluentes.

Além da EPA, empresas que trabalham no desenvolvimento de aplicativos já realizaram modificações no SWMM, a maioria promovendo integração com o ambiente SIG ou CAD, incluindo ferramentas de apresentação dos resultados e melhoria na capacidade do banco de dados do aplicativo.

Huber e Dickinson (1992) apresentam a estrutura do modelo em nove blocos ou módulos, sendo quatro computacionais e cinco de serviços, além do módulo executivo. Salientando os módulos computacionais encontrou-se o módulo Runoff referente à transformação de chuva em vazão, o módulo Transport, ao transporte na rede de drenagem segundo o conceito da onda cinemática, o módulo Extran referente à modelação hidrodinâmica em condutos e canais e o módulo Storage/Treatment ao tratamento da qualidade das águas. Na figura 1 está representada a estrutura dos módulos do SWMM e a inter-relação entre eles.

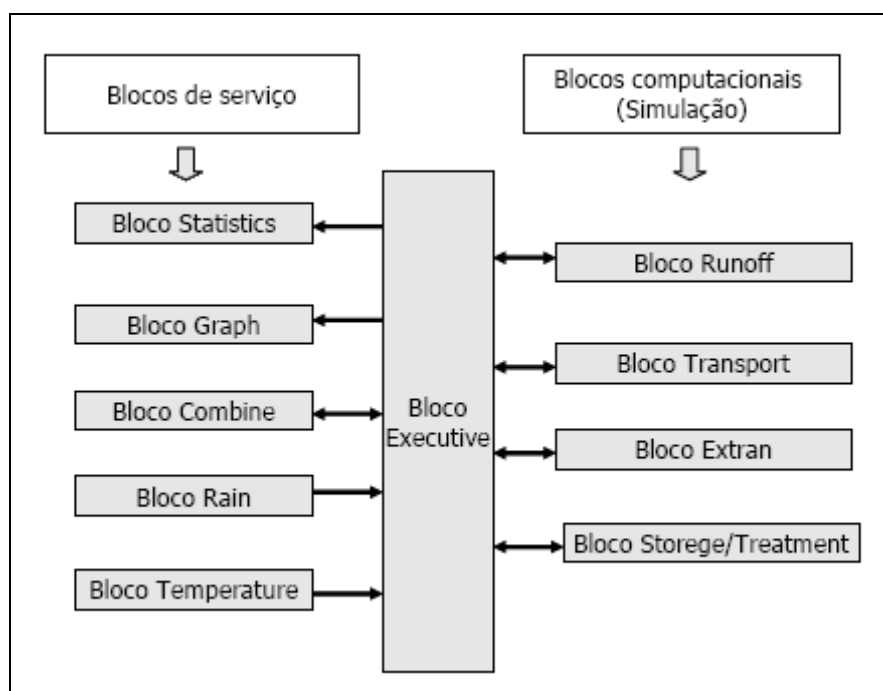


Figura 1 - Relação entre os módulos estruturais do modelo SWMM. (Fonte: Garcia, 2005)

Segundo Meller (2004), os módulos computacionais são os responsáveis pelas principais rotinas de cálculo do aplicativo, como transformação chuva-vazão, propagação na rede, rotinas envolvendo o cálculo de cargas de poluentes e simulação de estruturas de controle quali-quantitativo do escoamento, sendo auxiliados pelos módulos de serviço. Os módulos de serviço possuem funções

diversas, como organização da ordem das simulações (Executive), dos dados de precipitação (Rain) e temperatura (Temp), apresentação de gráficos (Graph) e análise estatística (Statistics) dos resultados.

Neste estudo, foram utilizados os módulos Runnof e Extran, e por isso é apresentada uma descrição parcial destes módulos a seguir.

O módulo Runoff permite a simulação quali-quantitativa do escoamento gerado em áreas urbanas e sua propagação na superfície ou através de canais de forma simplificada. O módulo processa suas rotinas com base em dados de precipitação ou neve, simulando degelo, infiltração em áreas permeáveis (modelos de Horton ou Green Ampt), retenção na superfície, escoamento na superfície e em canais, podendo ser utilizado para simulações de eventos isolados ou contínuos.

A bacia é representada na forma de um conjunto de sub-bacias e canais de propagação interconectados. A área de cada sub-bacia é subdividida em três sub-áreas: impermeável com armazenamento, permeável com armazenamento e permeável sem armazenamento. O escoamento superficial é obtido através de um reservatório não-linear para cada sub-área representado pela combinação das equações de Manning e da continuidade, resolvidas pelo processo iterativo de Newton- Raphson, para valores de d desconhecidos, conforme a equação 3.

$$\frac{dd}{dt} = i^* - \frac{W}{An} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (3)$$

onde: W = largura representativa da sub-bacia; n = coeficiente de rugosidade de Manning; A = área da sub-bacia; S = declividade da sub-bacia; d_p = altura do armazenamento em depressões ao longo da bacia; i^* = precipitação efetiva; d = profundidade da água no reservatório e t = tempo.

As informações básicas para a simulação hidrológica chuva-vazão são, além dos dados de precipitação, área da sub-bacia, largura representativa da sub-bacia, coeficiente de rugosidade de Manning, declividade da sub-bacia, altura do armazenamento em depressões e parâmetros de infiltração. As sub-bacias são divididas em áreas permeáveis e impermeáveis. A largura representativa das sub-bacias é um parâmetro do modelo e provoca alterações no hidrograma, ocasionando efeitos de armazenamento e atenuação nestes (Garcia, 2005).

O módulo de propagação do escoamento em redes de condutos Extran (Extended Transport) foi desenvolvido na cidade de San Francisco (USA), em 1973,

e chamado originalmente de “San Francisco model”, sendo adicionado ao SWMM a pedido da EPA em 1974. Como o próprio nome sugere, o módulo foi introduzido no intuito de promover uma forma de propagação alternativa à proposta pelo módulo Transport (baseado no modelo da onda cinemática), que adicionalmente considerasse os fenômenos mais complexos no escoamento, principalmente o escoamento sob pressão.

O modelo hidrodinâmico Extran propaga o escoamento em redes de condutos ou canais de macro drenagem, utilizando as equações completas de Saint Venant tendo a vazão e a cota piezométrica como variáveis. A solução se dá através de um esquema explícito, segundo o método de Euler modificado. Intervalos de tempo de 5 a 60 segundos são utilizados nas simulações, fazendo com que o tempo de simulação seja uma variável importante no uso do modelo (Roesner et al, 1988).

A representação da rede é baseada no conceito de vínculos e nós. Os vínculos (links) transmitem fluxo entre os nós, sendo a vazão a variável dependente. Os nós têm características de armazenamento.

A equação da continuidade é aplicada aos nós e a equação da quantidade de movimento ao longo dos vínculos (links). A equação dinâmica utilizada pelo modelo é descrita na equação 4.

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{1}{1 + \left(\frac{gn^2 \Delta t}{R} \right)^{\frac{|V|}{-4/3}}} \left\{ Q_t + 2\bar{V} \left(\frac{\Delta Ac}{\Delta t} \right)_t + \bar{V}^2 \left[\frac{(Ac_2 \cdot Ac_1)}{L} \right] \Delta t - g \bar{Ac} \left[\frac{(H_2 \cdot H_1)}{L} \right] \Delta t \right\} \quad (4)$$

onde: g = aceleração de gravidade; n = coeficiente de rugosidade de Manning; R = raio hidráulico; Ac = superfície da seção transversal do conduto; L = comprimento do conduto; H = cota piezométrica e V = velocidade no conduto

Na equação 4 os valores de R , V e A são as médias ponderadas no extremo de jusante do conduto no tempo t e $(\Delta A / \Delta t)_t$ é a derivada no tempo para o passo de tempo anterior.

As incógnitas da equação são $Q_{t+\Delta t}$, H_2 e H_1 . Os sub-índices 1 e 2 referem-se aos extremos de montante e jusante do conduto, respectivamente. As variáveis V , R e A podem ser relacionadas com as variáveis Q e H . A relação entre estas variáveis é obtida da equação da continuidade aplicada aos nós, conforme a equação 5 a seguir (James et al, 2003).

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \sum \left(\frac{Q_t \cdot \Delta t}{A_{nt}} \right) \quad (5)$$

onde: A_n é a área superficial associada a cada nó.

As equações 3 e 4 são resolvidas iterativamente, determinando a descarga em cada link e a cota piezométrica em cada nó, no final do passo de tempo. No anexo A, são mostradas algumas janelas de apresentação e no anexo B podem ser visualizados os equacionamentos e as soluções utilizadas pelo aplicativo.

Roesner et al (1988) citam que o módulo EXTRAN possui algumas limitações, que se não forem consideradas pelo usuário, podem proporcionar uso incorreto ou causar erros no cálculo das vazões e profundidades do escoamento, como:

- As perdas de carga nos poços de visita não são explicitamente calculadas, e se refletem nos valores do coeficiente de Manning dos canais e condutos;
- Mudanças na profundidade de escoamento devidas a contrações ou expansões são desconsideradas;
- Problemas de instabilidades podem ocorrer em nós que contenham estruturas como vertedores nas situações de sobrecarga do sistema.

2.2.5 Análise e aplicações do modelo SWMM

Garcia et al (2004) avaliaram o ganho de qualidade na representação dos eventos observados, através da utilização do modelo SWMM. Na avaliação da discretização foram propostas três alternativas: a bacia concentrada e sub-dividida em sete e onze sub-bacias. Para a bacia concentrada os resultados obtidos não foram tão satisfatórios no ajuste dos hidrogramas, com coeficiente de determinação médio de 0,42. Já as bacias discretizadas, em sete e onze sub-bacias proporcionaram uma melhor representatividade dos processos hidráulicos e hidrológicos ocorridos na região estudada, com coeficientes de correlação maiores que 0,92. Entretanto, os dois graus de discretização não apresentaram diferenças significativas entre si. Portanto, uma maior divisão da bacia, sem um aumento no detalhamento dos parâmetros, nem sempre significa mudanças ou melhorias no ajuste dos hidrogramas porque não é possível fazer a validação dos processos internos em cada um dos sub elementos.

Garcia e Paiva (2005) compararam as respostas do modelo SWMM para a calibração de eventos com faixas de intensidade de precipitação diferentes, buscando o melhor grupo de parâmetros para cada faixa de evento, que representem os fenômenos ocorridos na bacia hidrográfica do Arroio Cancela, localizada em Santa Maria-RS. Os parâmetros de calibração dos eventos de alta e baixa intensidade de precipitação são comparados entre si, bem como a interferência de utilização de parâmetros de baixa intensidade em eventos de alta intensidade e as consequências no hidrograma de cheia resultante.

Sands et al. (2002) utilizaram o aplicativo PCSWMM, uma interface gráfica do modelo SWMM em ambiente Windows, para representação de um sistema de drenagem na cidade de Nova York, EUA. A calibração do modelo apresentou bons resultados, possibilitando a determinação dos pontos críticos do sistema, auxiliando a tomada de decisões a curto e longo prazo.

Bertoni (1998) aplicou o modelo SWMM para uma bacia de 15 km² na cidade de Rafaela no estado de Santa Fé, região central da Argentina. A bacia foi subdividida em áreas homogêneas, somando um total de 51 sub-bacias. O modelo permitiu a representação de condições similares às aquelas observadas na bacia, utilizando os parâmetros dentro dos intervalos recomendados pelos autores do modelo. Em seu estudo o autor comenta a necessidade da utilização de passos de tempo menores que 10 segundos e desaconselha representar condutos ou canais com comprimentos menores que 20 metros devido à instabilidade numérica do modelo. Estes valores obtidos por Bertoni alertam sobre os cuidados que devem ser tomados para a determinação do passo de tempo e do grau de discretização.

Selvalingam et al. (1987 apud GARCIA, 2005), aplicaram o modelo SWMM na bacia hidrográfica urbana de Bukit Timah em Singapura, com área de 6,11 km². Para a simulação foram utilizados os módulos computacionais Runoff e Extran, sendo a bacia discretizada em 19 sub-bacias e 19 canais entre retangulares e trapezoidais. As sub-bacias simuladas apresentaram porcentagens de impermeabilização entre 0 e 55% e declividades variando entre 0,02 e 0,102. Os parâmetros obtidos na calibração de rugosidade de Manning foram de 0,028 e 0,35 para as áreas impermeáveis e permeáveis, respectivamente, e o armazenamento em depressões foi de 2,5 mm e 7,5 mm para as áreas impermeável e permeável respectivamente. Os parâmetros de infiltração de Horton variaram de 50 a 70 mm/h e de 2,0 a 5,0 mm/h para a infiltração inicial (I_0) e infiltração mínima ou final (I_b)

respectivamente, o parâmetro de decaimento de Horton variou entre 0,00007 e 0,00112 s⁻¹.

A calibração do módulo Extran foi realizada nos 19 trechos. O comprimento dos trechos variou entre 92 e 1300 m, os coeficientes de rugosidade variaram entre 0,028 e 0,056.

Os resultados mostraram que o aplicativo SWMM apresentou um bom desempenho para a simulação do sistema de drenagem para a bacia analisada.

Zaghloul (1983) apresentou análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWMM e seus efeitos na discretização da bacia, reduzindo o número de sub-bacias e verificando a variação na precisão das simulações. Uma área hipotética constituída de 25 sub-bacias de 4,65 ha foi determinada, e um hietograma de forma triangular com intensidade de pico de 102,4 mm/h e duração de uma hora foi aplicado à bacia.

No módulo Runoff foram analisados parâmetros de infiltração, armazenamento em depressões, declividade do solo, coeficiente de rugosidade de Manning, porcentagem de impermeabilização e largura das sub-bacias. A porcentagem de impermeabilização e a largura da sub-bacia foram os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade. A taxa de infiltração apresentou uma sensibilidade maior em áreas com baixa porcentagem de impermeabilização, principalmente para o volume escoado. O armazenamento em depressões também apresentou uma sensibilidade maior para o volume escoado. O parâmetro de declividade do solo que depende da topografia foi mais sensível tanto para a vazão de pico como para o volume nas regiões mais planas. O coeficiente de rugosidade de Manning apresentou maior sensibilidade para a vazão de pico e o volume escoado nas áreas de menor rugosidade.

Zaghloul (1983) também utilizou os módulos Runoff e Transport para estudar o nível de discretização para o escoamento superficial e em redes de drenagem urbana, em áreas hipotéticas e reais.

A bacia hipotética estudada possui área total de 260,21 hectares e foi subdividida em 37, 5 e 1 sub-bacia uniforme. Foram obtidos hidrogramas bastante parecidos, para a simulação simplificada e para simulação detalhada, havendo apenas um pequeno aumento na vazão de pico com a diminuição do número de sub-bacias.

Para uma bacia hidrográfica localizada na cidade de Chicago nos EUA , com 4,05 hectares e 46% de área impermeável, foram propostos dois níveis de

discretização, sendo o primeiro com 80 sub-bacias, 40 sarjetas e 4 tubos, com o tamanho das sub-bacias variando de 0,016 a 0,19 hectares. Na segunda discretização, a bacia foi considerada como um todo, e a largura da sub-bacia foi calculada com base nas larguras das 80 sub-bacias. As características físicas para a bacia concentrada (única) são baseadas na média ponderada das sub-bacias.

Para a bacia hidrográfica Bannatyne no Canadá, com 219,34 hectares e 36% de área impermeável, foram propostos três níveis de discretização, com 41, 3 e 1 sub-bacias. O aumento na vazão de pico e o adiantamento do pico são observados para a bacia com pouca discretização. Nas simulações com 3 e 1 sub-bacias, os aumentos na vazão de pico foram de 10 e 20% .

Zaghloul (1983) concluiu que para bacias pequenas, a utilização de uma bacia simplificada, no bloco Runoff é adequada para a simulação do escoamento, uma vez que ele considerou insignificante o escoamento em canais para essas bacias.

2.2.6 Considerações finais

Na revisão bibliográfica foi possível observar o avanço no desenvolvimento dos modelos de drenagem urbana nos últimos anos, especialmente devido ao grande avanço da informática.

Os aplicativos apresentados nos itens anteriores possuem total integração com o SIG, módulos para simulação da qualidade e transporte de sedimentos na rede, algoritmos de detecção de erros, banco de dados com grandes capacidades e interfaces amigáveis ao usuário, facilitando sua utilização.

A opção de utilizar o modelo SWMM tem como principal influência, a acessibilidade do mesmo, uma vez que as características apresentadas pelos modelos citados anteriormente são bastantes semelhantes.

As tabelas 1 e 2 apresenta um resumo das principais características e dos principais processos simulados pelos modelos apresentados.

Tabela 1 - Resumo das principais características dos aplicativos citados

Modelo	Escala de Tempo		Escala Espacial					Passo de Tempo Computacional			
	Evento	Contínuo	Pontual	Campo/ Fazenda	Rio	Bacia	Regional	Segundo	Hora	Dia	Ano
Sobek-Urban	x	x			x	x		x			
InfoWorks	x	x			x	x		x			
Mouse	x	x			x	x		x			
SWMM	x	x			x	x		x			

Tabela 2 - Resumo dos principais processos simulados pelos aplicativos

Modelo	Processos Simulados					
	Escoamento Superficial	Escoamento Subterrâneo	Erosão	Precipitação	Degelo	Qualidade da água
Sobek-Urban	x			x		x
InfoWorks	x	x				x
Mouse	x	x			x	
SWMM	x	x	x	x	x	x

3 DESCRIÇÃO E MONITORAMENTO DAS ÁREAS EM ESTUDO

Os estudos para o desenvolvimento deste trabalho foram focalizados em duas pequenas bacias hidrográficas com diferentes graus de urbanização e características físicas, localizadas na cidade de Santa Maria e pertencentes à área de atuação do Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica dos Rios Vacacaí e Vacacaí-Mirim.

As pequenas bacias urbanas monitoradas pelo GHIDROS (Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria) e que foram estudadas neste trabalho são: Sítio do Tio Pedro e Alto da Colina.

3.1 Bacia Hidrográfica Alto da Colina

A bacia hidrográfica Alto da Colina foi dividida pelo GHIDROS em duas bacias, a bacia hidrográfica Alto da Colina II, que é uma sub-bacia localizada a montante da bacia hidrográfica incremental Alto da Colina I.

3.1.1 Localização da Bacia Hidrográfica Alto da Colina

A bacia hidrográfica Alto da Colina, sub-bacia do Rio Vacacaí Mirim situa-se na região centro-leste do município de Santa Maria-RS, próximo ao Campus da Universidade Federal de Santa Maria e estende-se pelos bairros Camobi, São José e Pains, fica as margens da rodovia RS-509 e é seccionada pela RS-287 entre as coordenadas 53°44'11,5" e 53°43'41" de longitude oeste e 29°41'47" e 29°38'47" de latitude sul.

A figura 2 mostra localização da bacia hidrográfica no município.



Figura 2 – Localização da bacia hidrográfica Alto da Colina (Fonte: Meller, 2004)

3.1.2 Estações de Monitoramento

A localização das estações de monitoramento fluviográfico e pluviográfico, na bacia, podem ser visualizadas na figura 3.



Figura 3 - Localização das estações de monitoramento na bacia Alto da Colina

Está em funcionamento a estação fluviográfica, com registrador eletrônico do tipo Thalimedes (OTT), instalada no exutório da bacia em outubro de 1999, com intervalo de tempo de registro do nível configurado em 1 minuto ou na ocorrência de variação no nível de no mínimo 1 centímetro. Localiza-se nas coordenadas 53°44'11,5" de longitude oeste e 29°41'47" de latitude sul (figura 4).



Figura 4 - Estação fluviográfica de monitoramento Alto da Colina I

A estação pluviográfica Vila Maria está equipada com pluviômetro digital com data logger de balança, configurado para registrar os dados em intervalos de 1 minuto de no mínimo 0,01 mm acumulado neste período, instalada na parte central da bacia em junho de 2000, na coordenada 53°44'52,6" de longitude oeste e 29°42'04,5" de latitude sul (figura 5).



Figura 5 - Estação pluviográfica Vila Maria

Uma vez que a urbanização desta bacia está concentrada na saída, foi construída a estação Alto da Colina II localizada na coordenada $53^{\circ}44'26,4''$ de longitude oeste e $29^{\circ}42'01,5''$ de latitude sul a montante da área urbana, tendo como área de contribuição a parte rural da bacia, dotada de uma calha medidora de fundo plano, e registrador de bóia com data logger, com intervalo de tempo de registro do nível configurado em 1 minuto ou na ocorrência de variação no nível de no mínimo 5 mm que operou durante 6/2001 a 3/2002 (figura 6). Devido a problemas de vandalismo foi necessário desativar esta estação, ficando somente uma régua, que permite a determinação da vazão através da curva-chave construída no período de operação.



Figura 6 - Estação fluviográfica de monitoramento Alto da Colina II

O registro de dados em intervalos de tempo pequenos foi uma necessidade à situação, especialmente na área urbana da bacia que tem tempo de concentração entre 15 e 30 minutos.

3.1.3 Determinação das características físicas da bacia hidrográfica

As características físicas da bacia foram determinadas a partir de um levantamento topográfico plani-altimétrico realizado na área da bacia por Rampellotto et al (2001), posteriormente atualizado por Meller e Paiva (2003).

Também foi realizado levantamento topográfico detalhado da bacia, com levantamento do uso do solo e encontra-se disponível o detalhamento da rede de micro-drenagem, fornecida pela prefeitura Municipal de Santa Maria.

Para auxiliar na determinação das características físicas da bacia, foram utilizadas cartas topográficas na escala 1: 25000, convertidas para o formato digital, com a utilização de Scanner. As cartas foram georreferenciadas e para agilização da digitalização, foi realizada com o software AUTOCAD 2000 (Autodesk).

Nesta bacia foi abordada a modelagem hidrológica-hidráulica com a finalidade de avaliação da rede de microdrenagem através do software MOUSE (Meller e Paiva, 2003, Meller e Paiva, 2004, Meller, 2004) e trabalhos na área de produção de sedimentos e qualidade da água (Paiva et al, 2002, Carvalho et al, 2004, Paz et al, 2004).

Na tabela 3 abaixo podem ser visualizadas algumas das características da bacia hidrográfica.

Tabela 3 - Características físicas da Bacia Hidrográfica Alto da Colina

Parâmetro	AC Total	AC I Incremental	AC II Rural	unid.
Área	1,89	0,45	1,44	km ²
Perímetro	5819,68	2322,46	4709,32	m
Coeficiente de compacidade	1,24	1,48	1,10	
Fator de forma	0,55	0,87	0,99	
Elevação máxima	146,00	132,00	146,00	m
Elevação mínima	112,50	112,50	118,80	m
Comprimento total do rio principal	1874,00	839,00	1035,00	m
Declividade do rio principal	0,0104	0,0075	0,0127	m/m
Declividade média da bacia	0,05	0,014	0,06	m/m

3.1.4 Clima e solo

O clima no município de Santa Maria, na classificação proposta por KÖOPEN, é subtropical úmido do tipo Cfa, onde: C=temperatura média do mês mais frio, entre -3 C° e 18 C°, e a do mês mais quente, superior a 10 C°; f = nenhuma estação seca, úmido o ano todo, onde o mês menos chuvoso tem precipitação superior a 60mm; a=verão quente com temperatura média do mês mais quente superior a 22°.

Para a região da bacia, a classificação do solo existente foi obtida a partir do trabalho de Azolin e Mutti (1988 apud MELLER, 2004), que apresentaram um mapa para a bacia do Rio Vacacaí-Mirim na escala de 1:100000. Segundo eles o solo predominante na região é o Argissolo Hipocrômico Argilúvico abrupico, enquadrado segundo a nova classificação da EMBRAPA (2003). Esses solos estão presentes na unidade geomórfica parte baixa (depressão), caracterizando regiões com solos pouco profundos, com profundidades entre 50 e 100 cm.

3.1.5 Tipologias de uso e ocupação do solo

A determinação do uso e ocupação do solo é de fundamental importância para o entendimento dos processos que ocorrem na drenagem pluvial, em bacias hidrográficas. Apesar de ser uma bacia com predominância rural, a bacia hidrográfica Alto da Colina possui uma parte urbana, onde a resolução e o nível de detalhamento necessário para a determinação do uso do solo são bastante elevados, pois a diversidade de detalhes presentes no meio urbano dificulta a análise.

Na determinação das condições atuais do uso e ocupação do solo foi utilizada uma imagem do satélite Ikonos devido à necessidade de obter dados precisos da urbanização e a exatidão das porcentagens de áreas impermeáveis.

As imagens fornecidas pelo Satélite Ikonos são de alta resolução. A imagem obtida para a realização do trabalho data do dia 21 de dezembro de 2004, e apresenta as seguintes características: imagem pancromática com resolução no terreno de 1 metro e resolução radiométrica de 11 bits, o que possibilita distinguir objetos de 1 m².

O primeiro passo foi o georreferenciamento da porção da imagem selecionada, utilizando o software SPRING, e para isso, foi necessária a obtenção de coordenadas através de cartas topográficas na escala 1:25000 referenciadas pelo Datum horizontal UTM\SAD-69 e Datum vertical Imbituba, e também uma imagem de satélite mais antiga, já georreferenciada anteriormente, de onde foram retiradas as coordenadas dos pontos de controle. Foram obtidos 21 pontos de controle que podem ser visualizados no anexo C. No cálculo da matriz de transformação foi utilizada uma função linear e sua avaliação foi analisada pelo erro médio quadrático (RSM), onde o valor do erro foi 5,56 m.

Para a composição do uso do solo foi feita uma classificação utilizando o software ARCVIEW GIS 3.1, e foram determinadas 7 classes, que foram agrupadas em áreas permeáveis e impermeáveis.

- Classes que representam áreas impermeáveis: ruas e telhados/calçadas;
- Classes que representam áreas permeáveis: espelho de água, campos, solo exposto, terrenos/jardins e vegetação arbórea.

A figura 7 mostra o resultado da análise do uso do solo.

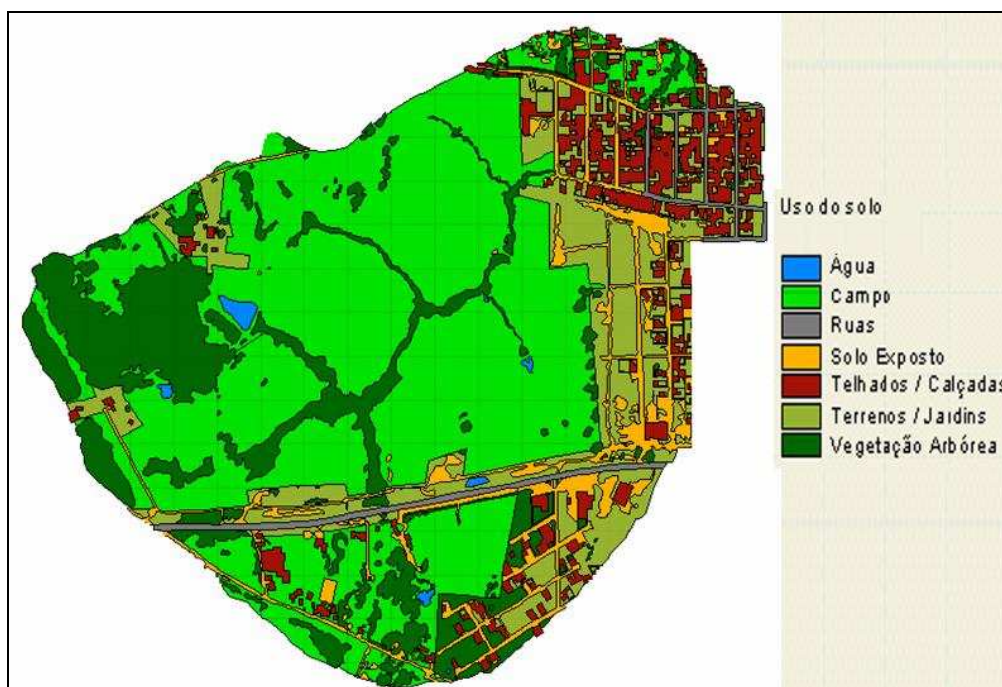


Figura 7 - Uso do solo para o ano de 2004

Cabe salientar que na classificação determinada, a classe denominada campo representa áreas de manejo agrícola, as quais sofreram alterações no tipo de cultura durante o período em estudo.

Segundo Carvalho (2003) essas áreas agrícolas dividiram-se basicamente em três sub-áreas. A primeira, onde em maio de 2001 foi semeado o azevém e em meados de junho, quando apresentou uma razoável altura, esta área foi aberta para a pastagem do gado até outubro. No final do mês de outubro foi semeada a soja que foi colhida em meados de maio de 2002.

A segunda área teve duas culturas de verão, sendo o milho plantado em setembro de 2001 e colhido em janeiro de 2002, e o sorgo cultivado de fevereiro a junho de 2002.

E por fim, uma área onde em junho de 2001 foi semeado o azevém, utilizado para pastagem do gado até novembro. No final do mês de novembro foi semeada a soja que foi colhida em meados de maio de 2002.

Como o objetivo deste estudo era a determinação das porcentagens de áreas permeáveis e impermeáveis, optou-se por agrupar todas as áreas agrícolas em uma única classe.

O resultado da classificação do uso e ocupação do solo foi de 91,31% de áreas permeáveis e 8,69% de áreas impermeáveis para toda a bacia, sendo 75,60% de áreas permeáveis e 24,40% de áreas impermeáveis para a Bacia Incremental (AC I) e 96,18% de áreas permeáveis e 3,82% de áreas impermeáveis para a bacia rural (AC II). O resultado mais detalhado pode ser visto na tabela 4.

Tabela 4 – Resultado da classificação de uso e ocupação do solo

Uso do Solo	Alto da Colina		Alto da Colina I Incremental		Alto da Colina II Rural	
	Área (ha)	(%)	Área (ha)	(%)	Área (ha)	(%)
Espelho de Água (Perm.)	0,83	0,44	0,01	0,02	0,83	0,57
Campos (Perm.)	97,38	51,44	11,09	24,72	86,29	59,74
Ruas (Imperm.)	3,30	1,74	1,42	3,17	1,88	1,30
Solo Exposto (Perm.)	14,50	7,66	5,86	13,07	8,64	5,98
Telhados/Calçadas (Imperm.)	13,16	6,95	9,52	21,23	3,64	2,52
Terrenos/Jardins (Perm.)	28,38	14,99	15,12	33,72	13,25	9,18
Vegetação Arbórea (Perm.)	31,75	16,77	1,83	4,08	29,92	20,72
Permeável	172,84	91,31	33,91	75,60	138,93	96,18
Impermeável	16,46	8,69	10,94	24,40	5,52	3,82

3.1.6 Dados fluviográficos

Como já foi explicado no item 3.1.2, por ser uma bacia com características rurais e urbanas, a região foi dividida em duas áreas de monitoramento. A estação Alto da Colina II (ACII) é responsável pelo monitoramento da parte rural da bacia, que apresenta pequenas taxas de impermeabilização, com predominância de áreas agrícolas. Teve seu período de operação compreendido entre junho de 2001 e março de 2002 durante a pesquisa desenvolvida por Carvalho (2003). A figura 8 mostra as vazões mínimas absolutas e médias mensais na estação AC II no período de junho de 2001 a março de 2002, e a figura 9 mostra as vazões máximas absolutas mensais na estação, neste mesmo período, do qual os dados utilizados na calibração do modelo foram retirados.

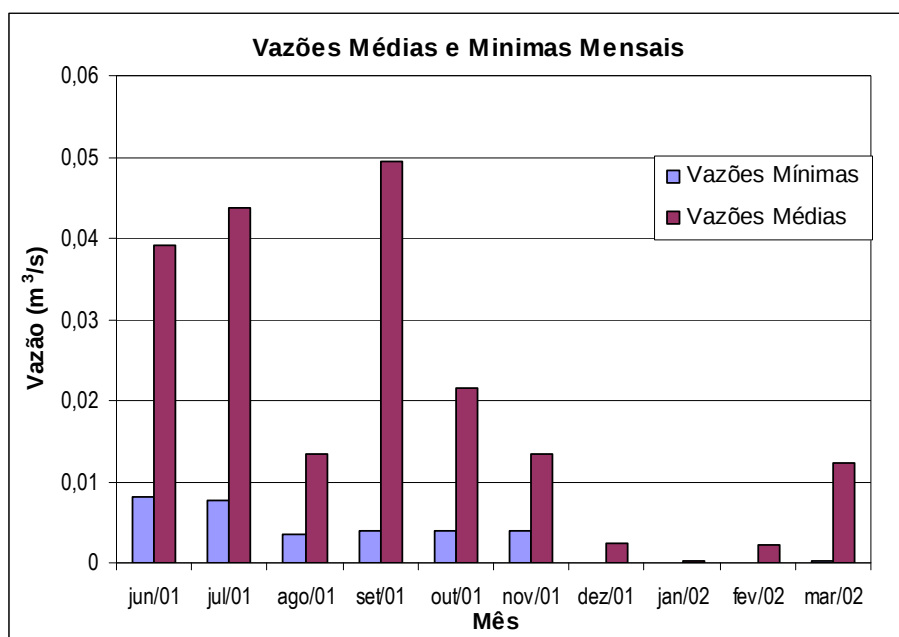


Figura 8 - Vazões mínimas instantâneas e médias mensais na estação AC II no período de junho de 2001 a março de 2002

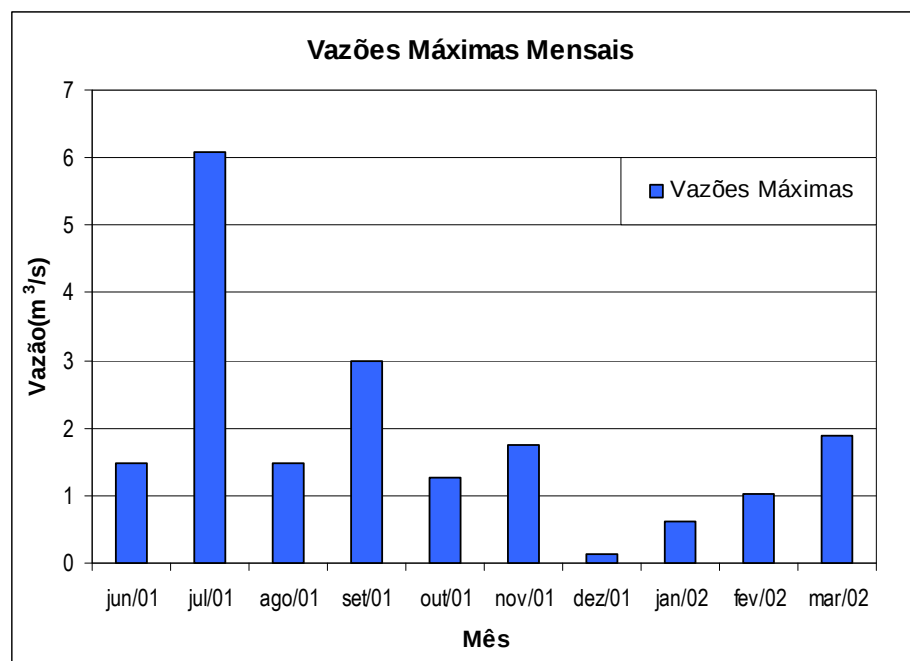


Figura 9 - Vazões máximas instantâneas na estação AC II no período de junho de 2001 a março de 2002

A estação Alto da Colina I (ACI), instalada no final da área urbana da bacia, monitora toda área da bacia, o que inclui parte dos Parques Residenciais Amaral e Novo Horizonte e quase que a totalidade da área urbana do Parque Residencial Alto da Colina. Ainda em operação, teve seu início de operação em outubro de 1999 e foi utilizada por Meller (2004) em suas pesquisas. A figura 10 mostra as vazões mínimas absolutas e médias mensais na estação AC I no período de junho de 2001 a março de 2002, e a figura 11 mostra as vazões máximas absolutas mensais na estação, neste mesmo período.

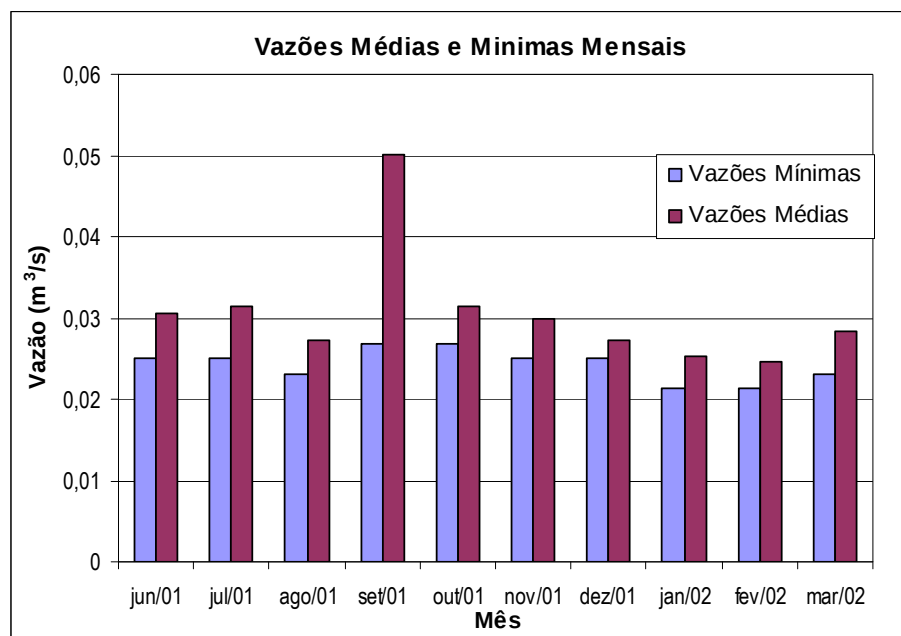


Figura 10 - Vazões mínimas instantâneas e médias mensais na estação AC I no período de junho de 2001 a março de 2002

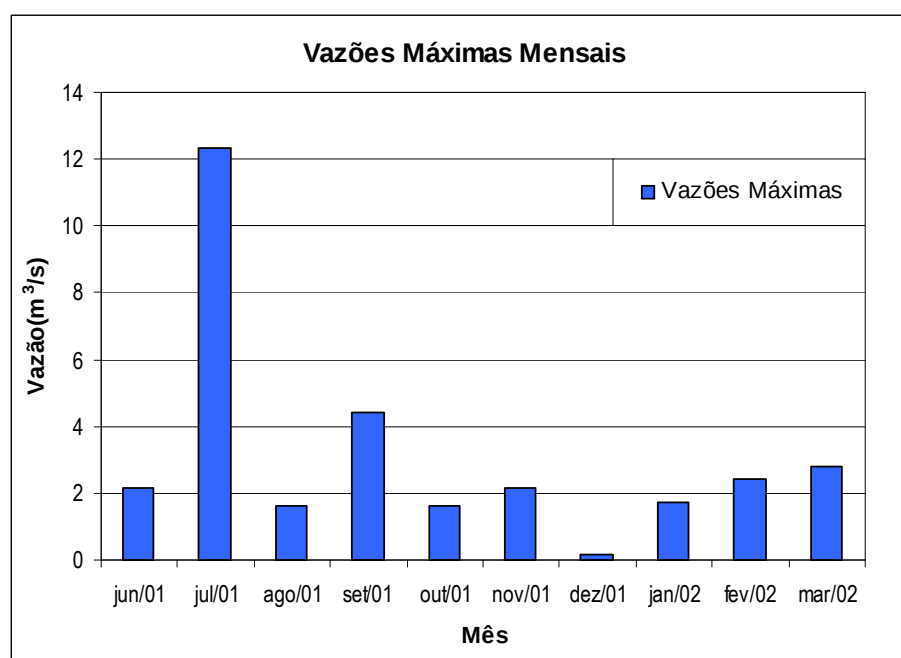


Figura 11 - Vazões máximas instantâneas na estação AC I no período de junho de 2001 a março de 2002

3.1.7 Curva-chave utilizada

Para transformação cota-vazão foram utilizadas duas curvas-chave, relativas as duas estações fluviográficas de monitoramento.

A curva chave utilizada na estação ACII, foi calibrada e apresentada no trabalho de Carvalho (2003) a partir de 19 medições realizadas em campo.

Os valores obtidos para a curva chave cota-vazão, nas três situações encontradas para a estação AC II, podem ser vistos nas equações a seguir:

$$\text{Se } h(m) > 1,38 \quad \rightarrow \quad Q(m^3/s) = 0,0726 e^{2,2464h} \quad (6)$$

$$\text{Se } 1,38 > h(m) > 0,68 \quad \rightarrow \quad Q(m^3/s) = 1,1917 h^{0,8868} \quad (7)$$

$$\text{Se } h(m) < 0,68 \quad \rightarrow \quad Q(m^3/s) = 1,5 h^{1,501} \quad (8)$$

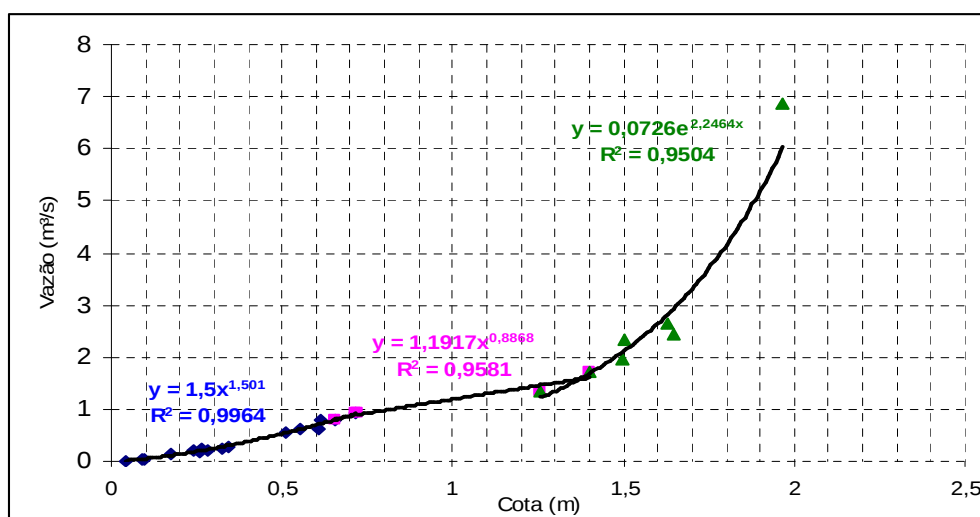


Figura 12 – Curva-chave da estação ACII

A curva-chave da estação ACI foi construída a partir de 23 medições em campo, realizadas entre 1999 e 2002, com atualização no período de abril 2002 a dezembro 2003 por Meller (2004). As medições foram fundamentais para avaliação correta das simulações de cheias.

O ajuste da curva-chave foi dividido em três faixas, de 0 a 0,195 m, 0,195 a 0,954 m e acima de 0,954 m, conforme pode ser visto a seguir.

$$\text{Se } h(m) > 0,954 \quad \rightarrow \quad Q(m^3/s) = 5,036 h - 2,0655 \quad (9)$$

$$\text{Se } 0,954 > h(m) > 0,195 \quad \rightarrow \quad Q(m^3/s) = 3,5101 h^2 - 0,4319 h - 0,0173 \quad (10)$$

$$\text{Se } h(m) < 0,195 \quad \rightarrow \quad Q(m^3/s) = 0,2218 h^{1,1913} \quad (11)$$

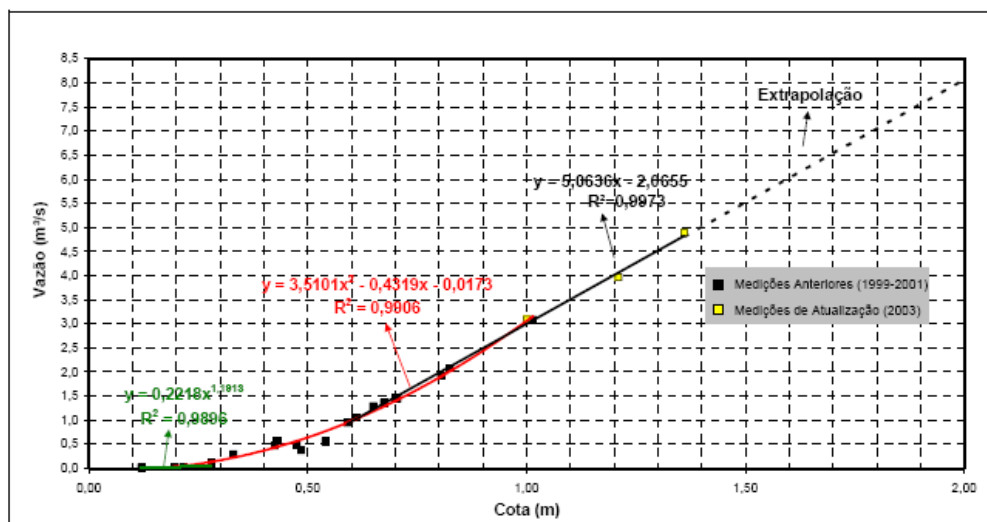


Figura 13 – Curva-chave da estação ACI (Fonte: Meller, 2004)

3.1.8 Dados pluviográficos

Os dados de precipitação utilizados na pesquisa são provenientes da estação pluviográfica Vila Maria. Ao todo foram selecionados 10 eventos entre os anos de 2001 e 2002, para a calibração do modelo. Os dados disponíveis no período selecionado são apresentados na figura 14.

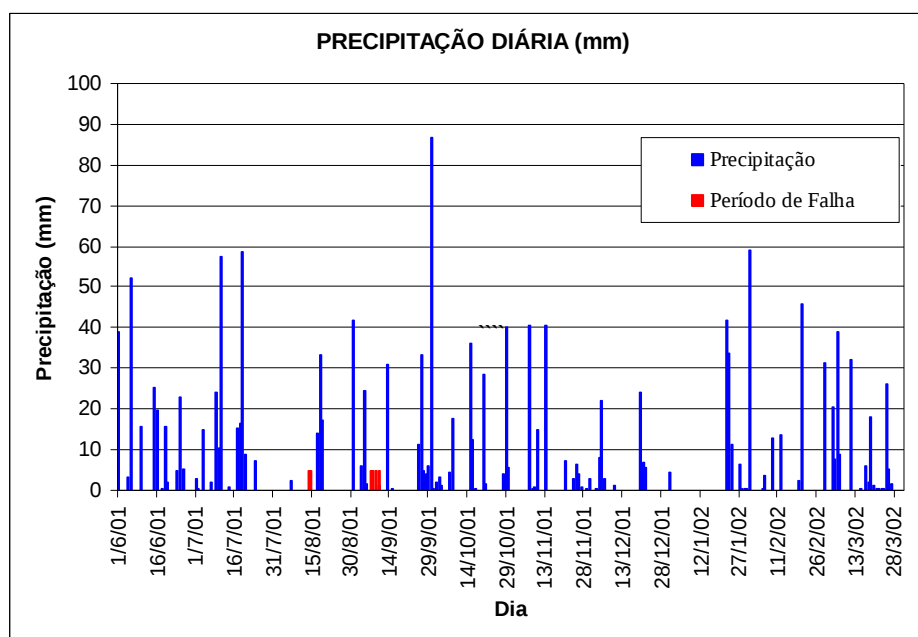


Figura 14 - Valores da precipitação diária na estação pluviográfica Vila Maria no período selecionado

3.1.9 Discretização da bacia

A discretização da bacia hidrográfica levou em conta a homogeneidade das sub-bacias, a situação do sistema de drenagem real e a estabilidade numérica do modelo SWMM.

Segundo Garcia (2005) um fator limitante e de fundamental importância na simulação é a estabilidade numérica do modelo, sendo esta verificada para cada esquema de canais propostos para representação do sistema de drenagem. O tamanho das subáreas deve estar relacionado com sua influência na área total da bacia, pois subdivisões excessivas tornam as subáreas tão pequenas, que sua influência na modelagem separadamente é desprezível.

Bacia Alto da Colina II

Para a bacia hidrográfica Alto da Colina II foi adotado um nível de discretização em 6 sub-bacias com base no uso do solo e nas condições locais, em especial a distribuição da rede de drenagem.

A figura 15 mostra a bacia Alto da Colina II com a discretização detalhada em 6 sub-bacias.

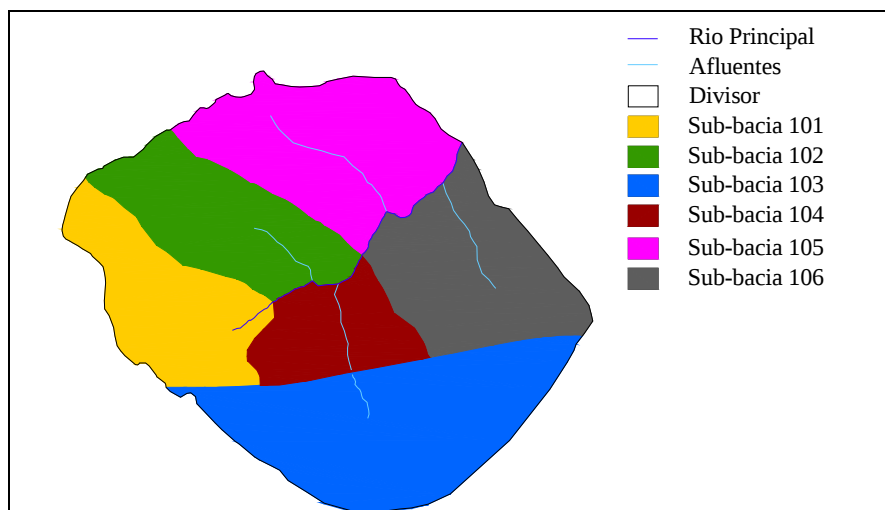


Figura 15 - Discretização da bacia hidrográfica Alto da Colina II em 6 sub-bacias

As características físicas das 6 sub-bacias, são apresentadas na tabela 5.

Tabela 5 - Características das sub-bacias na discretização detalhada para a bacia AC II

Discretização	Sub-bacia	Largura da sub-bacia (m)	Área (ha)	% Área Impermeável	Declividade (m/m)
Discretização detalhada (6 sub-bacias)	101	254,90	20,74	1,63	0,020
	102	274,03	21,29	0,82	0,028
	103	312,38	36,89	11,84	0,014
	104	230,43	12,90	1,92	0,027
	105	329,56	27,94	0,27	0,032
	106	360,21	24,70	1,28	0,035

Na definição da largura das sub-bacias (w), foi adotado o valor da largura do retângulo equivalente (le), para a representação deste parâmetro, visto na equação 12, onde o coeficiente de compacidade é obtido pela equação 15.

$$le = \frac{k_c \sqrt{A}}{112} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1128}{k_c} \right)^2} \right] \quad (12)$$

$$k_c = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (13)$$

onde: le = largura do retângulo equivalente; A = área da bacia hidrográfica ou sub-bacia; k_c = coeficiente de compacidade; P = perímetro da bacia hidrográfica ou sub-bacia.

Bacia Alto da Colina I

Para a bacia hidrográfica Alto da Colina I, inicialmente pensou-se em fazer a discretização da bacia em 48 sub-bacias, de acordo com a distribuição do sistema de drenagem da bacia, mas devido a problemas de instabilidade no modelo, devido ao diâmetro muito pequeno da microdrenagem, que conforme foi constatado no evento real não absorvia toda a vazão e transbordava, não foi possível simular o sistema de drenagem na versão do modelo utilizada. Devido a esses fatores foi adotado um nível de discretização em 8 sub-bacias com base no uso do solo e na distribuição da rede de drenagem. Optou-se por colocar o hidrograma de saída da bacia Alto da Colina II como um dado de entrada, visando focar a calibração dos parâmetros para a área urbana da bacia.

A figura 16 mostra a bacia incremental Alto da Colina I discretizada em 8 sub-bacias.

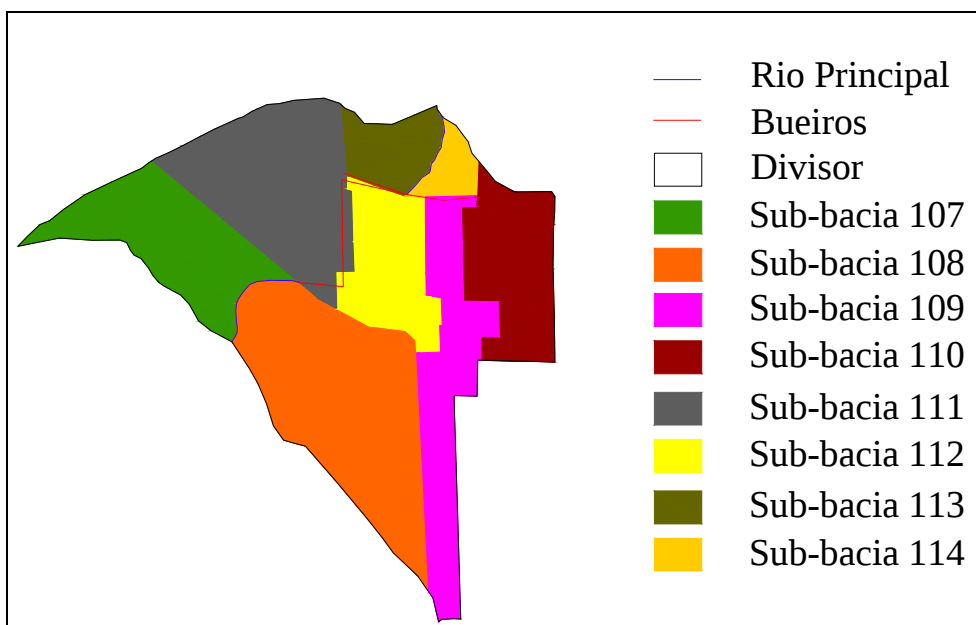


Figura 16 - Discretização da bacia hidrográfica incremental Alto da Colina I em 8 sub-bacias

As características físicas das 8 sub-bacias são apresentadas na tabela 6.

Tabela 6 - Características das sub-bacias na discretização detalhada para a bacia AC I

Discretização	Sub-bacia	Largura da Sub-bacia (m)	Área (ha)	% da Área Impermeável	Declividade (m/m)
Discretização detalhada (8 sub-bacias)	107	114,10	6,79	0,00	0,04372
	108	200,60	12,16	3,37	0,04124
	109	65,56	6,35	33,23	0,02685
	110	113,85	5,35	61,39	0,01468
	111	141,78	7,26	28,87	0,03907
	112	112,13	4,56	56,45	0,00222
	113	48,90	1,40	18,21	0,01745
	114	46,10	0,99	21,84	0,02324

3.1.10 Discretização do Arroio

A discretização do arroio e seus afluentes foi realizada a partir de um estudo de campo e de um levantamento topográfico.

O levantamento topográfico foi feito com auxílio de uma estação total, e consistiu do levantamento do perfil do leito do rio e de diversas seções transversais que foram levantadas em lugares previamente definidos procurando-se obter seções representativas para os trechos do arroio.

Bacia Alto da Colina II

A bacia Alto da Colina II não apresenta área urbana com rede coletora de águas pluviais. A rede de drenagem consiste apenas nos trechos de arroio, e um trecho muito curto de bueiros sob a taipa de uma pequena barragem. Desta forma a representação final do sistema de drenagem para a discretização adotada consiste em 7 trechos, sendo estes classificados em 6 canais irregulares e 1 trecho com condutos circulares.

A figura 17 mostra o desenho esquemático das concepções dos canais e sub-bacias para a simulação detalhada (6 sub-bacias).

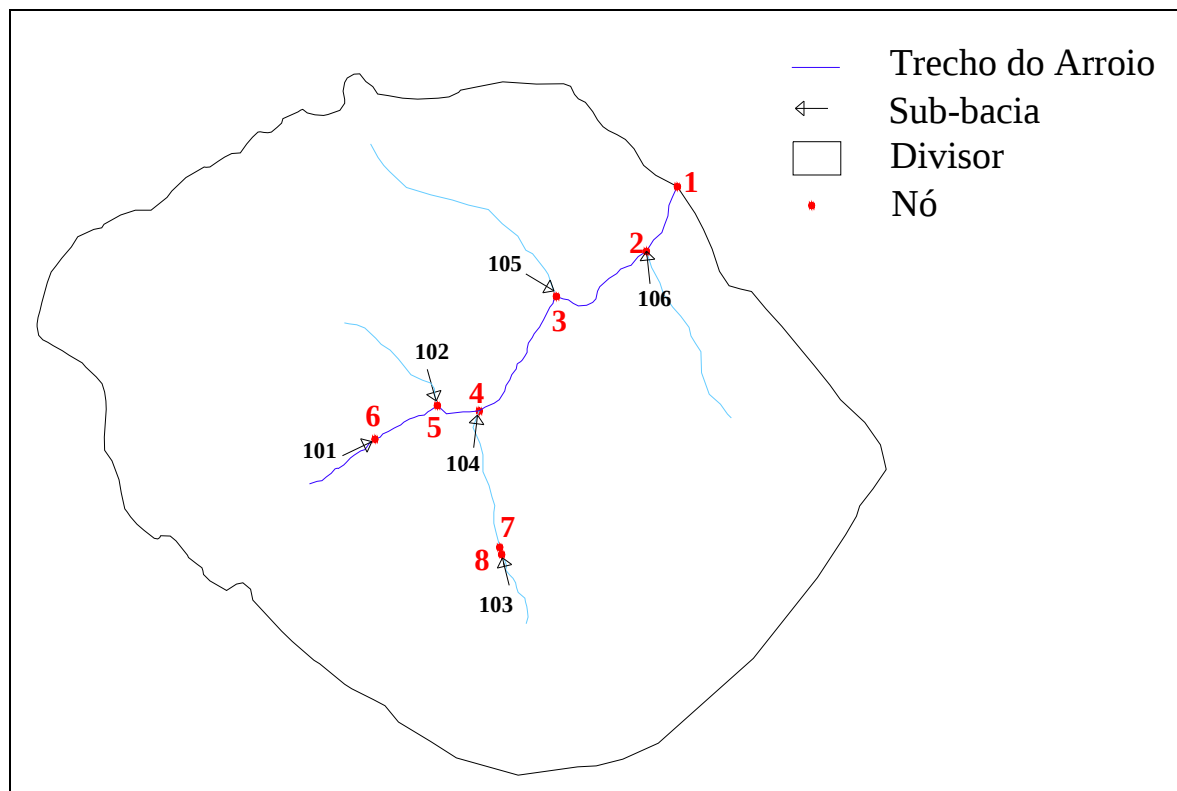


Figura 17 – Concepção dos canais e sub-bacias para a simulação detalhada na bacia Alto da Colina II

Na tabela 7 são apresentadas as características do canal para a discretização detalhada. No anexo E são apresentadas as coordenadas das seções irregulares e retangulares adotadas para cada trecho do canal e as dimensões do bueiro.

Tabela 7 – Características do canal para a discretização detalhada

Conduto	Nó 1	Nó 2	Comprimento (m)	Seção Transversal	Declividade (m/m)
10	6	5	140,7	Canal Irregular	0,0149
20	5	4	87,5	Canal Irregular	0,016
30	4	3	278,4	Canal Irregular	0,0122
40	3	2	226,9	Canal Irregular	0,0088
50	2	1	142,6	Canal Irregular	0,0056
60	8	7	14,2	Conduto Circular	0,007
70	7	4	276,8	Canal Irregular	0,0199

Bacia Alto da Colina II

A bacia Alto da Colina I tem quase a totalidade de sua área coberta por loteamentos urbanos com rede coletora de águas pluviais, mas devido a problemas de instabilidade no modelo como já foi explicado anteriormente optou-se por representar somente os trechos de arroio e o trecho de arroio canalizado. Desta forma a representação final do sistema de drenagem para a discretização adotada consiste em 7 trechos, sendo estes classificados em 4 canais irregulares e 3 trechos com condutos circulares.

Também foi inserido o hidrograma de saída da bacia Alto da Colina II como um dado de entrada no nó que representa o exutório da bacia Alto da Colina II.

A figura 18 mostra o desenho esquemático das concepções dos canais e sub-bacias para a simulação detalhada (8 sub-bacias).

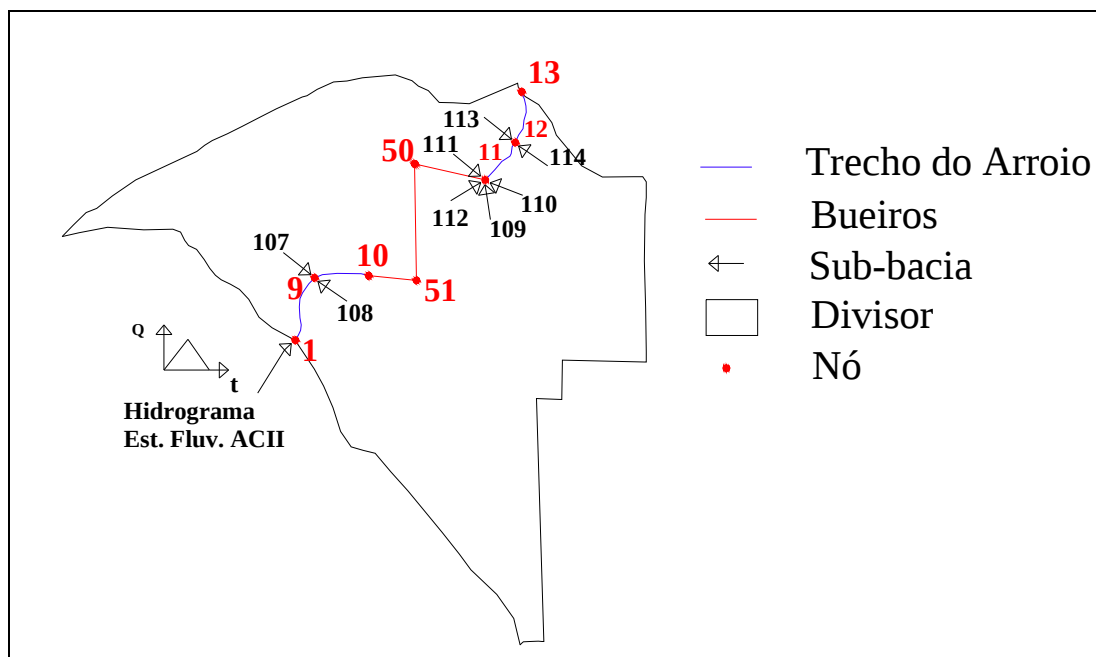


Figura 18 – Concepção dos canais e sub-bacias para a simulação detalhada na bacia Alto da Colina I

Na tabela 8 são apresentadas as características do canal para a discretização detalhada. No anexo E são apresentadas as coordenadas das seções irregulares e retangulares adotadas para cada trecho do canal e as dimensões da canalização.

Tabela 8 – Características do canal para a discretização detalhada

Conduto	Nó 1	Nó 2	Comprimento (m)	Seção Transversal	Declividade (m/m)
80	1	9	109,620	Canal Irregular	0,00639
90	9	10	113,694	Canal Irregular	0,00176
100	10	51	86,22	Conduto Circular	0,0049
110	51	50	214,48	Conduto Circular	0,0032
120	50	11	141,17	Conduto Circular	0,0069
130	11	12	89,775	Canal Irregular	0,0070
140	12	13	97,708	Canal Irregular	0,0071

3.1.11 Seções transversais

No levantamento topográfico, com o auxílio de uma estação total, foram obtidas 7 seções transversais, sendo selecionadas as mais representativas para cada trecho

do canal simulado. As figuras 19, 20, 21 e 22 apresentam estas seções características.

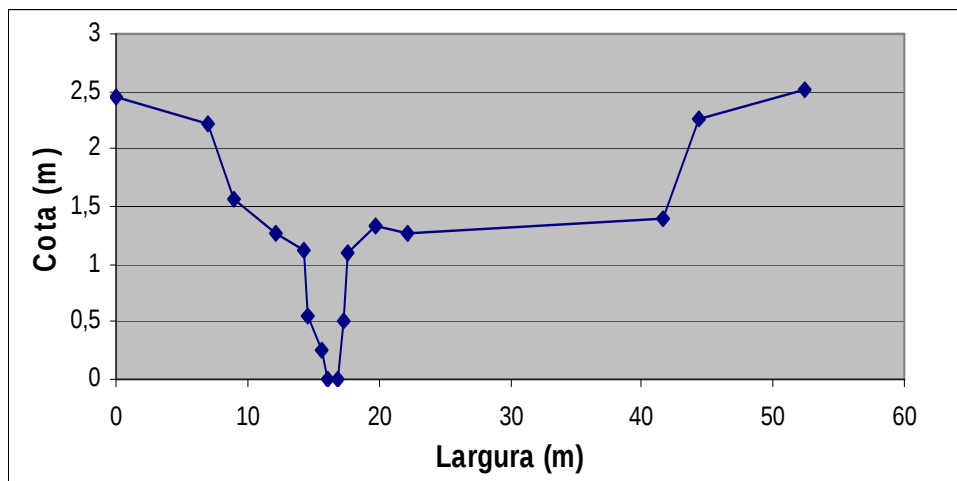


Figura 19 – Seção transversal característica dos trechos 40, 50, 80 e 90

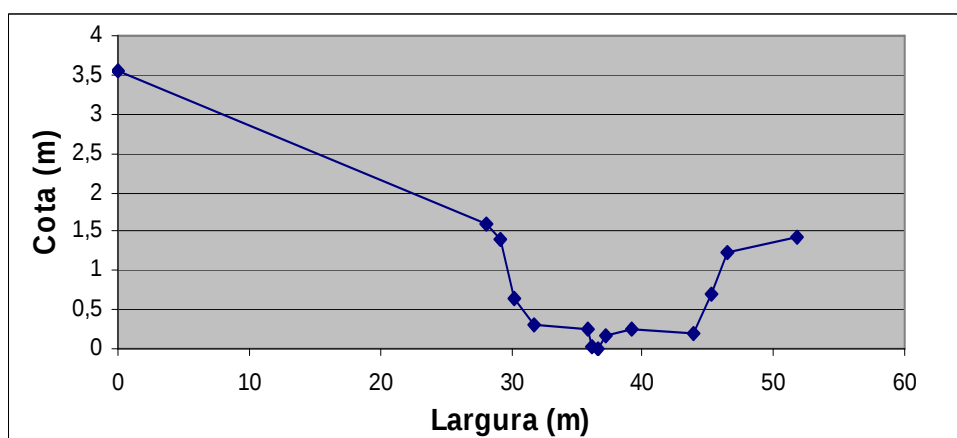


Figura 20 – Seção transversal característica do trecho 70

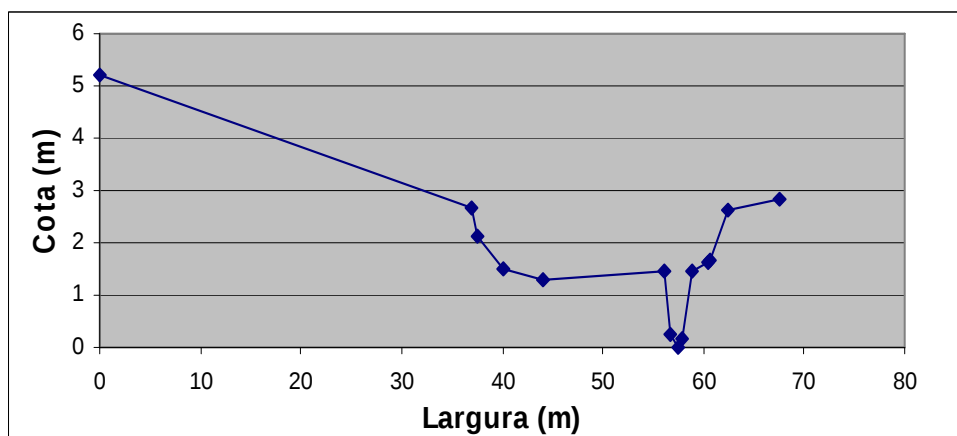


Figura 21 – Seção transversal característica dos trechos 10, 20 e 30

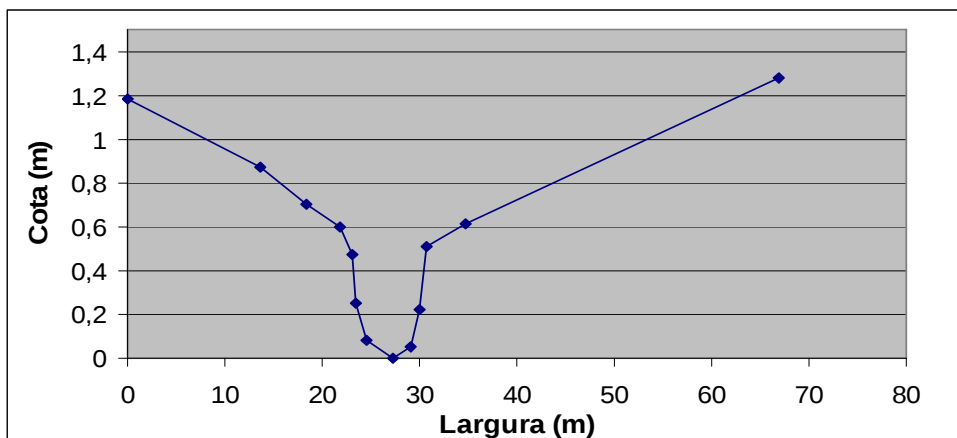


Figura 22 – Seção transversal característica dos trechos 130 e 140

3.2 Bacia Hidrográfica Sítio do Tio Pedro

3.2.1 Localização da Bacia Hidrográfica Sítio do Tio Pedro

A bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro, sub-bacia do Rio Vacacaí Mirim situa-se na região nordeste do município de Santa Maria-RS, na localidade do Campestre do Menino Deus, às margens do reservatório do Vacacaí Mirim, numa região de encosta e em fase de urbanização, entre as coordenadas 53°47'05" e 53°48'00" de longitude oeste e 29°40'20" e 29°40'40" de latitude de sul.

A figura 23 mostra localização da bacia hidrográfica no município.

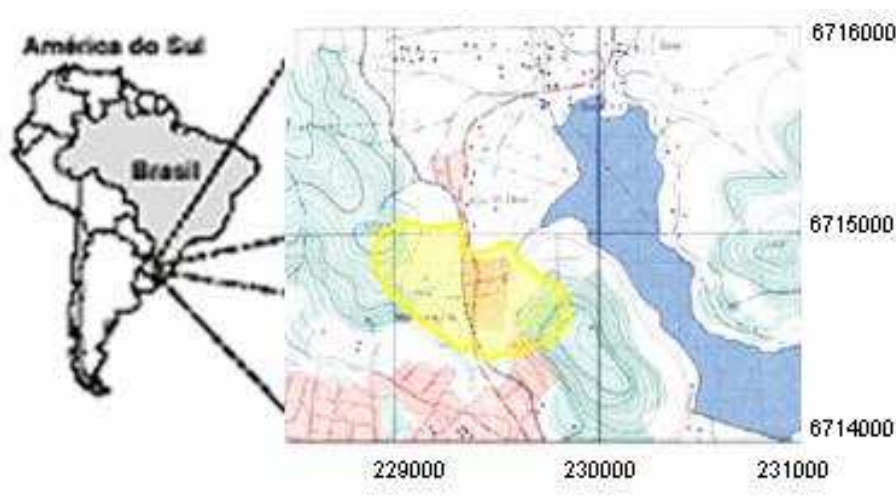


Figura 23 – Localização da bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro.

3.2.2 Estações de Monitoramento

A localização das estações de monitoramento fluviográfico e pluviográfico, na bacia, pode ser visualizada na figura 24.



Figura 24 - Localização das estações de monitoramento na bacia Sítio do Tio Pedro

Nesta bacia foi operada, pelo GHIDROS, a estação fluviográfica Sítio do Tio Pedro, localizada nas coordenadas de longitude $53^{\circ} 47' 37,6''$ Oeste e latitude $29^{\circ} 39' 59,5''$ Sul, tendo início em junho de 2000 (BELLINASSO e Paiva, 2002, 2003, Belló e Paiva, 2004). O enfoque principal destes trabalhos foi em produção de sedimentos. Neste presente estudo são abordados os aspectos hidráulico-hidrológico das cheias em bacias em urbanização. A estação fluviográfica Sítio do Tio Pedro, pode ser vista na figura 25.



Figura 25 - Estação fluviométrica de monitoramento Sitio do Tio Pedro

Para o registro da precipitação foi instalado, no mesmo local das estações fluviométricas, um pluviômetro eletrônico com data logger que permite uma discretização temporal em intervalos de tempo mínimos de 1 minuto, de no mínimo 0,01 mm acumulado neste período, que operou no período de 01/06/2003 a 30/04/2005, e pode ser vista na figura 24.

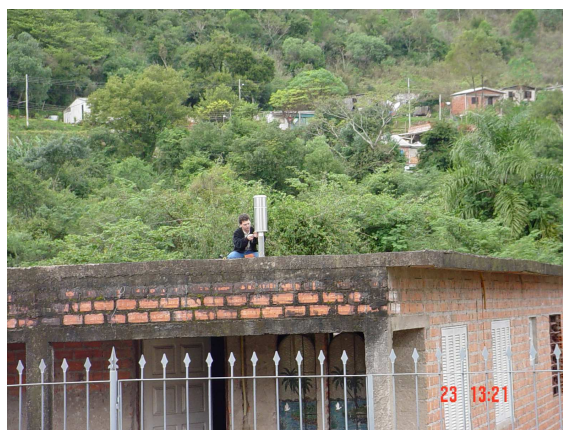


Figura 26 - Estação pluviométrica Sitio do Tio Pedro

3.2.3 Determinação das características físicas da bacia hidrográfica

As características físicas da bacia foram determinadas a partir de um levantamento topográfico plani-altimétrico realizado na área da bacia por Bellinaso (2002).

Para auxiliar na determinação das características físicas da bacia, também foram utilizadas cartas topográficas na escala 1: 25000, que foram convertidas para o formato digital, com a utilização de Scanner, georreferenciadas, para uma agilização da digitalização, que foi realizada com o software AUTOCAD 2000 (Autodesk).

Na tabela 9 abaixo podem ser visualizadas algumas das características da bacia hidrográfica.

Tabela 9 - Características físicas da Bacia Hidrográfica Sítio do Tio Pedro

Parâmetro	STP	unid.
Área	0,39	km ²
Perímetro	2720,01	m
Coeficiente de compacidade	1,22	
Fator de forma	0,66	
Elevação máxima	305,00	m
Elevação mínima	138,00	m
Comprimento total do rio principal	463,85	m
Declividade do rio principal	0,10	m/m
Declividade média da bacia	0,26	m/m

3.2.4 Clima e solo

Conforme já foi dito no item 3.1.4, o clima no município de Santa Maria, na classificação proposta por KÖOPEN, é subtropical úmido do tipo Cfa, onde: C=temperatura média do mês mais frio, entre -3 C° e 18 C°, e a do mês mais quente, superior a 10 C°; f = nenhuma estação seca, úmido o ano todo, onde o mês menos chuvoso tem precipitação superior a 60mm; a=verão quente com temperatura média do mês mais quente superior a 22°. Segundo Bel Ió (2004), na área em estudo foram identificados três tipos de unidades geológicas formais; Formação Serra

Geral, Formação Botucatu e formação Caturrita. Também foram identificados depósitos coluvionares.

Quanto à classificação dos solos com suas principais classes e características utilizadas neste trabalho, foi aquela elaborada por Azolin & Mutti (1988 apud MELLER, 2004), e posteriormente descrito por Bellinaso (2002) como segue:

a) Podzólico Bruno - Acinzentado Álico (PBa1): estes solos ocorrem na unidade geomórfica parte baixa (depressão), caracterizando regiões com solos pouco profundos, com profundidades entre 50 e 100 cm. O relevo predominante neste solo é o suave ondulado, com declividades que oscilam entre 3 a 8 %.

b) Solo Litólico Eutrófico Relevo Forte Ondulado (Re3): estes solos ocorrem na unidade geomórfica parte superior. O relevo forte ondulado possui declividades que variam de 20 a 45 %.

c) Associação de Solo Litólico Eutrófico - Cambissolo - Colúvios (Re- C-Co): estes solos ocorrem na unidade geomórfica da região do degrau estrutural.

3.2.5 Tipologias de uso e ocupação do solo

A bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro é uma bacia hidrográfica de encosta semi urbanizada, com uso do solo extremamente diversificado, contendo desde cobertura vegetal com matas nativas e ciliares, até as condições artificiais oferecidas e provocadas pela urbanização.

Quanto à cobertura vegetal na área em estudo, são predominantes as matas nativas, ciliares, e arbustivas. Pode-se constatar também que não existem locais utilizados ao manejo da pecuária e nem a existência de solos agricultáveis.

Na determinação das condições atuais do uso e ocupação do solo foi utilizada uma imagem do satélite Ikonos devido à necessidade de obter dados precisos da urbanização e a exatidão das porcentagens de áreas impermeáveis.

A imagem utilizada foi fornecida pelo Satélite Ikonos é de alta resolução. A imagem utilizada para a realização do trabalho data do dia 29 de maio de 2004, se caracteriza por ser uma imagem pancromática com resolução no terreno de 1 metro e resolução radiométrica de 11 bits, o que possibilita distinguir objetos de 1 m².

Para a utilização da imagem alguns processos foram executados. Primeiramente foi selecionada a parte da imagem que contém a bacia hidrográfica

em estudo, pois a imagem original possui aproximadamente 10 km x 10 km de dimensões. O segundo passo foi o georreferenciamento da porção da imagem selecionada, utilizando o software SPRING, e para isso, foi necessária a obtenção de coordenadas através de cartas topográficas na escala 1:25000 referenciadas pelo Datum horizontal UTM\SAD-69 e Datum vertical Imbituba, e também uma imagem de satélite mais antiga, já georreferenciada anteriormente, de onde foram retiradas as coordenadas dos pontos de controle. Foram obtidos 15 pontos de controle que podem ser visualizados no anexo D. No cálculo da matriz de transformação foi utilizada uma função linear e sua avaliação foi feita através do erro médio quadrático (RSM), o valor do erro foi 4,26 m.

Para a composição do uso do solo foi feita uma classificação utilizando o software ARCVIEW GIS 3.1, e foram determinadas 7 classes, que foram agrupadas em áreas permeáveis e impermeáveis.

- Classes que representam áreas impermeáveis: ruas e telhados/calçadas;
- Classes que representam áreas permeáveis: espelho de água, campos, solo exposto, terrenos/jardins e vegetação arbórea.

A figura 27 mostra o resultado da análise do uso do solo.

O resultado da classificação do uso e ocupação do solo foi de 86,91% de áreas permeáveis e 13,09% de áreas impermeáveis para toda a bacia. O resultado mais detalhado pode ser visto na tabela 10.

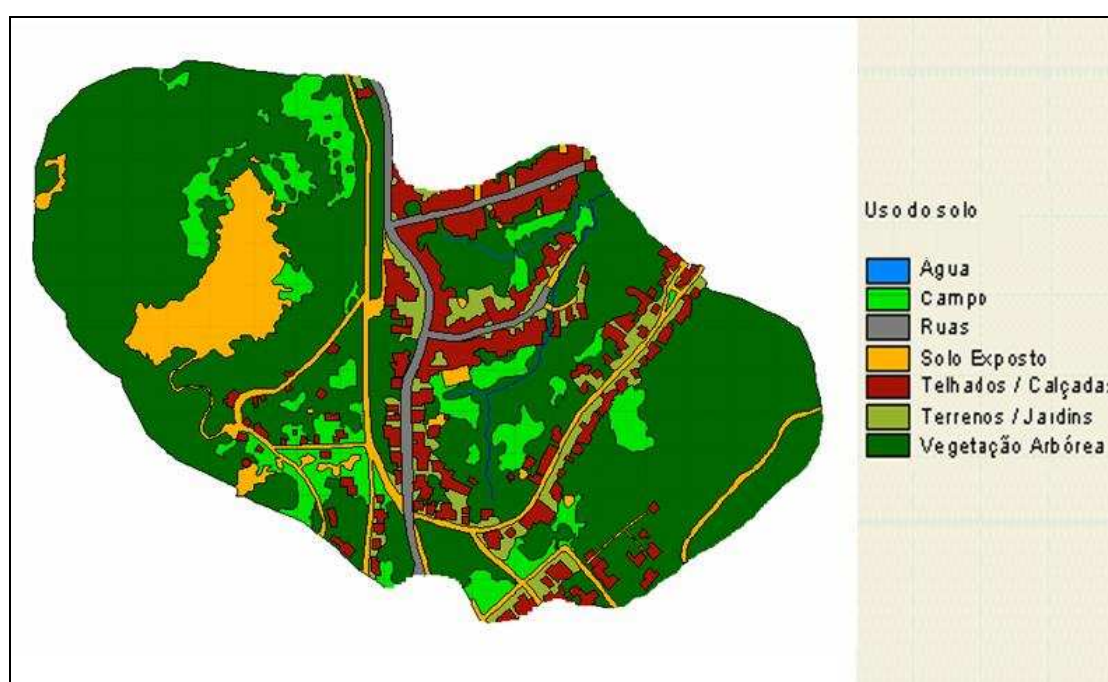


Figura 27 - Uso do solo na bacia STP

Tabela 10 – Resultado da classificação de uso e ocupação do solo

Uso do Solo	Sitio do Tio Pedro	
	Área (ha)	(%)
Espelho de Água (Perm.)	0,00	0,00
Campos (Perm.)	4,09	10,43
Ruas (Imperm.)	1,04	2,65
Solo Exposto (Perm.)	4,27	10,89
Telhados/Calçadas (Imperm.)	4,09	10,44
Terrenos/Jardins (Perm.)	1,86	4,75
Vegetação Arbórea (Perm.)	23,87	60,84
Permeável	34,09	86,91
Impermeável	5,13	13,09

3.2.6 Dados fluviográficos

A estação Sitio do Tio Pedro (STP) esta instalada no exutório da bacia. Inicialmente foi operada no período de 01/06/2000 e 30/11/2001, durante o trabalho de Bellinaso (2002), e foi reativada novamente no período de março de 2003 a dezembro de 2003, durante os trabalhos de Belló (2004). A figura 26 mostra as vazões mínimas e médias mensais na estação STP no período de maio de 2003 a dezembro de 2003, e a figura 28 mostra as vazões máximas mensais na estação, neste mesmo período, do qual os dados utilizados na calibração do modelo foram retirados.

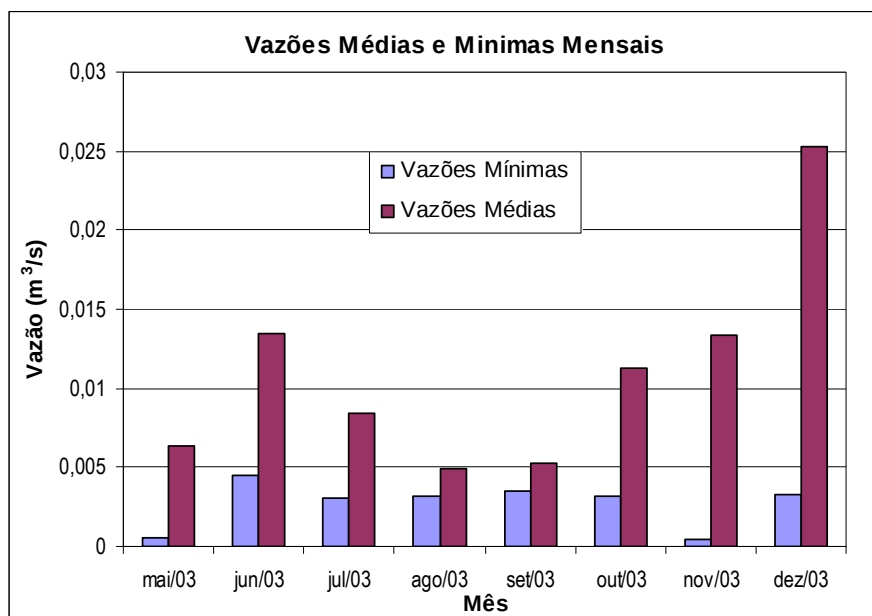


Figura 28 - Vazões mínimas instantâneas e médias mensais na estação STP I no período de maio de 2003 a dezembro de 2003

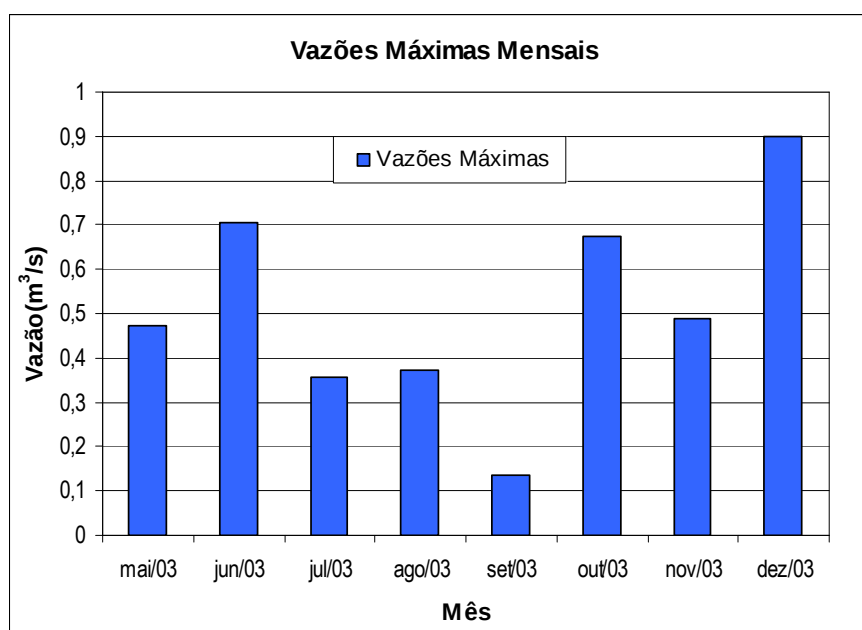


Figura 29 - Vazões máximas instantâneas na estação STP I no período de maio de 2003 a dezembro de 2003

3.2.7 Curva-chave utilizada

A curva-chave da estação STPI foi construída por Bellinaso (2002), a partir de 9 medições de vazões para a calha e de 12 medidas para o vertedor. As medições foram fundamentais para avaliação correta das simulações de cheias. O ajuste da curva-chave foi dividido em duas faixas, de 0 a 26 cm e acima de 26 cm, conforme pode ser visto a seguir.

$$\text{Se } h(\text{cm}) > 26 \rightarrow Q(\text{m}^3/\text{s}) = (0,003 h^{3,1851})/1000 \quad (14)$$

$$\text{Se } h(\text{cm}) < 26 \rightarrow Q(\text{m}^3/\text{s}) = (0,387 h^{1,6772})/1000 \quad (15)$$

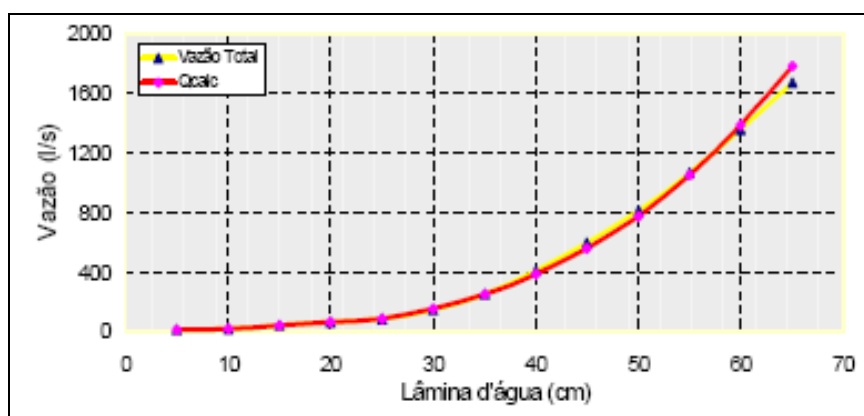


Figura 30 - Curva-chave da estação STP (Fonte: Bellinaso, 2002)

3.2.8 Dados pluviográficos

Os dados de precipitação utilizados na pesquisa são provenientes da estação pluviográfica Sítio do Tio Pedro, e ao todo foram selecionados 8 eventos entre os meses de maio e dezembro de 2003, utilizados na calibração do modelo. O resultado do monitoramento no período selecionado é apresentado na figura 31.

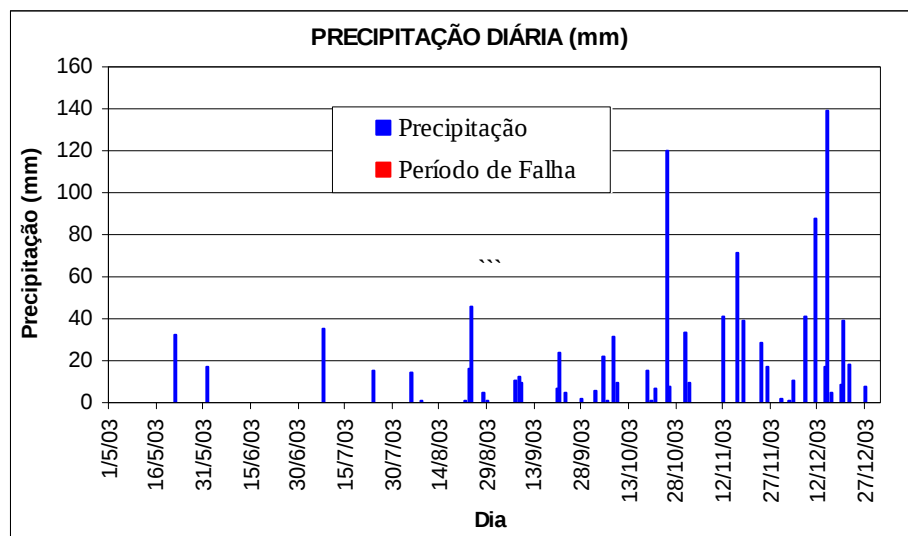


Figura 31 - Valores da precipitação diária na estação pluviográfica Sítio do Tio Pedro no período selecionado

3.2.9 Discretização da bacia

A discretização da bacia hidrográfica levou em conta a homogeneidade das sub-bacias, a situação do sistema de drenagem e a estabilidade numérica do modelo SWMM.

Desta forma, para a bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro foi adotado um nível de discretização, com a mesma discretizada em 11 sub-bacias com base no uso do solo e nas condições locais, em especial a distribuição da rede de drenagem.

A figura 32 mostra a bacia Sítio do Tio Pedro com a discretização detalhada em 11 sub-bacias.

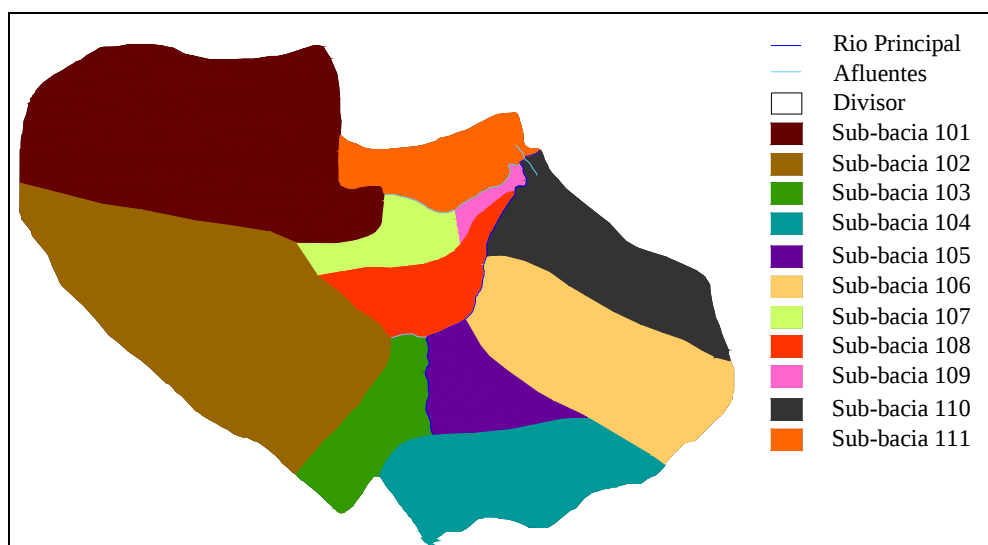


Figura 32 - Discretização da bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro em 11 sub-bacias

As características físicas para as sub-bacias, obtidas do monitoramento da bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro, são apresentadas na tabela 11 para as bacias com discretização detalhada em 11 sub-bacias. Nesta tabela também são apresentados os valores de porcentagem de áreas impermeáveis e a largura obtida para cada sub-bacia.

Na definição da largura das sub-bacias (w), foi adotado o valor da largura do retângulo equivalente (le), conforme explicado no item 3.1.9.

Tabela 11 - Características das sub-bacias na discretização detalhada para a bacia Sítio do Tio Pedro

Discretização	Sub-bacia	Largura da sub-bacia (m)	Área (ha)	% Área Impermeável	Declividade (m/m)
Discretização detalhada (11 sub-bacias)	101	198,78	9,22	5,32	0,291
	102	207,60	9,51	7,50	0,277
	103	73,24	1,87	22,54	0,157
	104	115,54	3,79	11,16	0,265
	105	71,15	1,66	9,45	0,299
	106	156,64	4,92	6,20	0,385
	107	52,00	1,15	21,43	0,208
	108	59,52	1,80	51,84	0,143
	109	17,83	0,25	14,73	0,100
	110	83,55	3,20	7,88	0,345
	111	65,20	1,86	62,06	0,185

3.2.10 Discretização do Arroio

A discretização do arroio e seus afluentes foi realizada a partir de um estudo de campo e um levantamento topográfico.

O levantamento topográfico foi feito com auxílio de uma estação total, e consistiu do levantamento do perfil do leito do rio e de diversas seções transversais que foram levantadas em lugares previamente definidos procurando-se obter seções representativas para os trechos do arroio.

A representação final do sistema de drenagem para a discretização adotada consiste em 11 trechos, sendo estes classificados em 10 canais irregulares e 1 trecho com condutos circulares.

A figura 33 mostra o desenho esquemático das concepções dos canais e sub-bacias para a simulação detalhada (11 sub-bacias).

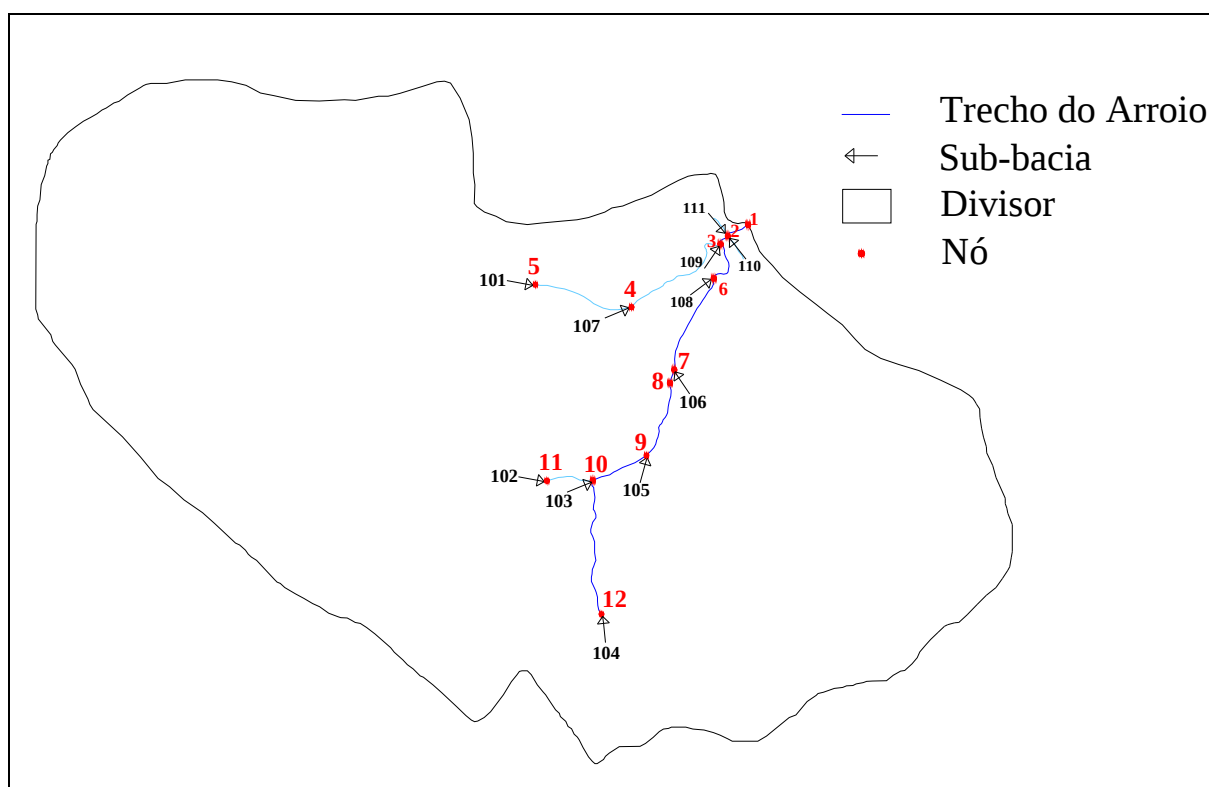


Figura 33 – Concepção dos canais e sub-bacias para a simulação detalhada

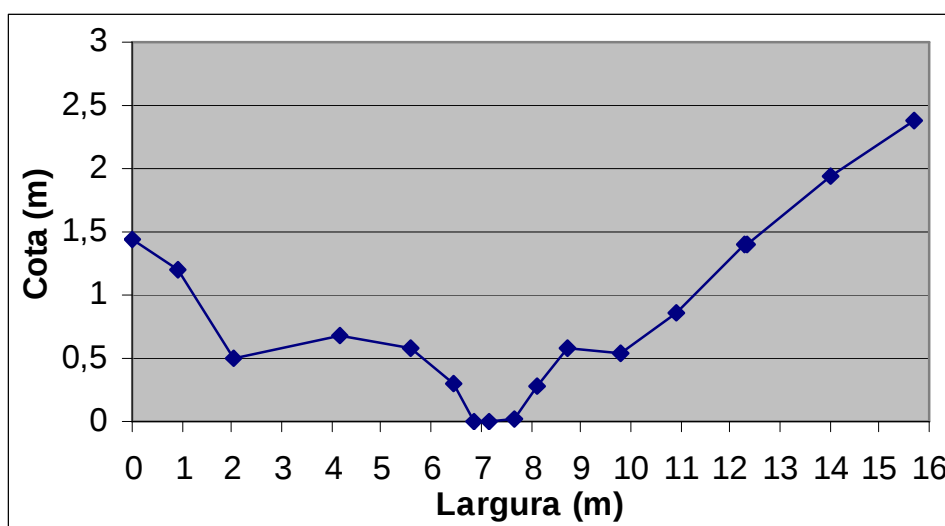
Na tabela 12 são apresentadas as características do canal para a discretização detalhada. No anexo F são apresentadas as coordenadas das seções irregulares e retangulares adotadas para cada trecho do canal e as dimensões das canalizações.

Tabela 12 – Características do canal para a discretização detalhada

Conduto	Nó 1	Nó 2	Comprimento (m)	Seção Transversal	Declividade (m/m)
10	12	10	135,47	Canal Irregular	0,133
20	11	10	49,03	Canal Irregular	0,061
30	10	9	57,50	Canal Irregular	0,104
40	9	8	78,55	Canal Irregular	0,121
50	8	7	11,80	Canal circular	0,042
60	7	6	98,40	Canal Irregular	0,061
70	6	3	48,08	Canal Irregular	0,042
80	5	4	98,35	Canal Irregular	0,153
90	4	3	118,95	Canal Irregular	0,118
100	3	2	9,64	Canal Irregular	0,104
110	2	1	24,40	Canal Irregular	0,082

3.2.11 Seções transversais

No levantamento topográfico, com o auxílio de uma estação total, foram obtidas 4 seções transversais, as quais foram consideradas as mais representativas para cada trecho do canal simulado. As figuras 34, 35, 36 e 37 apresentam estas seções características.

**Figura 34 – Seção transversal característica dos trechos 100 e 110**

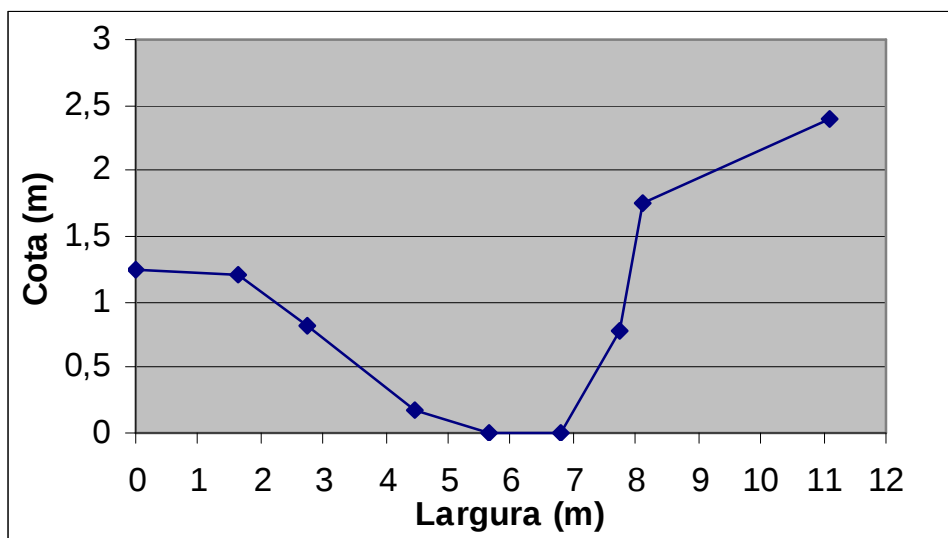


Figura 35 – Seção transversal característica dos trechos 60 e 70

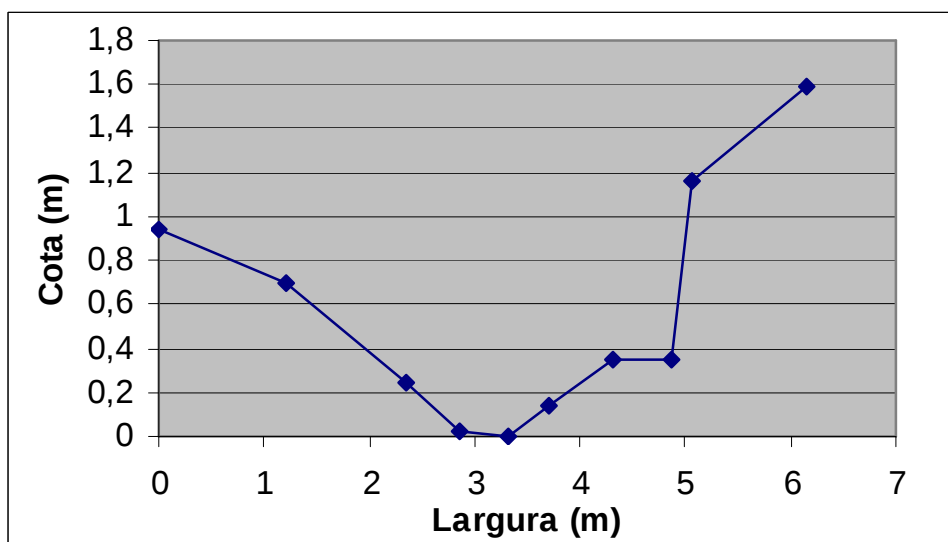


Figura 36 – Seção transversal característica dos trechos 80 e 90

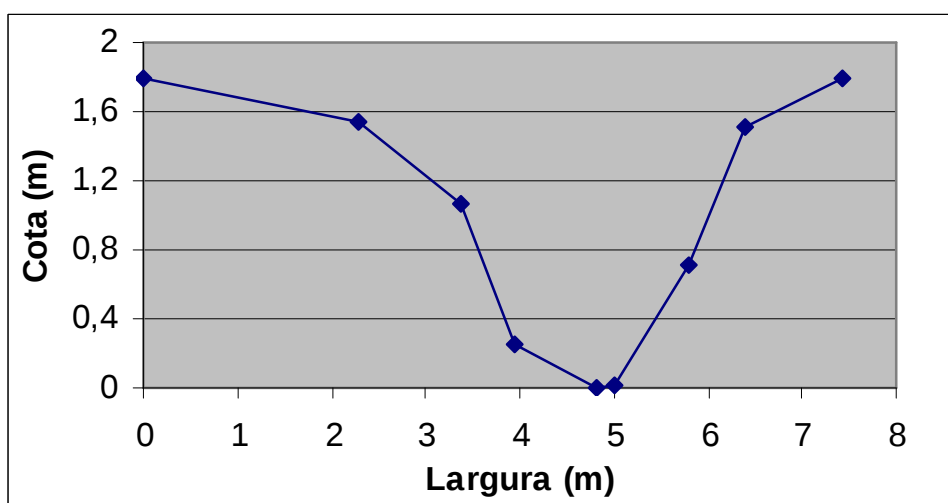


Figura 37 – Seção transversal característica dos trechos 10, 20, 30 e 40

4 APLICAÇÃO DO MODELO SWMM

Neste capítulo são explicadas as metodologias utilizadas pelo modelo para fazer a simulação do sistema de drenagem, bem como as técnicas utilizadas para fazer a representação destes sistemas no modelo.

Os resultados da aplicação do modelo na avaliação do sistema de drenagem das bacias em estudo são apresentados no capítulo 5.

Para aplicação do modelo nas bacias estudadas foram utilizados os módulos Runoff e Extran. O primeiro simula o escoamento superficial, na bacia concentrada ou então em cada sub bacia, e o segundo propaga esse escoamento ao longo da rede de drenagem.

Na simulação cada um dos módulos utiliza diversos parâmetros com a finalidade de representar da forma mais real possível as condições existentes no campo. O que cada um desses parâmetros representa é explicado nos itens a seguir.

Os graus de discretização utilizados para as simulações foram detalhados nos itens 3.1.9 e 3.2.9.

Os eventos simulados foram escolhidos do banco de dados do GHIDROS, e foram obtidos do monitoramento realizado em cada uma das bacias em períodos em que as estações estavam em operação, conforme foi explicado anteriormente.

Para facilitar a compreensão da variação dos parâmetros em cada bacia para cada evento, optou-se por classificar os eventos de acordo com a sua intensidade, em função da vazão resultante do escoamento superficial.

4.1 Análise de sensibilidade

Para que seja possível se perceber de forma mais clara a influência de cada parâmetro do modelo no resultado da simulação, é feita a análise de sensibilidade daqueles parâmetros considerados mais importantes.

Para a análise de sensibilidade foram escolhidas duas variáveis dependentes para que se analisasse seu comportamento, que são a vazão de pico e o volume escoado.

Para esta análise foi selecionado um evento de cada bacia, sendo que para a bacia Alto da Colina II o evento selecionado foi o do dia 30/09/2001, com uma precipitação acumulada de 92,70 mm e para a bacia Sitio do Tio Pedro o evento selecionado foi o do dia 22/05/2003, com uma precipitação acumulada de 32,07 mm.

Estes eventos de chuva foram escolhidos por terem tido um bom ajuste na calibração de seus parâmetros.

Na bacia hidrográfica Alto da Colina II, esta análise foi feita para a bacia discretizada em 6 sub-bacias e 7 trechos de arroio, e na bacia hidrográfica Sitio do Tio Pedro, esta análise foi feita para a bacia discretizada em 11 sub-bacias e 11 trechos de arroio.

Sabe-se que existe uma interdependência entre os parâmetros de calibração, mas para facilitar a análise da influência de cada parâmetro no resultado final, optou-se por variar um parâmetro por vez, deixando os demais fixos, atribuindo-se a mesma variação do parâmetro, em análise, em todas as subbacias ou trechos de rio.

Para cada evento, foram utilizados como valor base de cada parâmetro, os valores obtidos no ajuste do modelo aos dados observados em campo.

Os parâmetros analisados referentes ao módulo Runoff foram: largura das sub-bacias (W), porcentagem de áreas impermeáveis (AI), coeficiente de rugosidade de Manning nas sub-bacias (n), altura de armazenamento (d) e capacidade de infiltração (I).

Para o módulo Extran foram analisados os parâmetros que representam o coeficiente de rugosidade de Manning no canal.

4.2 Calibração do modelo SWMM

A metodologia de calibração baseou-se no ajuste dos parâmetros através de um processo manual, por tentativa e erro, sem a utilização de algoritmos de otimização, o que favorece ao usuário um melhor entendimento do comportamento dos processos que envolvem a calibração, porém com a desvantagem de que devido ao grande numero de parâmetros a serem calibrados, a otimização alcançada pode não ser feita com o melhor conjunto de parâmetros. Os parâmetros que não dependem dos valores obtidos na caracterização da bacia têm seu valor inicial adotado segundo a bibliografia.

Segundo Figueiredo et al. (1999 apud Garcia, 2005), o critério de calibração por tentativa e erro apresenta a vantagem do acompanhamento pelo hidrólogo de cada passo da calibração, enquanto uma calibração automática apresenta a vantagem do ganho de tempo e eliminação da subjetividade no processo.

A calibração dos eventos no modelo foi feito de maneira individual, ou seja, para cada evento obteve-se um conjunto de parâmetros, representativos das características da bacia e do canal em questão. Esses parâmetros obtidos foram os que mais se ajustaram ao evento, de forma a deixar a simulação o mais representativa possível das medições realizadas em campo.

Como os eventos foram classificados em grupos de acordo com o volume total escoado, a validação das calibrações foi feita da seguinte maneira. Foi feita a simulação de cada evento de um determinado grupo, usando para cada parâmetro o valor médio encontrado para o referente grupo.

4.2.1 Calibração do módulo Runoff

O módulo Runoff considera a bacia ou sub-bacia como um todo, desconsiderando a rede de drenagem da mesma, e é o responsável pela transformação chuva-vazão e a propagação do escoamento nas mesmas.

No módulo Runoff são utilizados 12 parâmetros, dos quais 4 são determinados diretamente pela caracterização física da bacia, conforme já foi apresentado, sendo eles: área (A), declividade (D), largura de escoamento da sub-bacia (W) e porcentagem de áreas impermeáveis (AI).

Os demais parâmetros são calibrados manualmente, por tentativa e erro, sendo que seus valores iniciais foram retirados da literatura, sendo eles: coeficiente de rugosidade de Manning das áreas permeáveis (n_p) e impermeáveis (n_i), altura de armazenamento das áreas permeáveis (d_p) e impermeáveis (d_i), e os parâmetros de infiltração de Horton onde: I_0 é a taxa de infiltração inicial máxima (mm/h), I_b é a taxa de infiltração mínima (mm/h) e k é a constante de decaimento (s^{-1}).

Também foi testada a calibração, utilizando a Equação de Infiltração de Green-Ampt no lugar da Equação de Infiltração de Horton, onde os parâmetros calibrados são: Ψ que é sucção capilar média (mm), k_s que é condutividade hidráulica de saturação do solo (mm/h) e θ_i que é o déficit inicial de umidade (fração). Os

resultados obtidos, mostraram que a equação de Horton se adaptou melhor sendo a escolhida.

Para a bacia hidrográfica Alto da Colina II, os eventos escolhido para testar as equações de infiltração foram os dos dias 31/01/2002 e 11/03/2002, e na bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro, os eventos escolhidos foram os dos dias 27/07/2003 e 08/12/2003.

Também foram realizadas algumas simulações considerando o escoamento subterrâneo, para analisar a sua influência no resultado final da simulação, adotando para os parâmetros os valores recomendados pelos autores.

Os valores adotados para realizar as simulações onde se testou a influência do escoamento subterrâneo foram: porosidade 0,40; capacidade de campo 0,28; ponto de murcha 0,17; teor de umidade inicial 30%; condutividade hidráulica do solo saturado 4 mm/h. A profundidade do lençol freático adotada foi de 6 m, para as regiões altas da bacia e 0,5 m para as áreas próximas ao arroio.

Chegou-se a conclusão que a inclusão do escoamento subterrâneo não apresentou mudanças significativas nos hidrogramas de saída apresentados pelo modelo, para os eventos analisados, uma vez que os coeficientes de correlação e os erros médios na vazão de pico e volume total escoado permaneceram praticamente constantes. Isto pode acontecer pelo fato dos eventos serem rápidos, onde é muito provável que o escoamento subterrâneo não deve acontecer fisicamente.

Devido à falta de informações mais confiáveis em relação a estes parâmetros, optou-se por não considerar o escoamento subterrâneo na simulação, uma vez que o modelo permite que isso seja feito.

4.2.2 Calibração do módulo Extran

No módulo Extran, que é responsável pela propagação do escoamento ao longo da rede de drenagem, foram calibrados três parâmetros, sendo que nenhum é obtido da caracterização física da bacia, e sim calibrado manualmente com seus valores iniciais obtidos da literatura, e os três são relativos à rugosidade do canal, sendo eles: coeficiente de rugosidade de Manning no leito do canal (nc), coeficiente de rugosidade de Manning na margem direita do canal (nr), coeficiente de rugosidade de Manning na margem esquerda do canal (nl).

Os parâmetros de rugosidade para calibração do modo Extran tiveram seus valores iniciais baseados na literatura, principalmente em Chow (1959) e Garcia (2005), sendo feitas pequenas modificações na tentativa de melhorar o ajuste entre os hidrogramas observados e calculados no exutório na bacia.

4.3 Estabilidade do modelo

Segundo Garcia (2005) as integrações numéricas para resolução das equações no módulo Extran são resolvidas pelo método de Euler modificado. Segundo James et al. (2003) o resultado desse método tem provado ser relativamente exato e estável, quando algumas restrições são observadas; os equacionamentos utilizados no modelo podem ser vistos no anexo B.

- Restrições no passo de tempo

O método de Euler modificado produz uma solução explícita na qual a equação do movimento é aplicada em cada “Link” e a equação da continuidade para cada “Nó”, com uma ligação implícita durante o passo de tempo.

Os métodos explícitos envolvem regularmente aritmética simples e requerem pouco espaço de armazenamento se comparados com métodos implícitos. Entretanto, existem geralmente perdas de estabilidade e muitas vezes requerem passos de tempo muito curtos.

O módulo Extran apresenta uma boa estabilidade numérica quando as seguintes desigualdades são satisfeitas:

- Link:

$$\Delta t \leq \frac{L}{(gh)^{1/2}} \quad (16)$$

onde: Q = descarga (m³/s); t = passo de tempo (s); L = comprimento do canal (m); g = aceleração gravitacional (9,8 m/s²); h = profundidade máxima do canal (m).

A equação 17 é conhecida como forma da condição de Courant, na qual o passo de tempo é limitado para um tempo requerido pela onda dinâmica para propagar o comprimento de um conduto.

- Nós:

$$\Delta t \leq \frac{C_s A_s H_{\max}}{Q} \quad (17)$$

onde: C' = constante adimensional, aproximadamente igual a 0,1; $H_{\text{máx}}$ = nível máximo da superfície d'água no passo de tempo; A_s = área da superfície correspondente ao nó; Q = vazão na entrada do nó.

Examinando as desigualdades das equações 16 e 17 revela-se que o passo de tempo máximo admissível (Δt) é determinado pelos condutos curtos que tenham grandes vazões de entrada. Se a estabilidade numérica não for atingida, é necessário que o usuário elimine ou agregue condutos e canais menores.

- Condutos equivalentes

Um conduto equivalente é a substituição computacional de um elemento atual do sistema de drenagem, por um conduto imaginário que é hidraulicamente equivalente.

Usualmente, um conduto equivalente é usado quando se suspeita que a instabilidade numérica seja causada pelo elemento do sistema de drenagem.

Os condutos curtos são freqüentemente causadores de problemas de instabilidade, sendo necessária sua substituição por condutos equivalentes. Os orifícios não apresentam este problema, pois são automaticamente convertidos para condutos equivalentes pelo programa.

4.4 Representação do sistema de drenagem no modelo SWMM

O sistema de drenagem é representado pelos nós, pelos vínculos existentes entre eles e pelas estruturas especiais, como orifícios e vertedores.

Os nós são os primeiros elementos a serem inseridos, e representam a ligação entre os vínculos e ou as estruturas especiais. Os nós necessitam de informações como:

- posicionamento em coordenadas (x, y);
- cotas do terreno; e
- cotas de fundo.

Os vínculos representam os canais abertos ou fechados, sendo necessário adicionar as seguintes informações:

- diâmetro dos tubos;
- dimensões dos canais prismáticos;

- para as seções irregulares os valores da altura e comprimento de cada ponto da seção;
- os nós aos quais estão conectados;
- coeficiente de rugosidade de Manning, para os canais irregulares adotou-se valores diferentes entre o leito e as margens;
- comprimento do canal ou conduto;
- cotas de montante e jusante.

As sub-bacias, que representam as áreas homogêneas de contribuição, são inseridas aos nós. Neste ponto se dá a interface entre o módulo Extran e o módulo Runoff. Para as sub-bacias necessita-se informar a área de contribuição, a declividade, a porcentagem de área impermeável, a altura de armazenamento, o coeficiente de rugosidade de Manning e os parâmetros de infiltração I_0 , I_b e k , da equação de Horton, escolhida neste estudo para representar esse processo.

4.5 Classificação dos Eventos

Para facilitar o entendimento da relação que os parâmetros envolvidos na calibração têm com o volume escoado e com o total precipitado, e a influência dessas características no resultado da calibração, optou-se por classificar os eventos nas bacias hidrográficas Alto da Colina II e Sítio do Tio Pedro de acordo com as condições de escoamento. Esta classificação foi feita em duas classes, sendo o primeiro critério adotado na classificação o volume total escoado, uma vez que essa característica do evento expressa também as condições antecedentes de umidade no solo, o que não acontece com o total precipitado, ficando os eventos classificados em:

- A - eventos de alto volume escoado; e
- B - eventos de baixo volume escoado.

As tabelas 13 e 14 mostram as principais características dos eventos selecionados para calibração nas estações Alto da Colina II e Sítio do Tio Pedro respectivamente, e sua classificação.

Tabela 13 – Características dos eventos selecionados da estação pluviográfica Vila Maria para as simulações na bacia Alto da Colina II

Evento	Condição do Escoamento	Volume Total Escoado (mm)	Total Precipitado (mm)	Precipitação Total Máxima (5 min)	Q _{pico} Observada (m ³ /s)
5/6/2001	A	26,20	54,84	7,34	1,48
19/7/2001	A	40,12	67,63	7,87	6,08
13/9/2001	A	13,00	31,00	2,33	1,16
30/9/2001	A	58,32	92,70	5,46	2,98
15/10/2001	A	9,53	37,07	2,75	1,16
13/11/2001	A	14,74	40,59	4,63	1,74
31/1/2002	B	5,28	58,65	6,74	0,61
20/2/2002	B	4,10	45,78	8,88	1,03
11/3/2002	B	5,35	32,22	6,74	0,90
25/3/2002	B	3,54	31,14	14,14	0,66

Tabela 14 – Características dos eventos selecionados da estação pluviográfica Sitio do Tio Pedro para as simulações na bacia Sitio do Tio Pedro

Evento	Condição do Escoamento	Volume Total Escoado (mm)	Total Precipitado (mm)	Precipitação Total Máxima(5 min)	Q pico Observada (m ³ /s)
8/7/2003	A	7,03	34,94	2,78	0,210
16/11/2003	A	19,69	71,76	2,96	0,408
8/12/2003	A	6,90	41,38	4,00	0,441
15/12/2003	A	92,21	137,79	4,65	2,041
22/5/2003	B	4,41	32,07	4,63	0,644
1/6/2003	B	1,94	16,72	2,33	0,075
24/7/2003	B	2,74	15,17	1,12	0,110
12/11/2003	B	5,23	40,94	2,85	0,374

Já na bacia hidrográfica Alto da Colina I, devido a impossibilidade de simular a bacia com a discretização desejada, e também os eventos de maior intensidade devido aos problemas de instabilidade apresentados pelo modelo, a simulação foi feita apenas para quatro eventos, e optou-se por não classificá-los em dois tipos de escoamento, mas simplesmente em juntá-los em um só grupo.

A tabela 15 mostra as principais características dos eventos selecionados para calibração na estação Alto da Colina I.

Tabela 15 – Características dos eventos selecionados da estação pluviográfica Vila Maria para as simulações na bacia Alto da Colina I

Evento	Volume Total Escoado (mm)	Total Precipitado (mm)	Precipitação Total Maxima(5 min)	Q pico Observada (m ³ /s)
5/6/2001	23,92	54,84	7,34	2,15
13/11/2001	14,70	40,59	4,63	2,15
20/2/2002	5,53	45,78	8,88	2,44
11/3/2002	4,36	32,22	6,74	0,99

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO DA APLICAÇÃO DO MODELO

5.1 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade realizada para os principais parâmetros dos módulos Runoff e Extran, apresentada a seguir, buscou avaliar a influência dos principais parâmetros na vazão de pico e no volume escoado para o aplicativo SWMM. O principal objetivo desta análise foi verificar a influência dos parâmetros para as bacias estudadas, por isso foram selecionados dois eventos, sendo um da bacia hidrográfica Alto da Colina II e um da bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro.

Na bacia hidrográfica Alto da Colina I, essa análise de sensibilidade não foi feita devido à pequena quantidade de eventos simulados e também pelo fato das simulações não terem sido feitas com a discretização apresentada pelo sistema de drenagem.

5.1.1 Sensibilidade dos parâmetros do módulo Runoff

Para a bacia Alto da Colina II os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade, quando a vazão de pico é a variável dependente estudada, foram a largura do escoamento das sub-bacias (W), coeficiente de rugosidade de Manning para as sub-bacias (n_b) e os parâmetros de Infiltração (I). A porcentagem de área impermeável (AI) e a altura do armazenamento (d) não apresentaram grande influência sobre a vazão de pico. A figura 38 mostra a influência dos parâmetros analisados do módulo Runoff tendo a vazão de pico como variável dependente na bacia Alto da Colina II.

Para a bacia Sítio do Tio Pedro todos os parâmetros apresentaram grande sensibilidade quando a vazão de pico foi a variável dependente estudada, principalmente para os menores valores. Já para os maiores valores dos parâmetros, quem apresentou maior sensibilidade foi porcentagem de área impermeável (AI). A figura 39 mostra a influência dos parâmetros analisados do módulo Runoff tendo a vazão de pico como variável dependente na bacia Sítio do Tio Pedro.

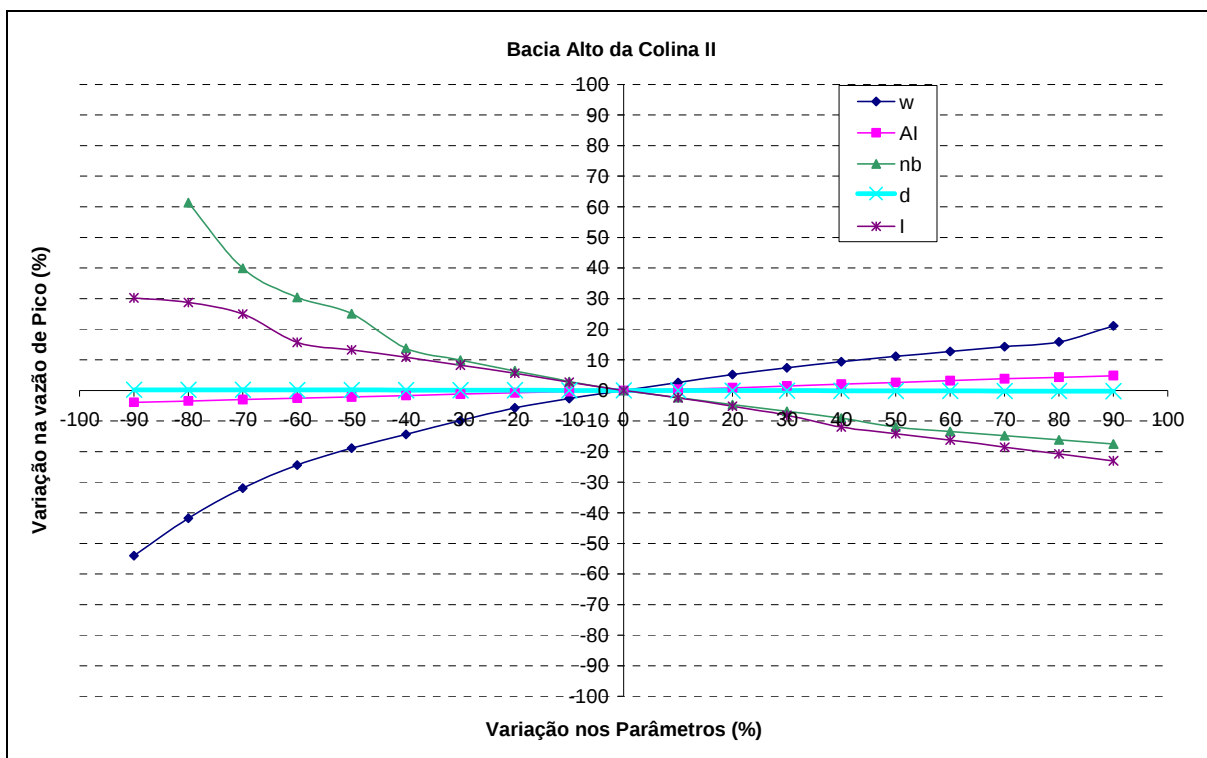


Figura 38 – Influência dos parâmetros do módulo Runoff na vazão de pico - ACII

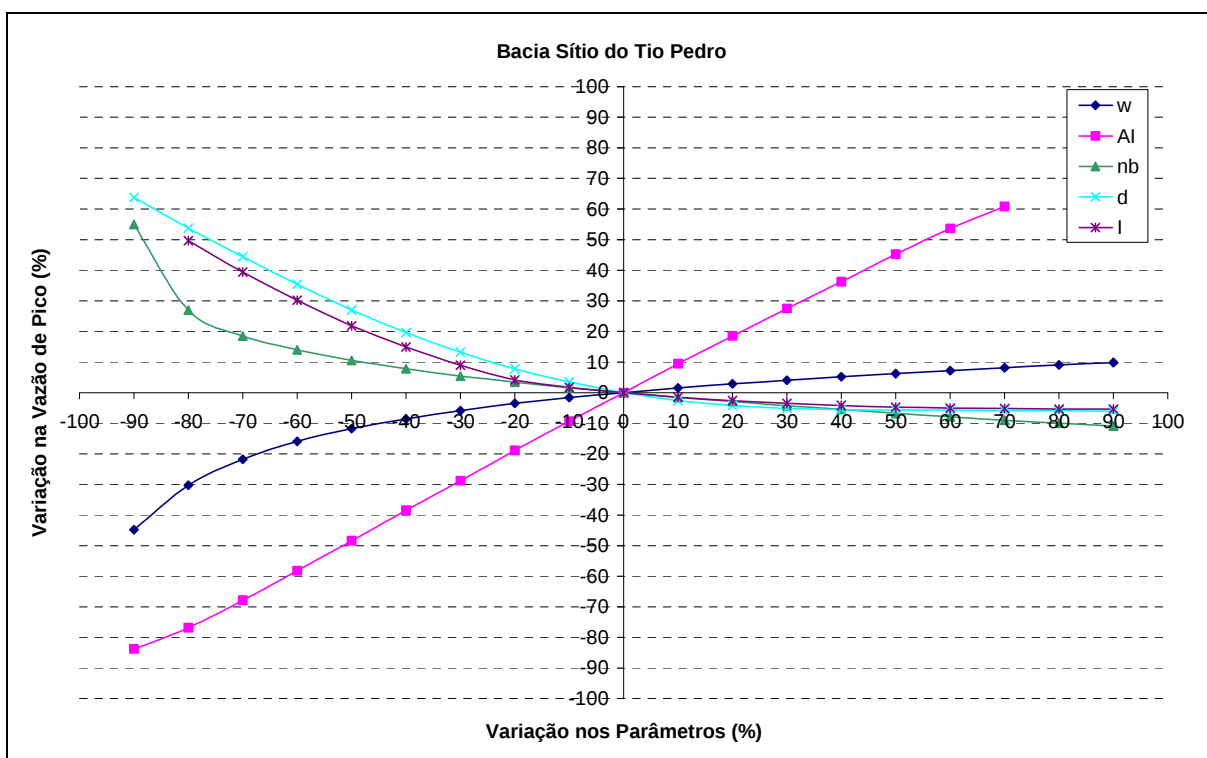


Figura 39 – Influência dos parâmetros do módulo Runoff na vazão de pico - STP

Se comparados aos estudos feitos por Garcia (2005) na bacia do Cancela, os parâmetros do módulo runoff analisados nas bacias em estudo tiveram comportamento bastante semelhante aos obtidos por Garcia quando a vazão de pico foi considerada a variável dependente. Porém na bacia Alto da Colina II, a porcentagem de áreas impermeáveis (AI) apresentou comportamento diferente ao apresentado nas bacias Sítio do Tio Pedro e na bacia estudada por Garcia. Na bacia Alto da Colina II o parâmetro AI quase não apresentou sensibilidade em relação à vazão de pico, o que pode ser explicado pelo fato da bacia Alto da Colina II ser uma bacia rural, com pequenas taxas de áreas impermeáveis, portanto sem muita influência deste parâmetro, diferente das bacias Sítio do Tio Pedro e Cancela, que apresentam áreas urbanizadas, portanto com taxas mais elevadas de impermeabilização.

Já na bacia Sítio do Tio Pedro, o parâmetro que apresentou comportamento diferente do encontrado nas bacias Alto da Colina II e Cancela, foi a altura de armazenamento (d), que na bacia Sítio do Tio Pedro apresentou maior sensibilidade em relação à vazão de pico do que o encontrado nas outras bacias. Isso pode ter ocorrido pelo fato de que a bacia Sítio do Tio Pedro tem uma característica física diferente das outras duas, que é a sua inclinação elevada, em torno de 30%, enquanto que nas outras duas essa inclinação média é bem parecida, em torno de 5%, o que torna esse parâmetro mais sensível na bacia Sítio do Tio Pedro.

Ao analisar a sensibilidade dos parâmetros na bacia Alto da Colina II, sendo o volume escoado a variável dependente, os parâmetros mais sensíveis tornam-se a infiltração (I) e a largura do escoamento das sub-bacias (w). Os demais parâmetros: porcentagem de área impermeável (AI), rugosidade de Manning para as sub-bacias (nb) e altura do armazenamento (d) não apresentaram influência significativa, pois não apresentam grande influência no balanço do volume escoado. A figura 40 mostra a influência dos parâmetros analisados no módulo Runoff para o volume escoado como variável dependente na bacia Alto da Colina II.

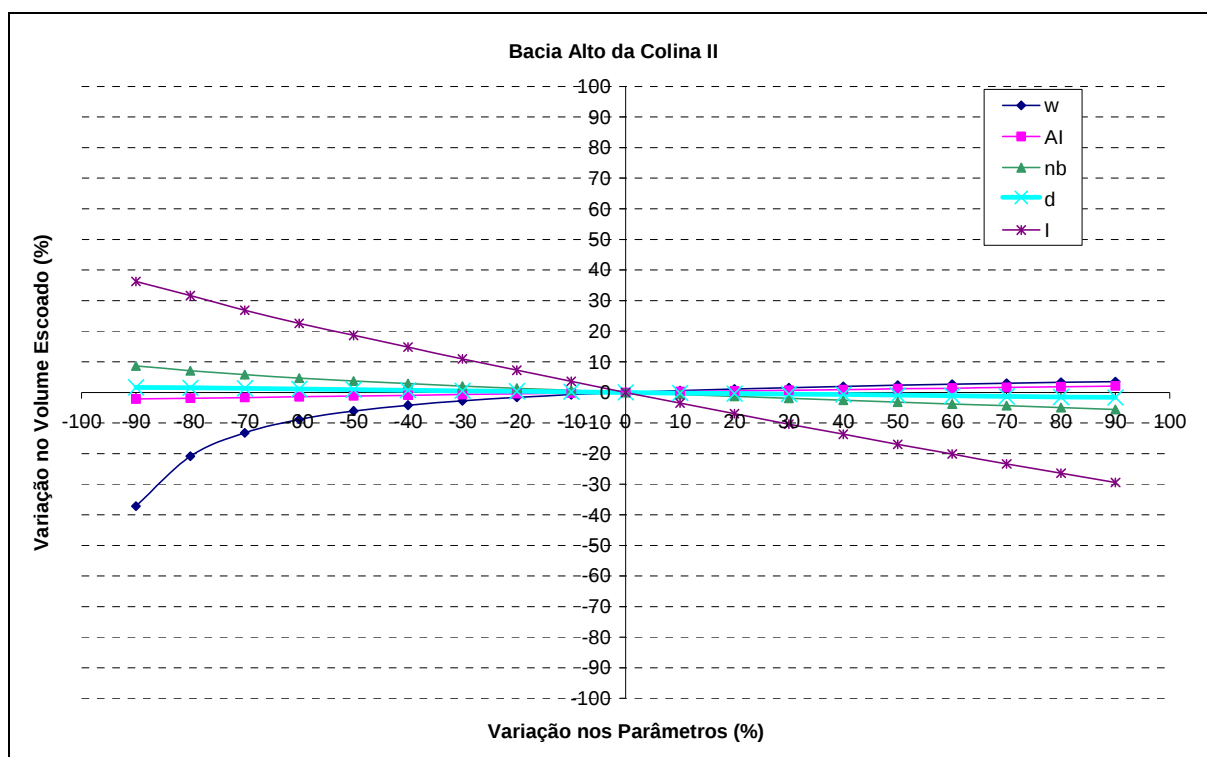


Figura 40 – Influência dos parâmetros do módulo Runoff no volume escoado – ACII

Já na bacia Sítio do Tio Pedro, ao analisar a sensibilidade dos parâmetros sendo o volume escoado a variável dependente, os parâmetros mais sensíveis foram à infiltração (I), a porcentagem de área impermeável (AI) e altura do armazenamento (d), principalmente para valores menores dos parâmetros, sendo que para valores maiores, somente a porcentagem de área impermeável (AI) apresentou variações maiores. Os demais parâmetros, rugosidade de Manning (nb) e a largura do escoamento das sub-bacias (w) não apresentaram influência significativa, pois não apresentam grande influência no balanço do volume escoado. A figura 41 mostra a influência dos parâmetros analisados no módulo Runoff para o volume escoado como variável dependente na bacia Alto da Colina II.

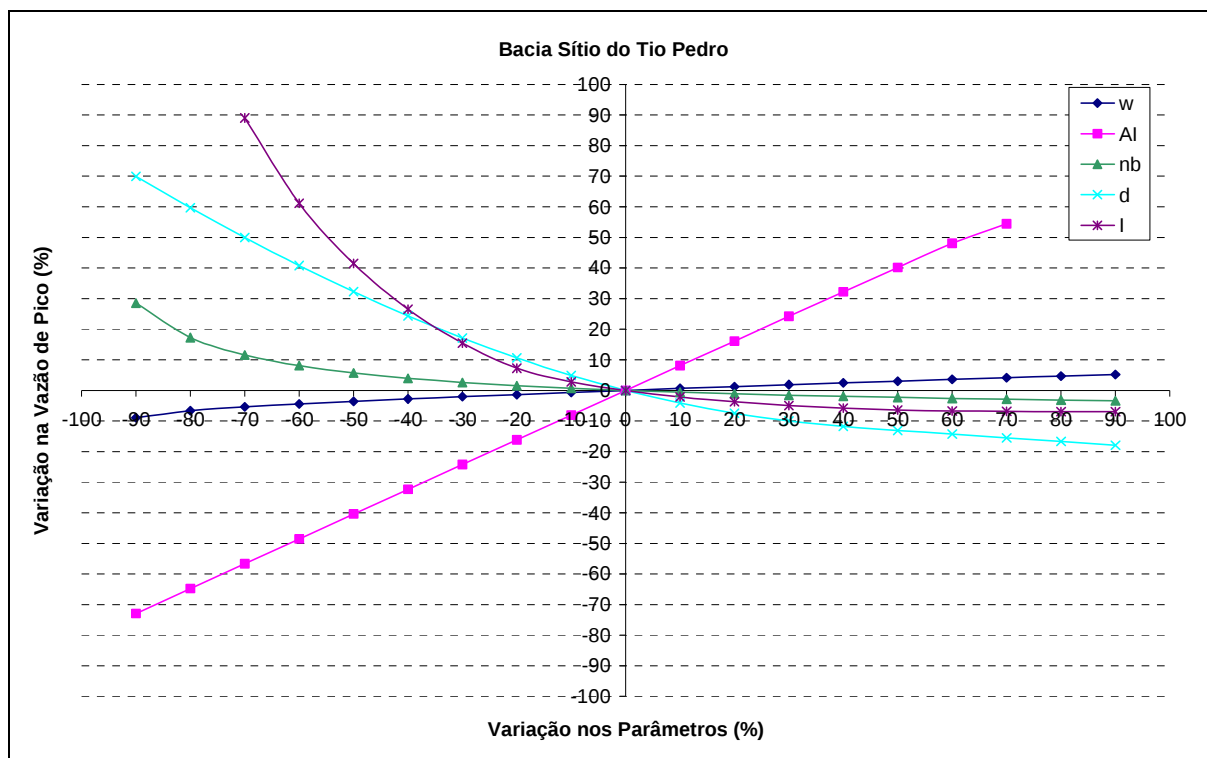


Figura 41 – Influência dos parâmetros do módulo Runoff no volume escoado – STP

Comparando os resultados encontrados para as bacias Alto da Colina II, Sítio do Tio Pedro e os encontrados por Garcia (2005) para a bacia do Cancela, tendo o Volume escoado como variável dependente, percebe-se um comportamento semelhante ao encontrado quando a vazão de pico era a variável dependente. Na bacia Alto da Colina II, a porcentagem de áreas impermeáveis apresentou sensibilidade muito baixa, o que não ocorreu nas outras duas bacias, e o armazenamento em depressão, que na bacia Alto da Colina II quase não apresentou sensibilidade, também foi pouco sensível na bacia do Cancela, e apresentou diferença mais significativa na bacia Sítio do Tio Pedro, da mesma forma de quando a vazão de pico era a variável dependente. Um parâmetro que também se mostrou pouco sensível na bacia Alto da Colina II, foi a rugosidade para as sub-bacias, mas que nas outras bacias também teve comportamento parecido, com uma sensibilidade um pouco maior.

A largura da sub-bacia (W) apresentou uma sensibilidade maior na bacia ACII, tanto para a vazão de pico como para o volume escoado, apresentando maior sensibilidade para os valores menores de W nas duas bacias. As figuras 42 e 43 mostram o comportamento das variáveis dependentes com o parâmetro analisado.

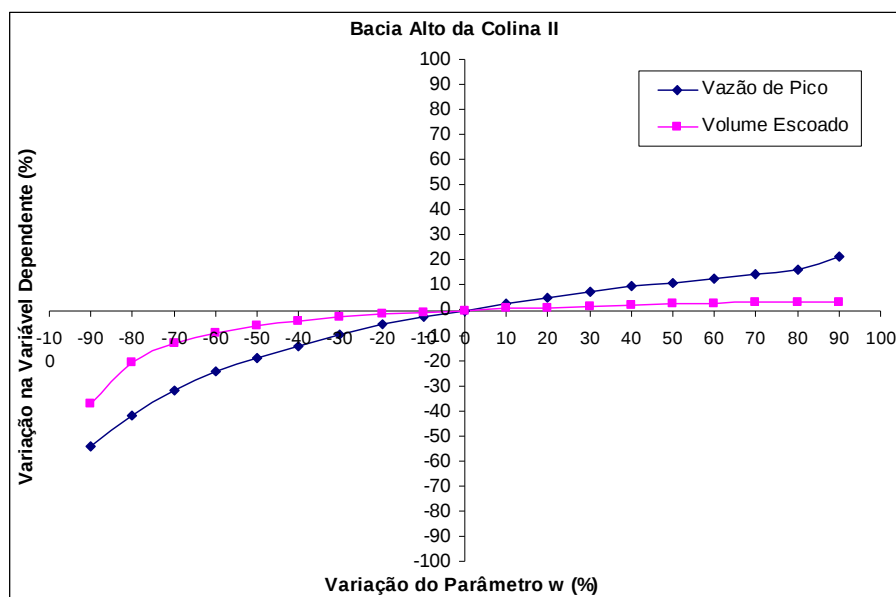


Figura 42 – Influência do parâmetro W na vazão de pico e no volume escoado – ACII

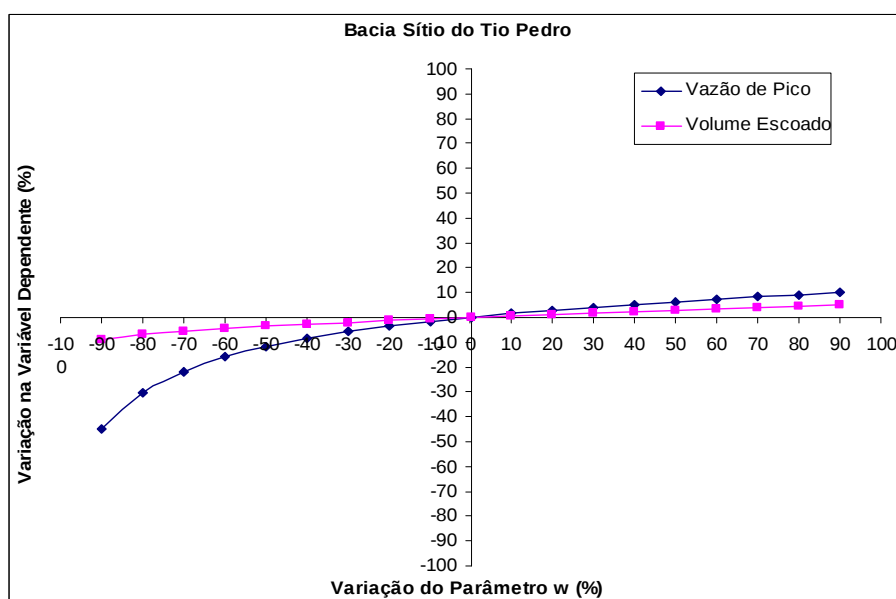


Figura 43 – Influência do parâmetro W na vazão de pico e no volume escoado - STP

A porcentagem de área impermeável (AI) apresentou comportamento bastante diferente nas duas bacias, porém homogêneo para a vazão de pico e para o volume escoado. Na bacia Alto da Colina II ele quase não apresentou sensibilidade, já na bacia Sítio do Tio Pedro o parâmetro foi um dos que apresentou maior sensibilidade. Ele também apresentou um comportamento aproximadamente linear nas duas bacias, aumentando a vazão de pico e o volume escoado com o acréscimo da

porcentagem de área impermeável. As figuras 44 e 45 mostram o comportamento da vazão de pico e do volume escoado variando o parâmetro em questão.

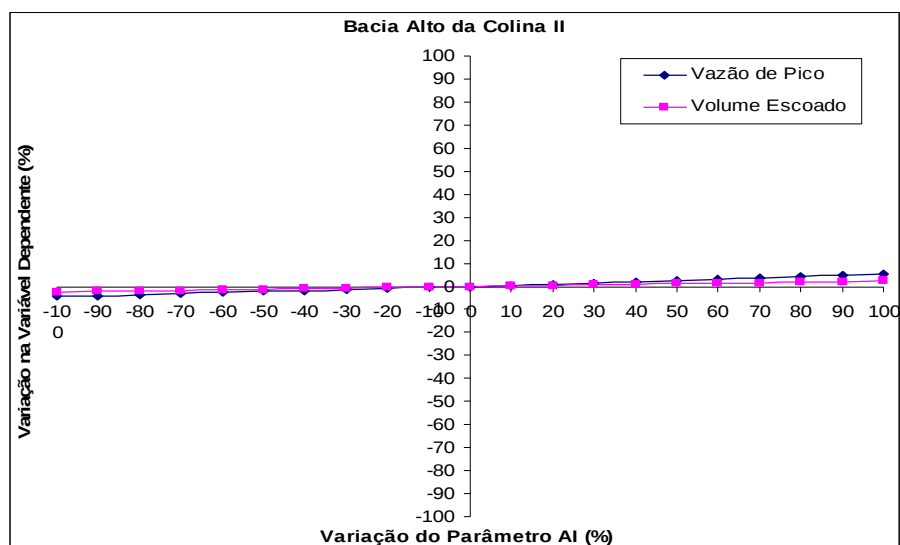


Figura 44 – Influência do parâmetro AI na vazão de pico e no volume escoado – ACII

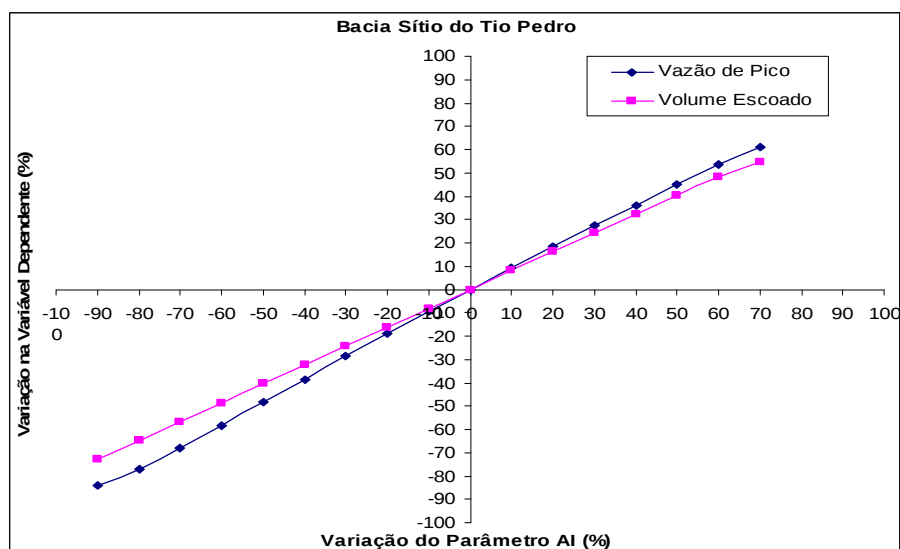


Figura 45 – Influência do parâmetro AI na vazão de pico e no volume escoado - STP

O coeficiente de rugosidade de Manning causa o decréscimo da vazão de pico e do volume escoado, quando seu valor é aumentado, mostrando uma sensibilidade maior para a vazão de pico nas duas bacias. Os valores baixos do coeficiente de rugosidade de Manning apresentam maior sensibilidade. As figuras 46 e 47 mostram o comportamento da vazão de pico e do volume escoado com o aumento do parâmetro analisado.

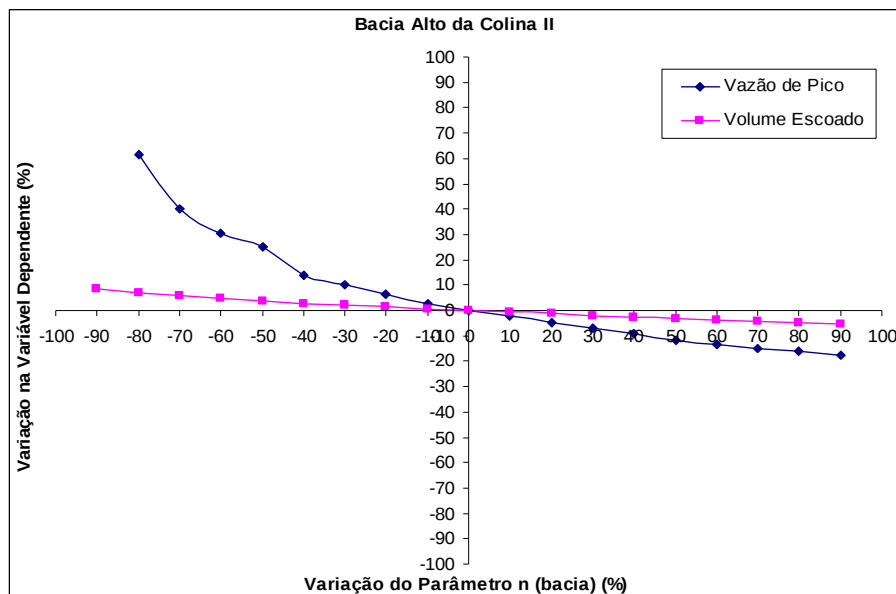


Figura 46 – Influência do parâmetro n na vazão de pico e no volume escoado - ACII

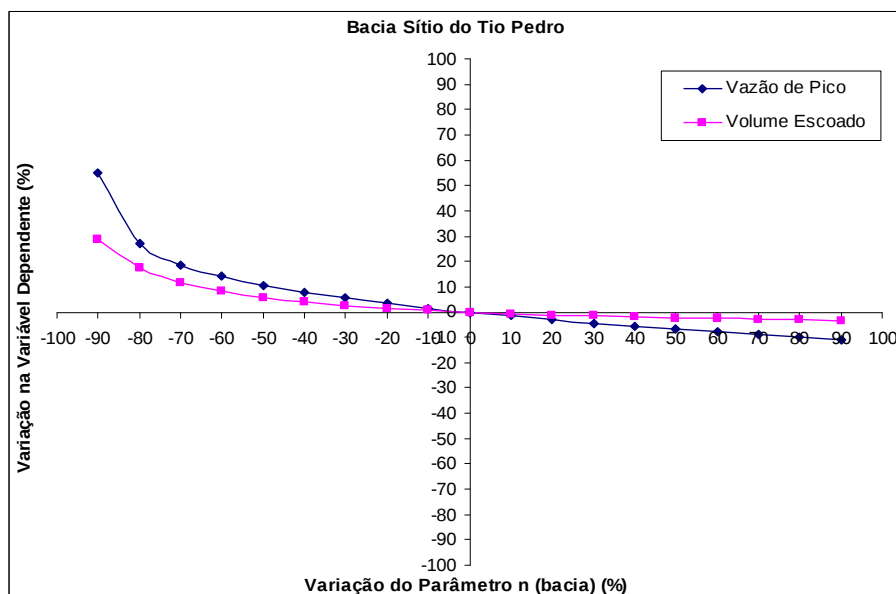


Figura 47 – Influência do parâmetro n na vazão de pico e no volume escoado - STP

O parâmetro d, que representa a altura de detenção para as áreas permeáveis e impermeáveis, apresentou comportamento diferente para as duas bacias, apresentando pouca sensibilidade na bacia Alto da Colina II, e uma grande sensibilidade na bacia Sítio do Tio Pedro, com uma sensibilidade um pouco maior para o volume escoado, porém com um comportamento semelhante para a vazão de pico. As figuras 48 e 49 mostram o comportamento da vazão de pico e do volume escoado em função do parâmetro altura de armazenamento d.

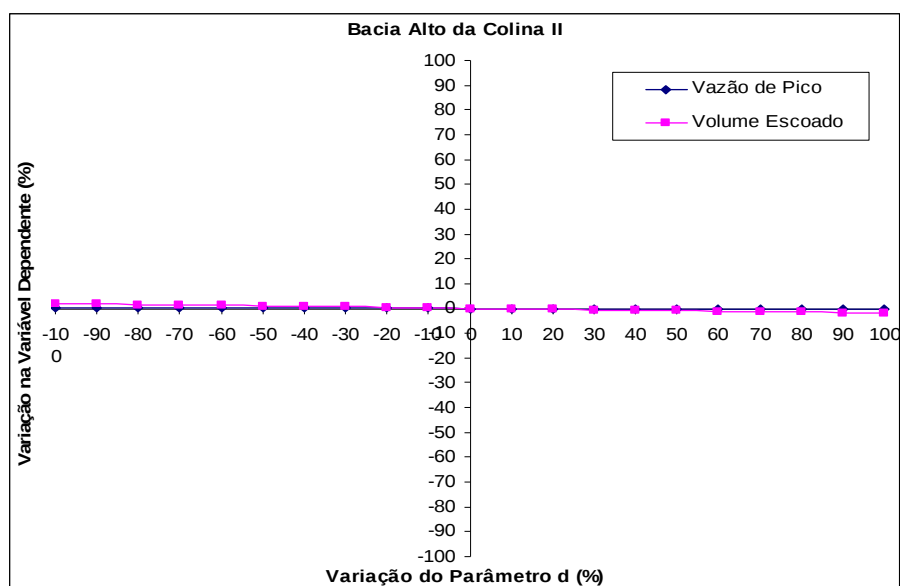


Figura 48 – Influência do parâmetro d na vazão de pico e no volume escoado - ACII

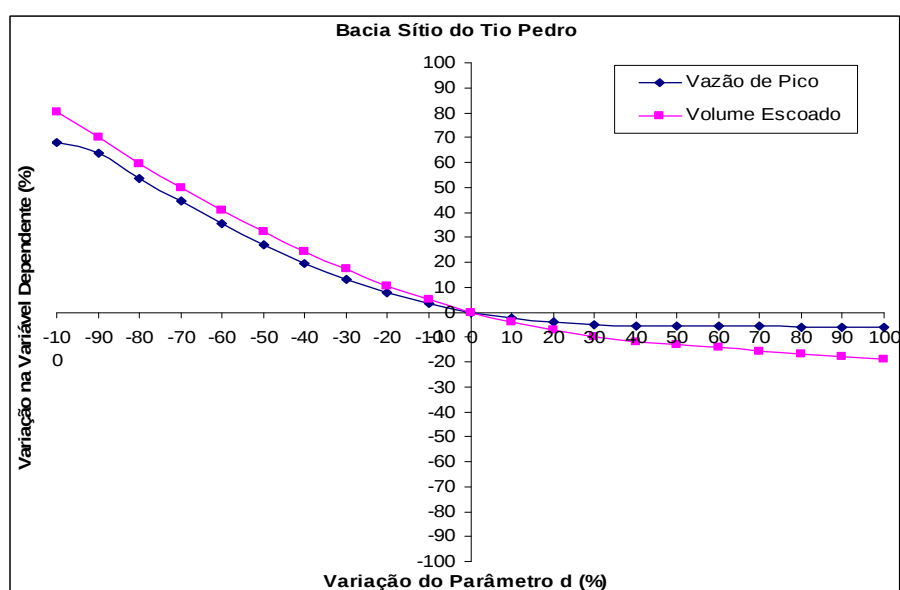


Figura 49 – Influência do parâmetro d na vazão de pico e no volume escoado - STP

A variação da taxa de infiltração (I) também foi analisada, apresentando uma sensibilidade maior para o volume escoado em especial na bacia Sítio do Tio Pedro, porém com comportamento semelhante para a vazão de pico e o volume escoado. Na bacia Sítio do Tio Pedro essa sensibilidade foi maior para os valores menores de I . As figuras 50 e 51 mostram o comportamento da vazão de pico e do volume escoado com a variação da taxa de infiltração.

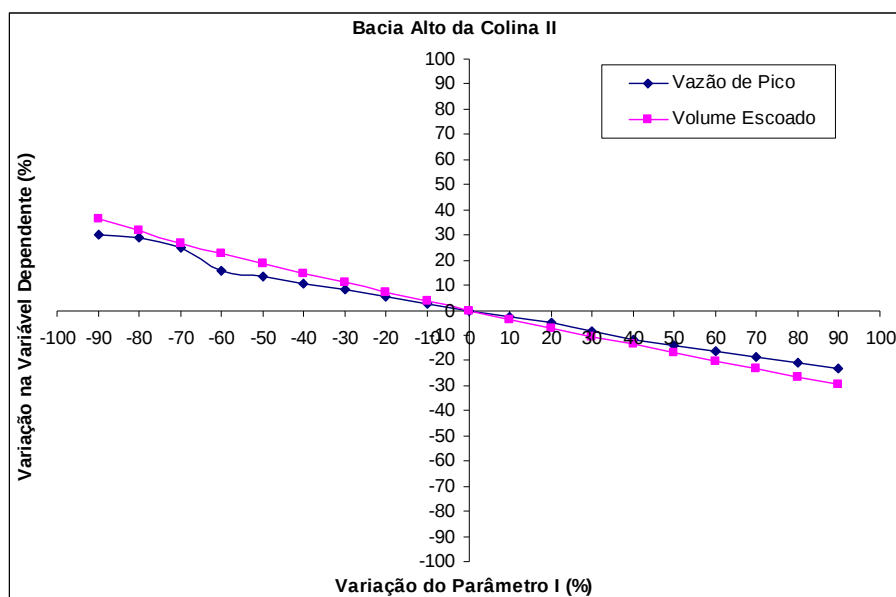


Figura 50 – Influência do parâmetro I na vazão de pico e no volume escoado - ACII

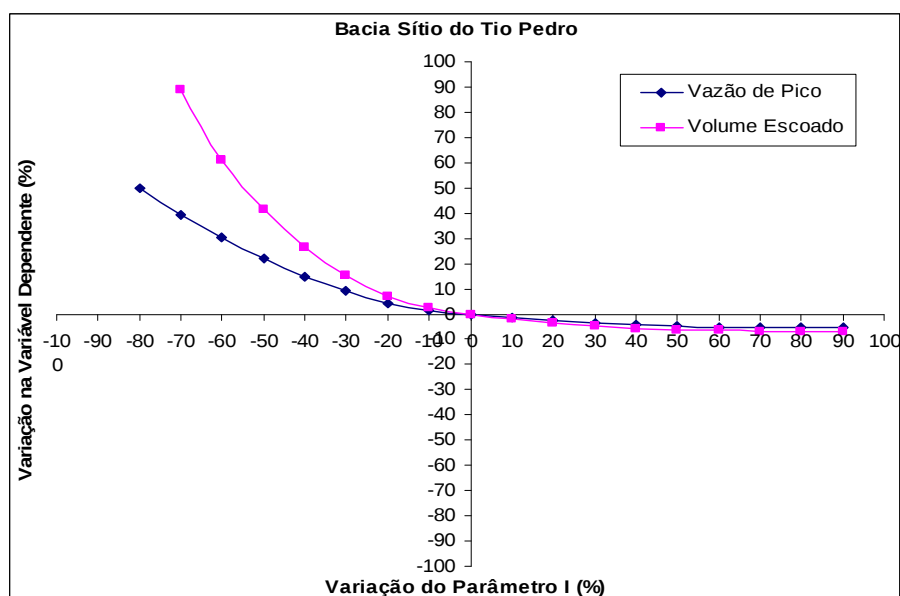


Figura 51 – Influência do parâmetro I na vazão de pico e no volume escoado - STP

5.1.2 Sensibilidade do módulo Extran

Para o módulo Extran o parâmetro analisado foi o coeficiente de rugosidade de Manning para o canal (n_c). Esse parâmetro apresentou um comportamento semelhante nas duas bacias, apresentando uma maior sensibilidade para a vazão

de pico, e quase nenhuma sensibilidade no volume escoado. A maior sensibilidade foi percebida para os valores mais baixos de n para a vazão de pico. As figuras 52 e 53 mostram a influência dos parâmetros analisados no módulo Extran tendo o volume escoado e a vazão de pico como variáveis dependentes.

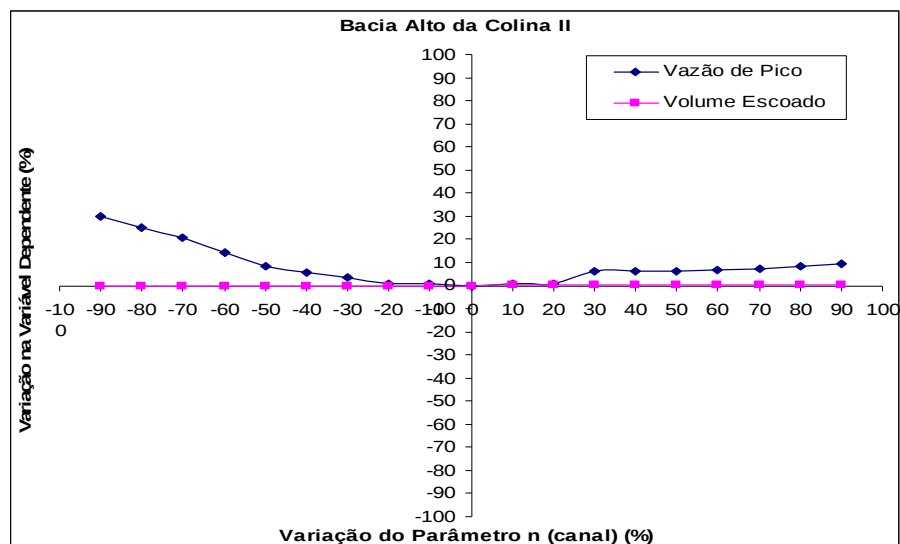


Figura 52 – Influência do parâmetro n_c na vazão de pico e no volume escoado – ACII

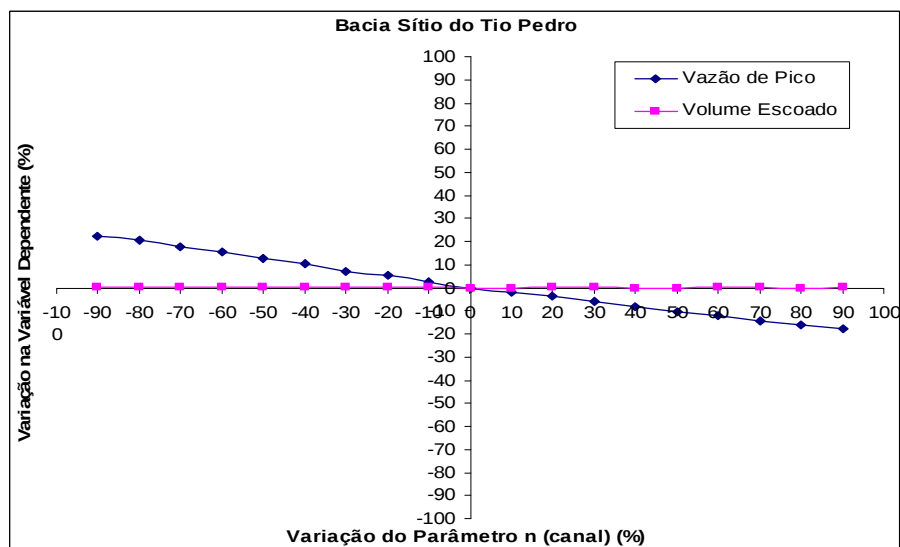


Figura 53 – Influência do parâmetro n_c na vazão de pico e no volume escoado – STP

Quando comparado aos resultados obtidos por Garcia (2005) para a bacia do Cancela, o coeficiente de rugosidade no canal apresentou comportamento bastante semelhante nas três bacias, tendo uma sensibilidade não muito elevada, porém significativa quando a vazão de pico foi considerada a variável dependente, e praticamente nula quando o volume escoado foi considerado a variável dependente.

5.2 Resultado da calibração do modelo para a bacia Alto da Colina II

Os resultados obtidos na calibração dos parâmetros para os eventos analisados, no nível de discretização aplicado a bacia Alto da Colina II, apresentaram bons ajustes representados pelo coeficiente de correlação e também levando em conta o erro médio no volume escoado e na vazão de pico.

O coeficiente de correlação de Pearson, também chamado de "coeficiente de correlação produto-momento" ou simplesmente de "r de Pearson" mede o grau da correlação entre duas variáveis de escala métrica, ou seja, indica a força e a direção do relacionamento linear entre duas variáveis aleatórias.

O coeficiente de correlação de Pearson calcula-se segundo a seguinte fórmula:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (18)$$

onde: $x_1, x_2, \dots, x_n$ e $y_1, y_2, \dots, y_n$ são os valores medidos de ambas as variáveis e:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (19)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \quad (20)$$

são as médias aritméticas de ambas as variáveis.

Durante o processo de calibração procurou-se privilegiar o ajuste no coeficiente de correlação, priorizando também a diminuição do erro na vazão de pico e procurando diminuir também o erro no volume total escoado.

Obteve-se um coeficiente de correlação médio (R) de 0,94 e erros médios, na vazão de pico e volume escoado, de 1,16% e 4,72%. Os resultados obtidos, para os 10 eventos calibrados, apresentam-se disponíveis nas figuras 54 a 63 e na tabela 17.

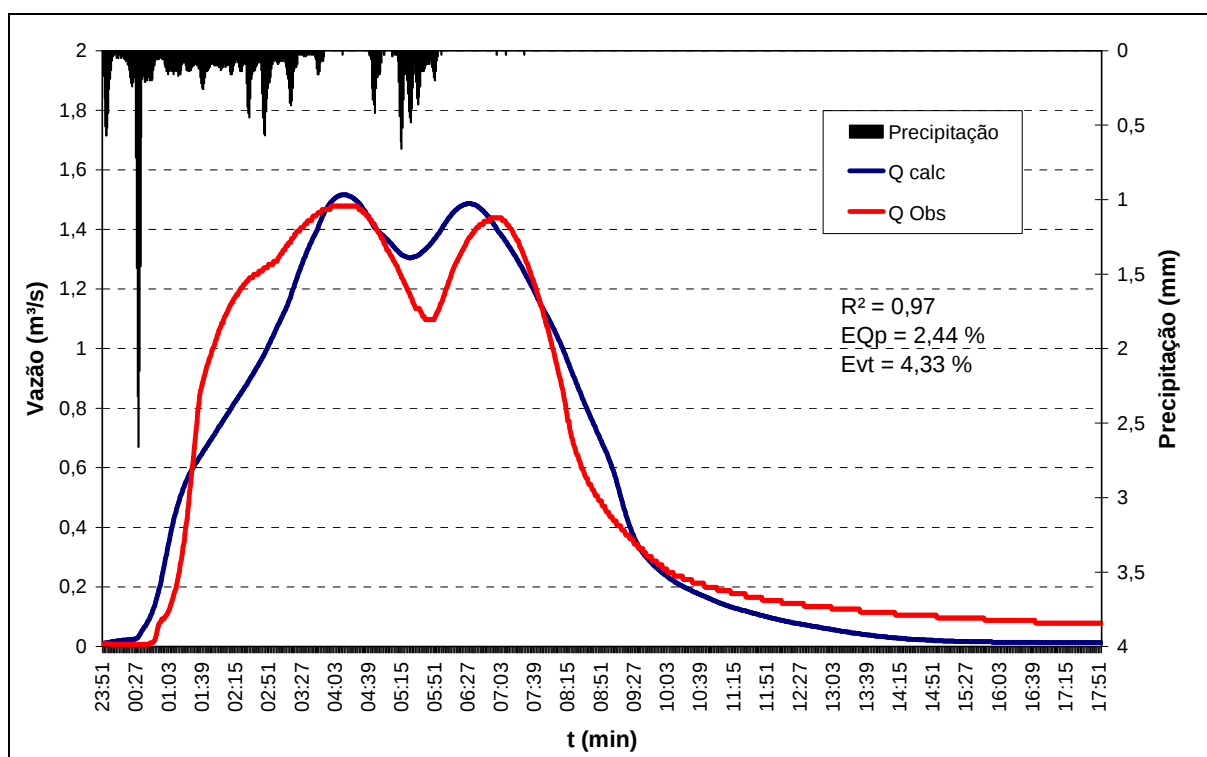


Figura 54 – Evento do dia 05/06/2001 (ACII) - condição de escoamento A

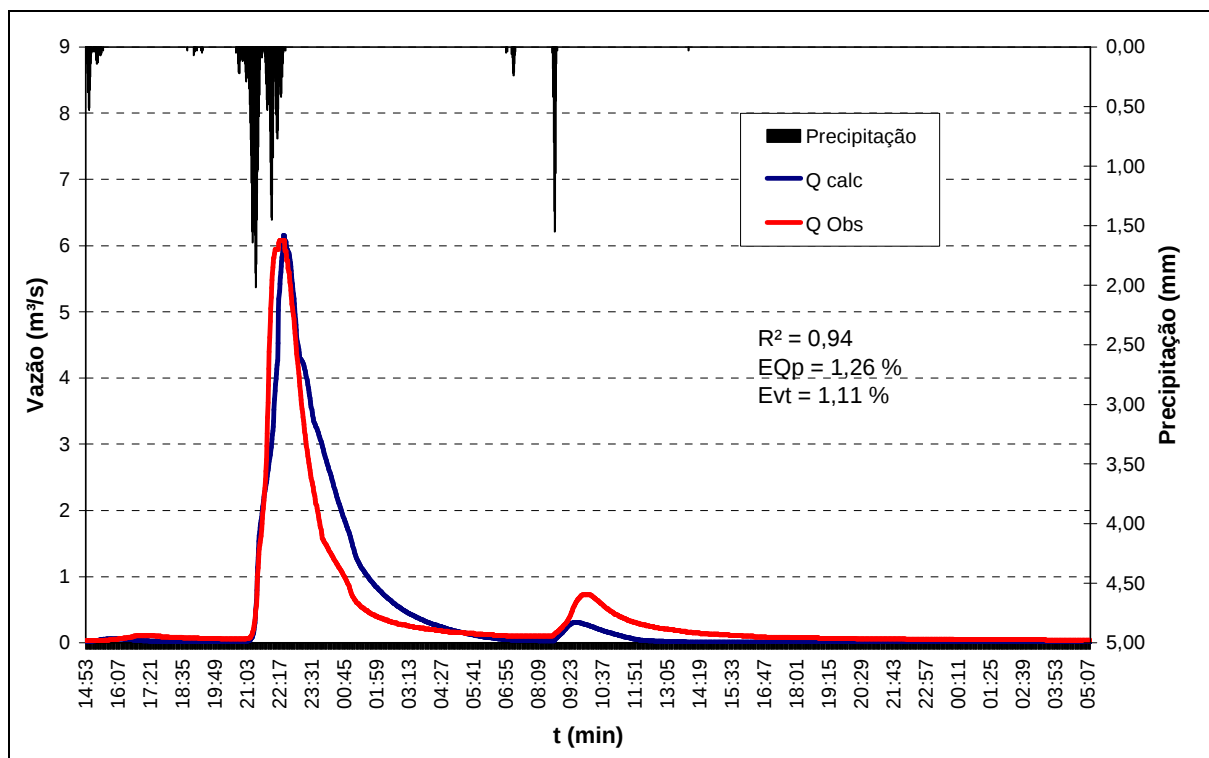


Figura 55 – Evento do dia 19/07/2001 (ACII) - condição de escoamento A

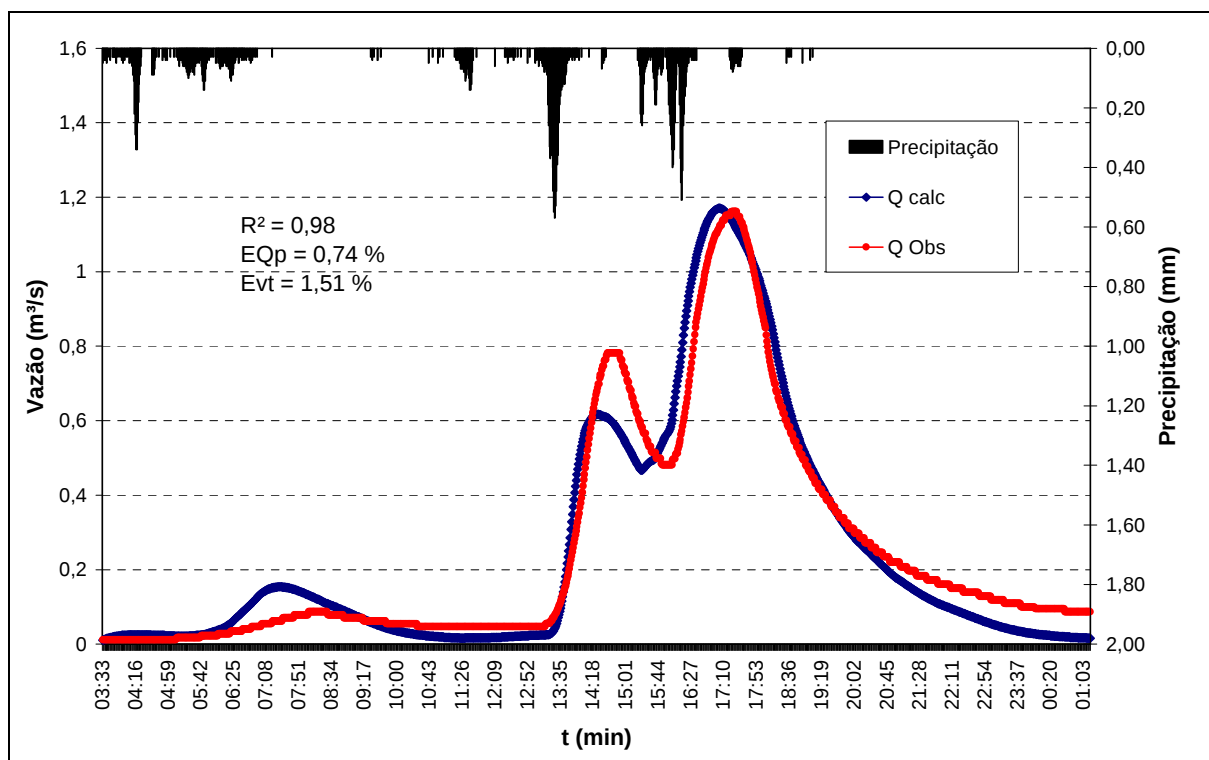


Figura 56 – Evento do dia 13/09/2001 (ACII) - condição de escoamento A

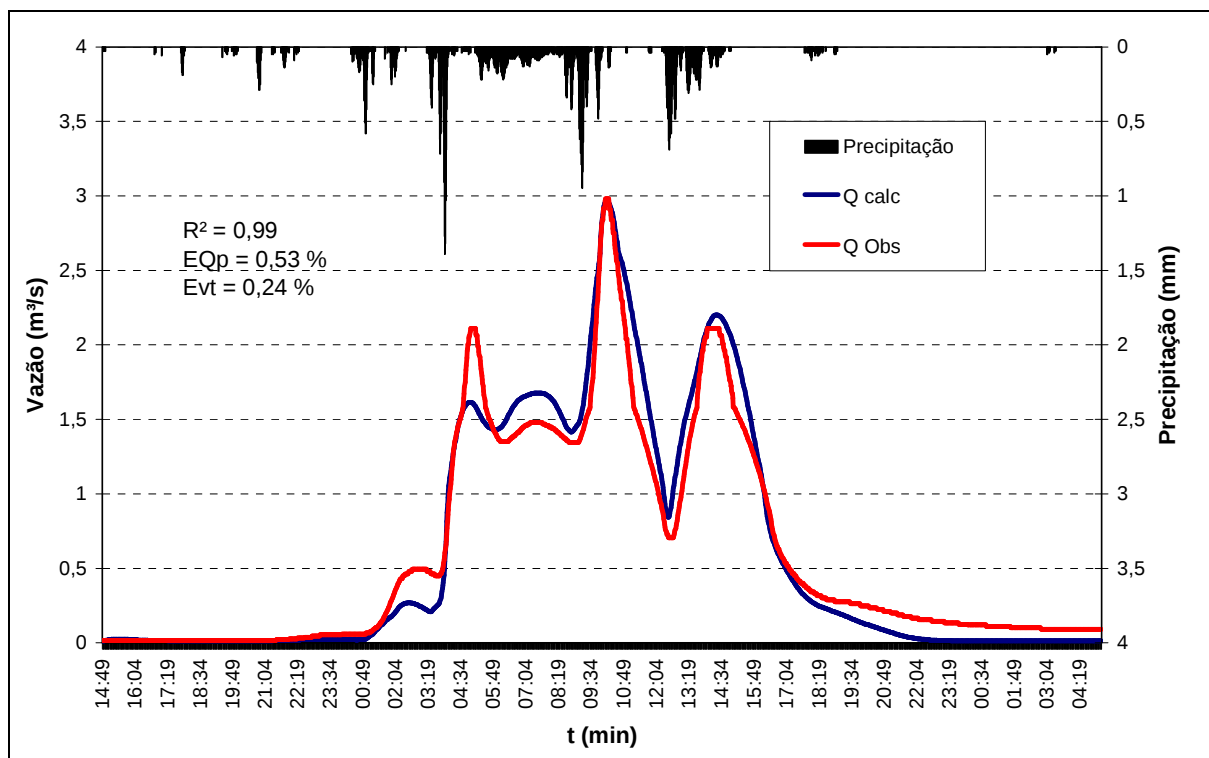


Figura 57 – Evento do dia 30/09/2001 (ACII) - condição de escoamento A

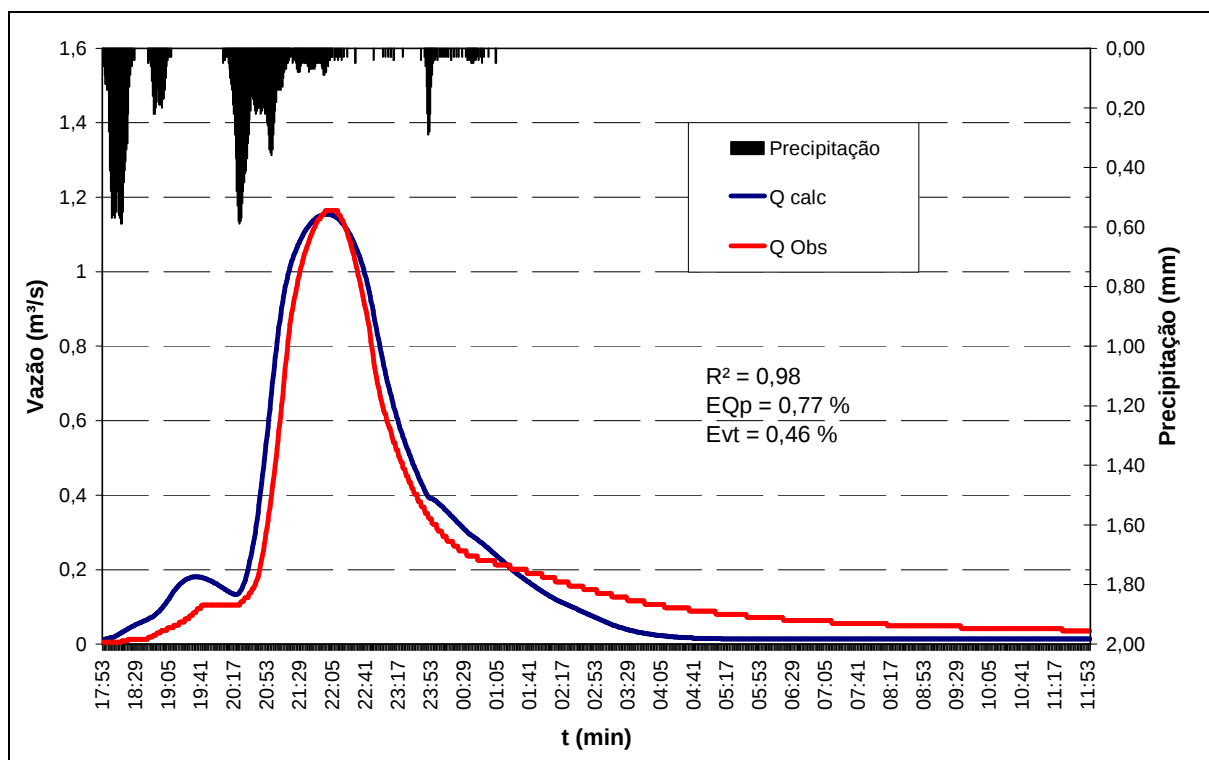


Figura 58 – Evento do dia 15/10/2001 (ACII) - condição de escoamento A

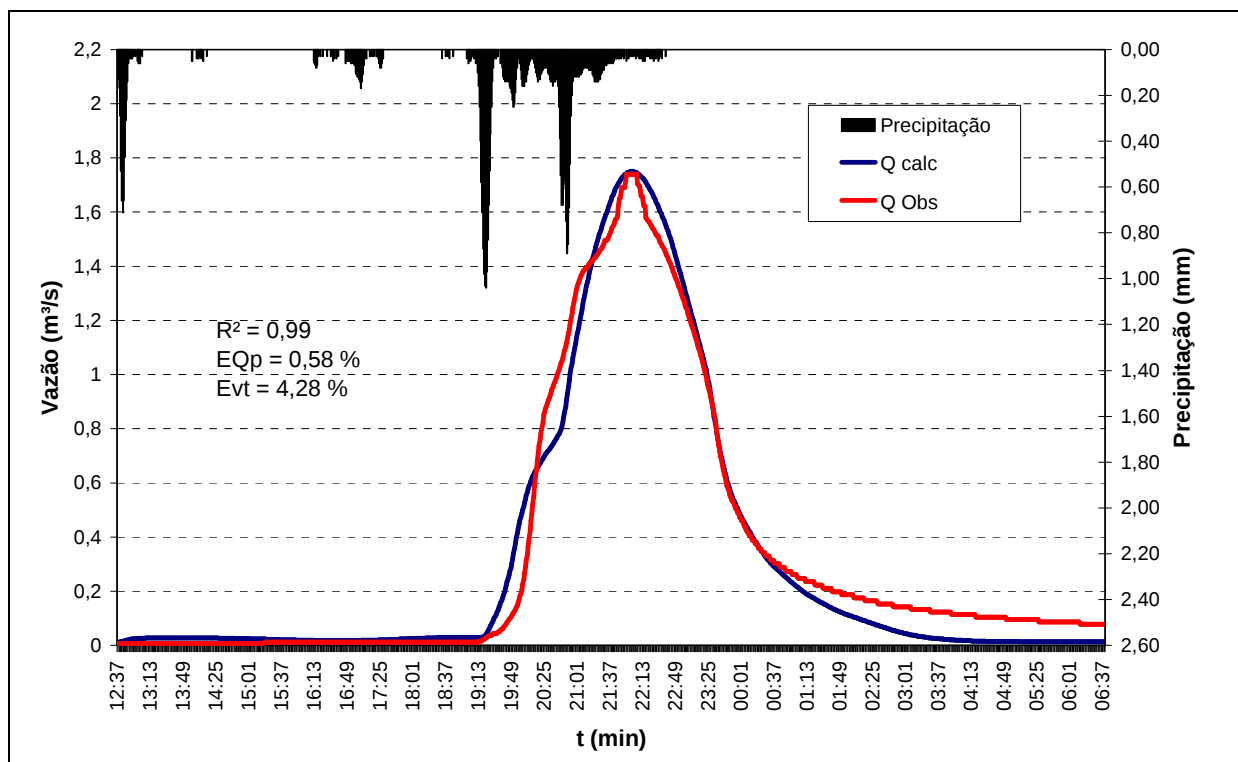


Figura 59 – Evento do dia 13/11/2001 (ACII) - condição de escoamento A

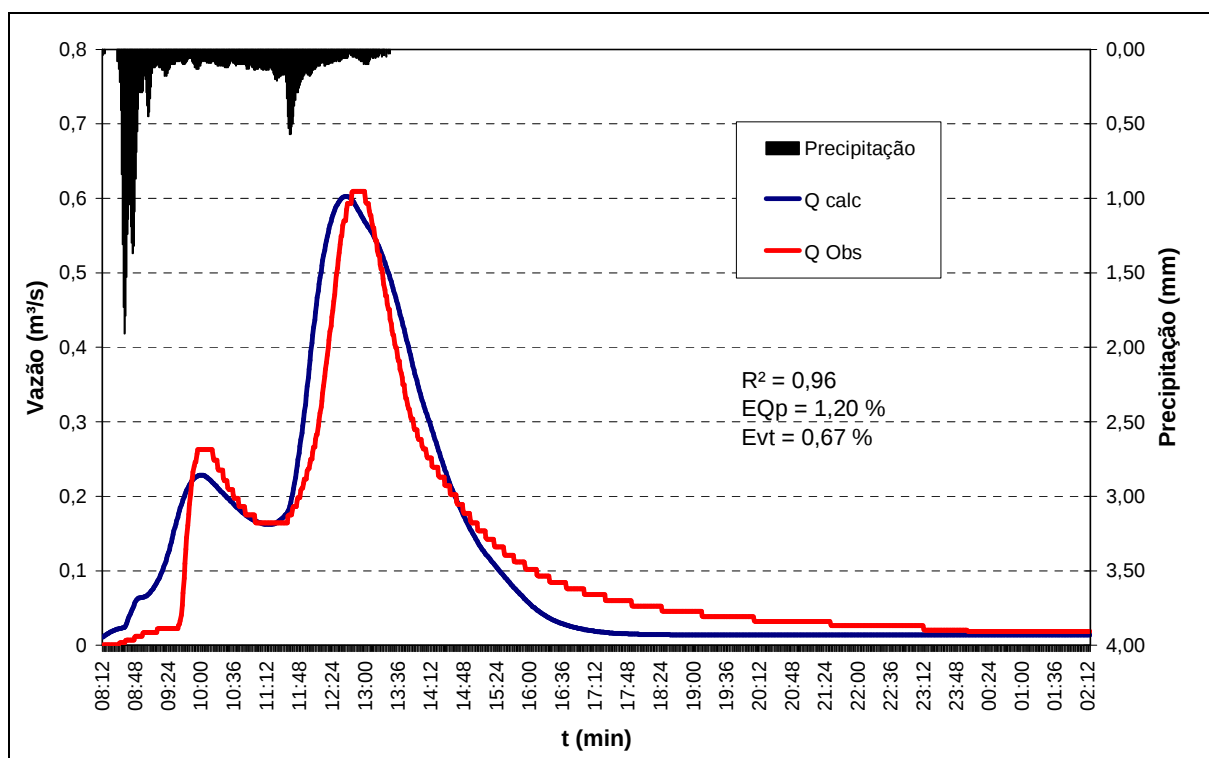


Figura 60 – Evento do dia 31/01/2002 (ACII) - condição de escoamento B

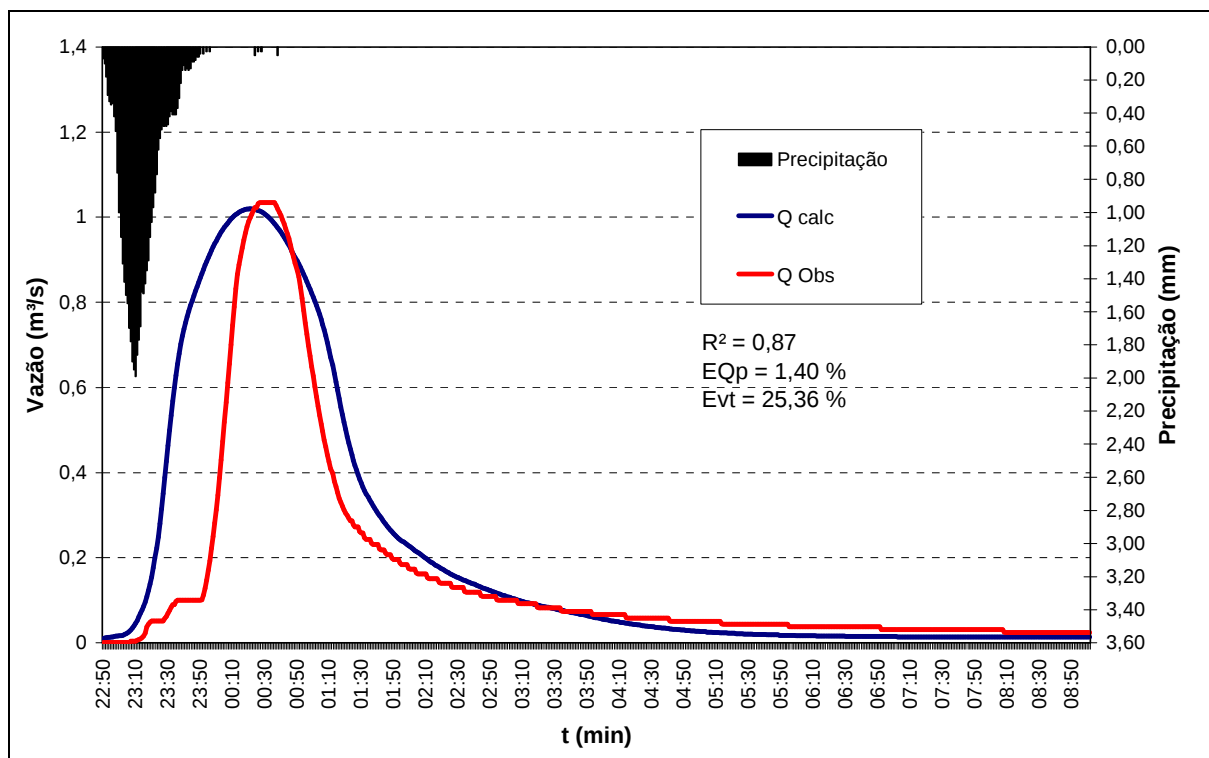


Figura 61 – Evento do dia 20/02/2002 (ACII) - condição de escoamento B

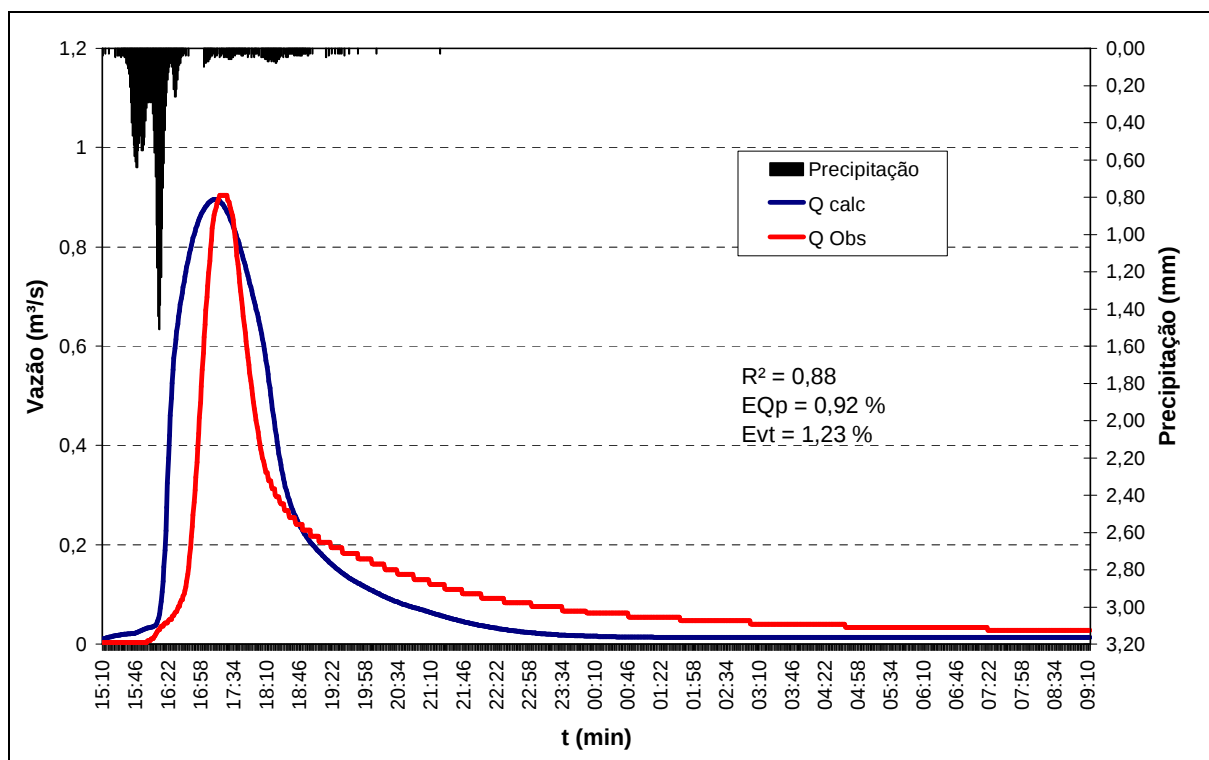


Figura 62 – Evento do dia 11/03/2002 (ACII) - condição de escoamento B

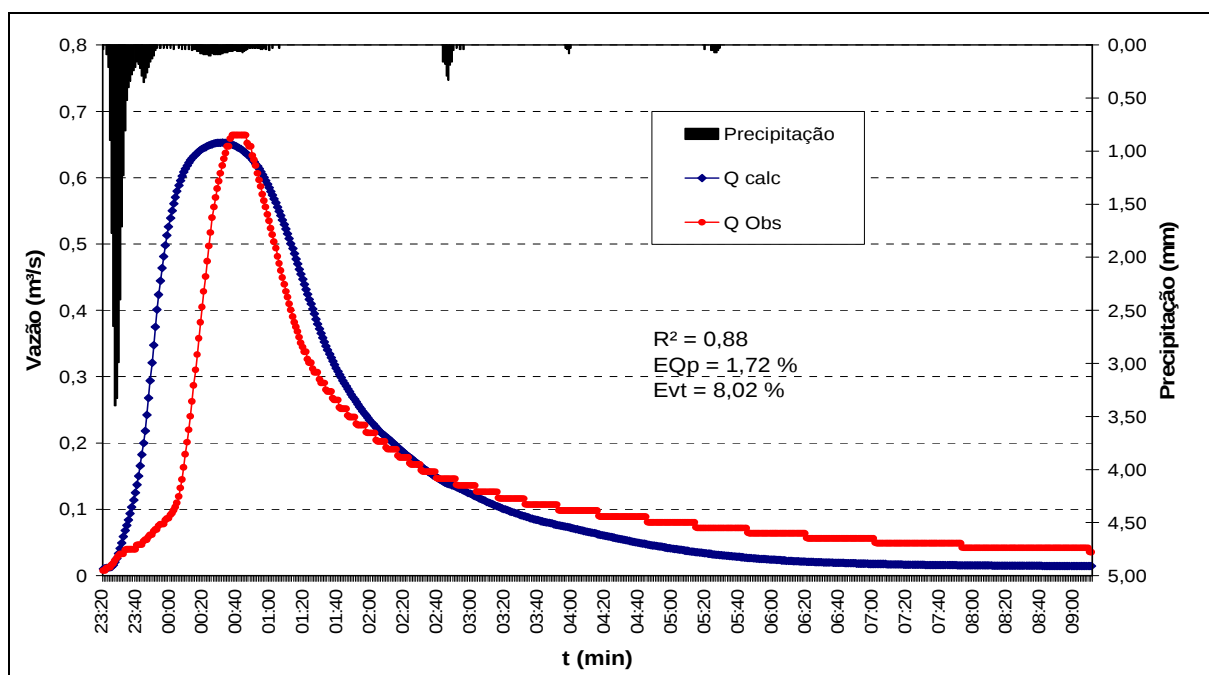


Figura 63 – Evento do dia 25/03/2002 (ACII) - condição de escoamento B

Meller (2004), utilizando o modelo MOUSE, simulou a mesma bacia, para estes mesmos eventos considerando a bacia concentrada, e obteve valores bem próximos no coeficiente de correlação e no erro da vazão de pico. A aplicação do SWMM com discretização detalhada apresentou melhores ajustes no que diz respeito ao volume escoado. Pode-se verificar uma melhor qualidade no ajuste dos eventos da condição de escoamento A. A tabela a seguir mostra a comparação entre os resultados obtidos no SWMM e no MOUSE.

Tabela 16 – Comparação com os resultados obtidos por Meller (2004) - ACII

Evento	SWMM			MOUSE (Meller, 2004)		
	R	Erro Qp (%)	Erro Vt (%)	R	Erro Qp (%)	Erro Vt(%)
5/6/2001	0,97	2,44	4,33	0,96	4,38	10,78
19/7/2001	0,94	1,26	1,11	0,98	0,52	6,05
13/9/2001	0,98	0,74	1,51	0,98	4,80	3,14
30/9/2001	0,99	0,53	0,24	0,96	5,09	4,42
15/10/2001	0,98	0,77	0,46	0,94	0,32	29,42
13/11/2001	0,99	0,58	4,28	0,97	5,20	19,38
31/1/2002	0,96	1,20	0,67	0,94	3,00	33,67
20/2/2002	0,87	1,40	25,36	0,87	10,33	20,66
11/3/2002	0,88	0,92	1,23	0,87	0,08	27,98
25/3/2002	0,88	1,72	8,02	0,88	0,06	53,03
Média	0,94	1,16	4,72	0,93	3,38	20,85

**Tabela 17 – Parâmetros obtidos na calibração do modelo para bacia ACII com
discretização detalhada**

Condição do Escoamento	Evento	(ni)	(np)	(di)	(dp)	(I0)	(Ib)	(k)	(nl)	(nr)	(nc)	R	EQp(%)	EVt (%)
A	5/6/2001	0,025	0,17	2,1	4,6	65	2	0,0058	0,07	0,07	0,18	0,97	2,44	4,33
A	19/7/2001	0,023	0,177	3	0,5	15	1,6	0,0055	0,07	0,07	0,08	0,94	1,26	1,11
A	13/9/2001	0,025	0,07	2,5	1,6	45	0,7	0,0058	0,07	0,07	0,13	0,98	0,74	1,51
A	30/9/2001	0,023	0,1	3	1	60	1,3	0,005	0,07	0,07	0,11	0,99	0,53	0,24
A	15/10/2001	0,023	0,12	3	1,8	130	2,5	0,0055	0,07	0,07	0,12	0,98	0,77	0,46
A	13/11/2001	0,03	0,12	3	1,8	70	2,6	0,008	0,03	0,07	0,12	0,99	0,58	4,28
	Média	0,025	0,126	2,77	1,88	64,2	1,78	0,0059	0,06	0,07	0,123	0,97	1,06	1,99
B	31/1/2002	0,05	0,22	5	9,8	268	4,7	0,0046	0,07	0,07	0,11	0,96	1,2	0,67
B	20/2/2002	0,08	0,45	5	2	100	13	0,004	0,07	0,07	0,15	0,87	1,4	25,36
B	11/3/2002	0,023	0,07	3	2,3	110	7,7	0,005	0,07	0,07	0,18	0,88	0,92	1,23
B	25/3/2002	0,023	0,1	2	1,5	210	5,3	0,0045	0,07	0,07	0,17	0,88	1,72	8,02
	Média	0,044	0,21	3,75	3,9	172	7,68	0,0045	0,07	0,07	0,153	0,9	1,31	8,82

Onde: np e ni são o coeficiente de rugosidade de Manning das áreas permeáveis e impermeáveis; dp e di são a altura de armazenamento das áreas permeáveis e impermeáveis; os parâmetros de infiltração de Horton onde I0 é a taxa de infiltração inicial máxima (mm/h), Ib é a taxa de infiltração mínima (mm/h) e k é a constante de decaimento (s-1); nc é o coeficiente de rugosidade de Manning no leito do canal; nr é o coeficiente de rugosidade de Manning na margem direita do canal; nl é o coeficiente de rugosidade de Manning na margem esquerda do canal; R é o coeficiente de correlação entre os valores de vazões observados e calculados; EQp é o erro entre a vazão de pico observada e calculada; e EVt é o erro entre o volume total escoado observado e calculado.

Na intenção de observar melhor e validar os resultados obtidos, os resultados foram separados em grupos de parâmetros de acordo com o valor médio obtido.

Uma vez que os eventos foram divididos em duas classes, foram obtidos três grupos, sendo dois referentes aos valores médios encontrados para os eventos classificados nos grupos A e B, e o terceiro com os valores médios obtidos para todos os eventos.

Os valores dos parâmetros obtidos para cada grupo podem ser vistos na tabela a seguir, e na tabela 19 podem ser observados os resultados obtidos para as simulações utilizando os conjuntos de valores médios encontrados para cada grupo na calibração.

Tabela 18 – Conjunto dos valores médios dos parâmetros obtidos para cada grupo da bacia ACII durante as calibrações

Conjunto	(ni)	(np)	(di)	(dp)	(lO)	(lb)	(k)	(nl)	(nr)	(nc)
Condição A	0,025	0,126	2,77	1,88	64,2	1,78	0,0059	0,06	0,07	0,123
Condição B	0,044	0,210	3,75	3,90	172,0	7,68	0,0045	0,07	0,07	0,153
Média Geral	0,033	0,160	3,16	2,69	107,3	4,14	0,0054	0,066	0,07	0,135

Tabela 19 – Resultados obtidos para simulações utilizando os conjuntos de parâmetros médios obtidos para a bacia ACII

Evento	Conj. Condição A			Conj. Condição B			Conj. Média Geral		
	R	EQp(%)	EVt (%)	R	EQp(%)	EVt (%)	R	EQp(%)	EVt (%)
05/06/01	0,96	29,72	14,40	0,91	617,72	815,59	0,92	27,32	75,67
19/07/01	0,91	52,38	4,90	0,83	177,52	178,31	0,90	5,55	52,29
13/09/01	0,97	113,26	146,68	0,90	1431,66	666,83	0,90	1273,97	620,97
30/09/01	0,97	20,30	18,09	0,98	1220,27	1024,24	0,95	151,03	196,05
15/10/01	0,94	24,92	38,79	0,93	587,02	365,80	0,98	111,32	123,70
13/11/01	0,98	7,79	11,61	0,97	687,48	569,12	0,98	63,64	83,50
Média	0,96	41,40	39,08	0,92	786,95	603,31	0,94	272,14	192,03
31/01/02	0,86	79,76	85,59	0,79	15,76	12,60	0,86	64,68	75,23
20/02/02	0,60	91,47	85,61	0,86	30,55	53,69	0,85	73,45	77,85
11/03/02	0,86	47,91	64,05	0,92	195,13	136,46	0,89	8,28	20,40
25/03/02	0,86	63,06	75,06	0,90	82,65	60,24	0,87	37,63	48,00
Média	0,79	70,55	77,58	0,87	81,02	65,75	0,87	46,01	55,37
M. Geral	0,89	53,06	54,48	0,90	504,58	388,29	0,91	181,69	137,37

Ao analisarmos a tabela 19 verificamos que a classificação dos eventos de acordo com a condição de escoamento é válida, uma vez que a realização das simulações utilizando os valores médios encontrados para cada grupo apresenta resultados melhores quando realizada com o conjunto de parâmetros médios obtido para o referido grupo, do que quando utilizado o conjunto de parâmetros médios obtido para o outro grupo ou para o conjunto dos valores médios de todos os eventos.

Para os eventos classificados na condição de escoamento A, os melhores resultados foram obtidos quando as simulações foram feitas utilizando o conjunto de parâmetros médios obtidos para o próprio grupo. Quando a simulação foi feita com os conjuntos de parâmetros obtidos para o outro grupo, e para a média geral os resultados obtidos não foram tão satisfatórios.

No caso dos eventos classificados na condição de escoamento B, os melhores resultados também foram obtidos quando as simulações foram feitas utilizando o conjunto de parâmetros médios obtidos para o próprio grupo, apesar do erro na vazão de pico apresentado para as simulações utilizando o conjunto de parâmetros médios obtido para o grupo A ser menor, a melhora no coeficiente de correlação foi muito significativa. Porém quando foi utilizado o conjunto de parâmetros obtido para a média geral de todos os eventos, os resultados referentes aos erros na vazão de pico e no volume total escoado se mostraram melhores do que quando o mesmo conjunto foi utilizado para simular os eventos da condição de escoamento A.

Apesar de apresentar um coeficiente de correlação menor, o conjunto de parâmetros obtido para a média geral de todos os eventos se mostrou mais representativo dos eventos de baixa intensidade .

5.3 Resultado da calibração do modelo para a bacia Alto da Colina I

Analisando os resultados obtidos na calibração dos parâmetros para os eventos analisados no nível de discretização aplicado a bacia Alto da Colina I, percebe-se que foram obtidos bons ajustes representados pelo coeficiente correlação e também levando em conta o erro médio na vazão de pico, porém para o volume escoado esses resultados não foram muitos satisfatórios, uma vez que priorizou-se ajustar a vazão de pico. Também pode não ter havido uma boa representação de alguns processos, devido à maneira como foi feita a representação da bacia no modelo.

Alguns parâmetros podem ter sido reajustados para representar algum dos processos que deixaram de ser representados, o que pode ter levado a erros maiores no volume total escoado.

Obteve-se um coeficiente de correlação médio (R) de 0,99 e erros médios, na vazão de pico e volume escoado, de 0,63% e 13,44%. Os resultados obtidos, para os 10 eventos calibrados, apresentam-se disponíveis nas figuras 64 a 67 e na tabela 21.

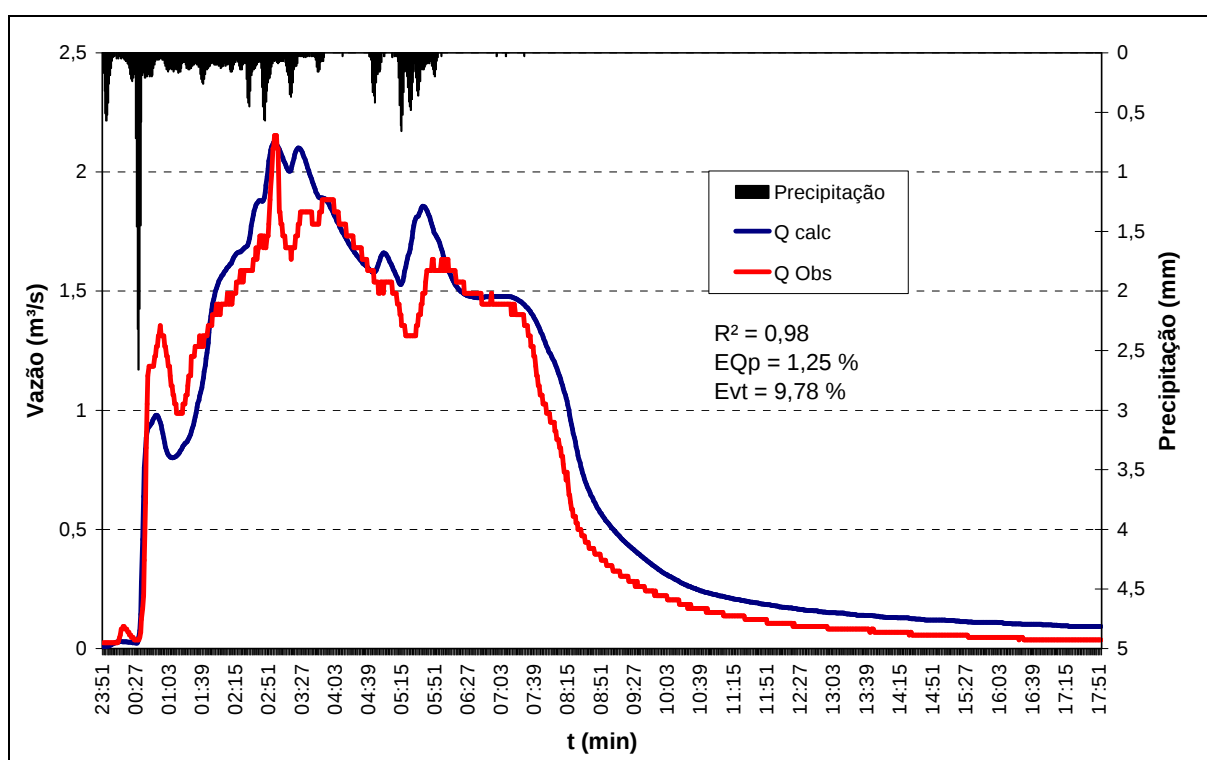


Figura 64 – Evento do dia 05/06/2001 (ACI)

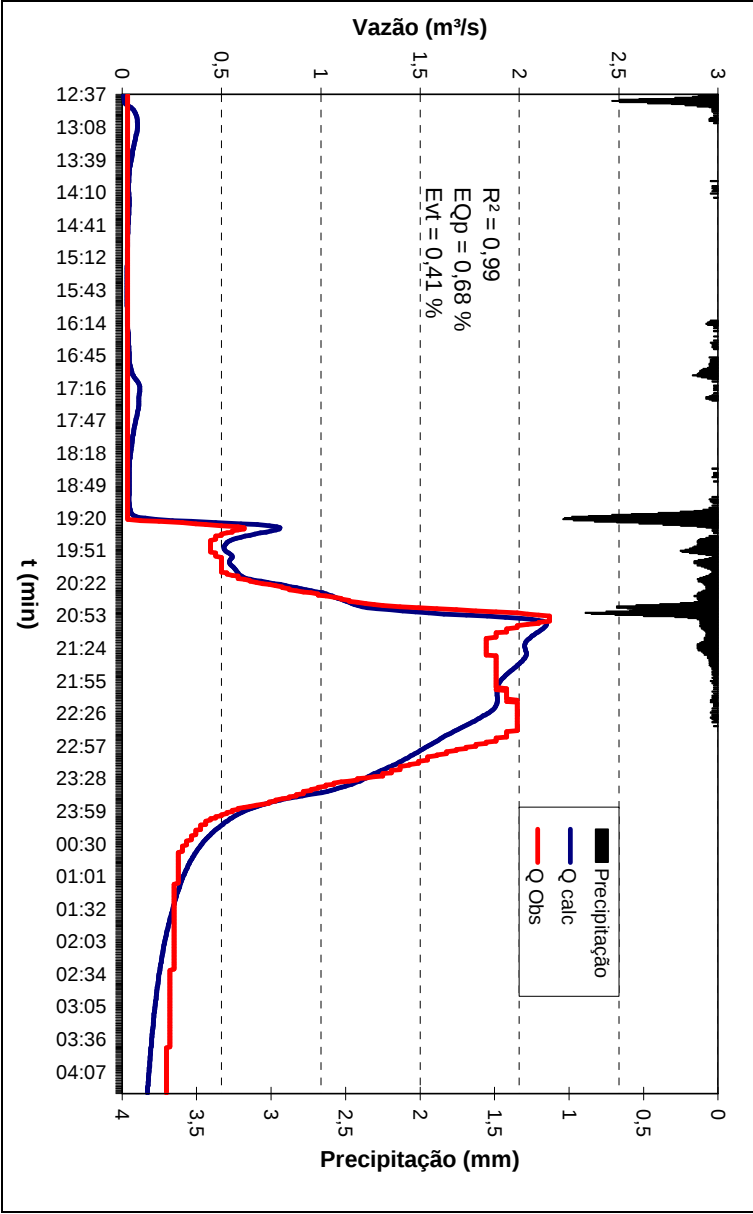


Figura 65 – Evento do dia 13/11/2001 (ACI)

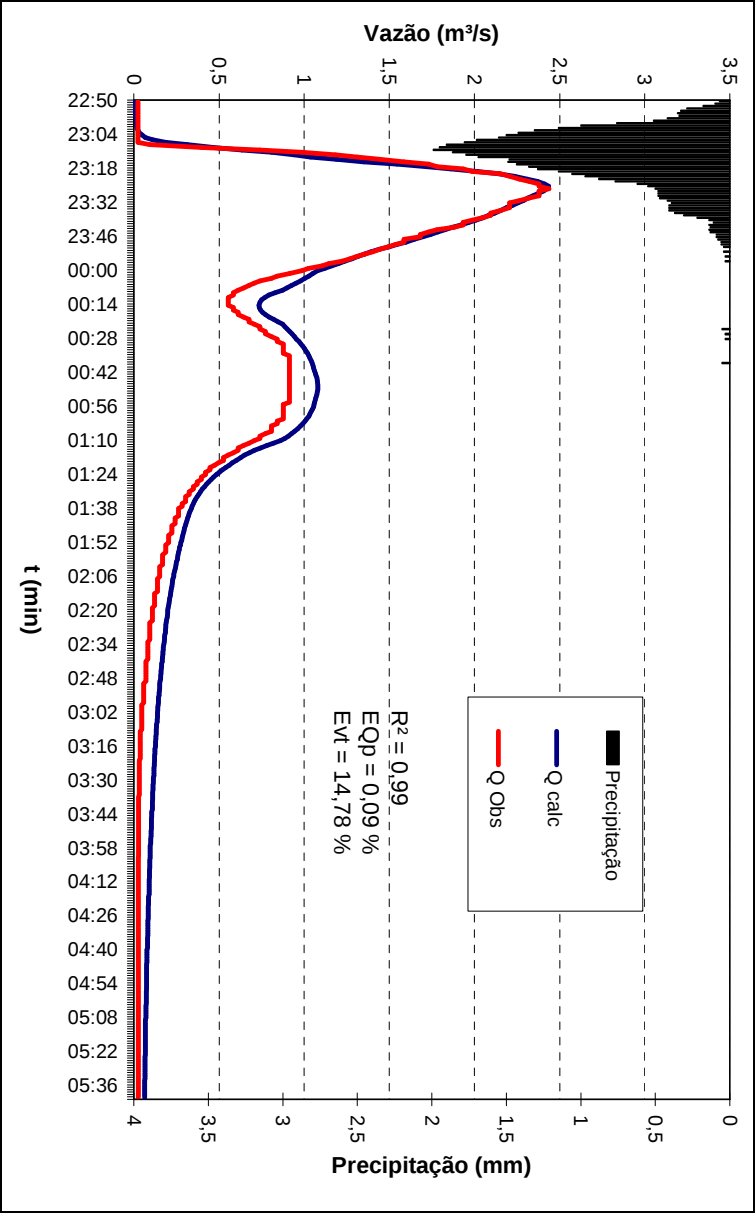


Figura 66 – Evento do dia 20/02/2002 (ACI)

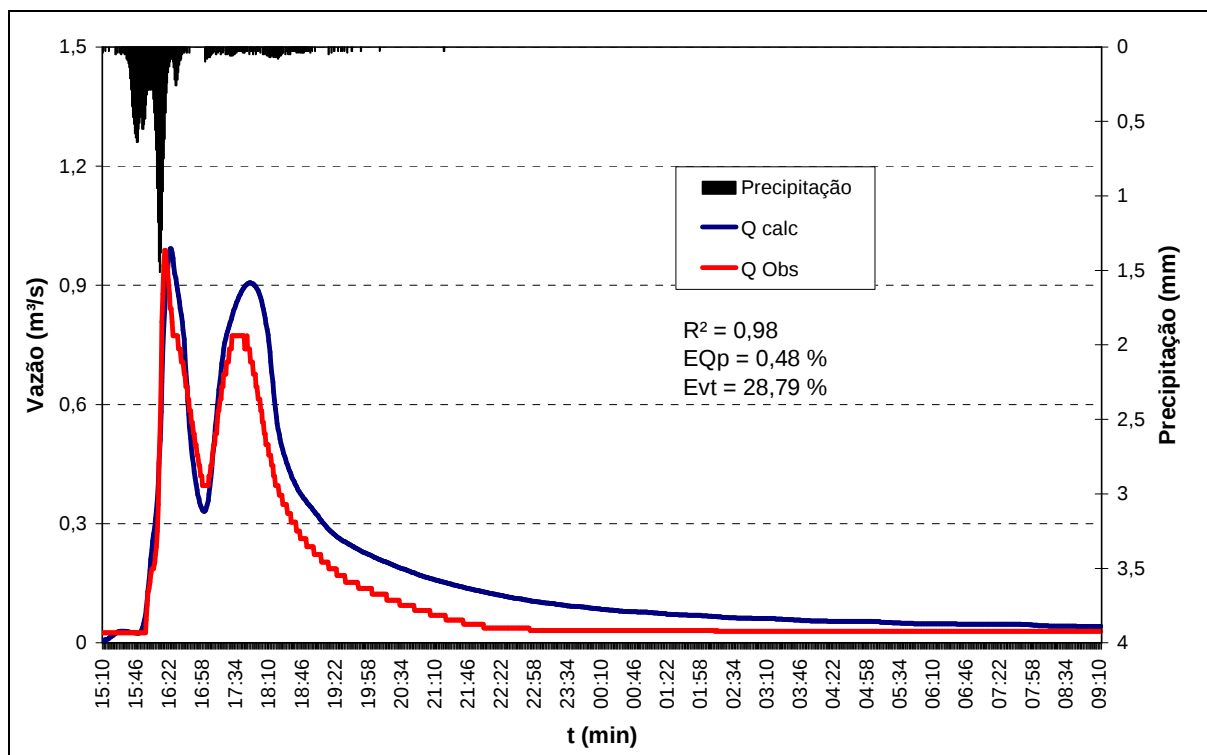


Figura 67 – Evento do dia 11/03/2002 (ACI)

Meller (2004), utilizando o modelo MOUSE, simulou a mesma bacia, para estes mesmos eventos considerando a bacia discretizada em 47 sub-bacias de contribuição e dois sistemas independentes de propagação do escoamento: uma rede de condutos subterrâneos e uma rede de ruas.

Apesar de não apresentar a mesma discretização adotada por Meller (2004), a aplicação do SWMM com a discretização adotada apresentou resultados semelhantes, com melhora significativa em relação ao volume total escoado. Além disso, uma grande vantagem é a disponibilidade do modelo SWMM que se torna bem maior uma vez que o custo do mesmo é bem pequeno se comparado ao do modelo MOUSE. Cabe salientar que não foi possível aplicar o SWMM nos eventos em que ocorreu extravasamento da rede de drenagem.

Tabela 20 – Comparação com os resultados obtidos por Meller (2004) - ACI

Evento	SWMM			Meller (2004) - MOUSE		
	R	Erro Qp(%)	Erro Vt (%)	R	Erro Qp (%)	Erro Vt(%)
5/6/2001	0,98	1,25	9,78	0,97	13,36	14,47
13/11/2001	0,99	0,68	0,41	0,96	0,81	9,49
20/2/2002	0,99	0,09	14,78	0,95	11,46	32,68
11/3/2002	0,98	0,48	28,79	0,91	1,24	14,64
Média	0,99	0,63	13,44	0,95	6,72	17,82

Tabela 21 – Parâmetros obtidos na calibração do modelo para bacia ACI com discretização detalhada

Evento	(ni)	(np)	(di)	(dp)	(I0)	(Ib)	(k)	(nl)	(nr)	(nc)	R	EQp (%)	EVt (%)
5/6/2001	0,02	0,09	8	2	55	4,2	0,005	0,05	0,05	0,09	0,98	1,25	9,78
13/11/2001	0,02	0,1	2,7	1,5	80	6,1	0,005	0,05	0,05	0,1	0,99	0,68	0,41
20/2/2002	0,02	0,17	5	7	120	17	0,005	0,06	0,06	0,1	0,99	0,09	14,78
11/3/2002	0,02	0,3	5	9	130	6,3	0,005	0,07	0,07	0,15	0,98	0,48	28,79
Média	0,02	0,165	5,18	4,88	96,25	8,4	0,005	0,058	0,058	0,11	0,99	0,63	13,44
Média	0,025	0,126	2,77	1,88	64,2	1,78	0,0059	0,06	0,07	0,123	0,97	1,06	

Onde: np e ni são o coeficiente de rugosidade de Manning das áreas permeáveis e impermeáveis; dp e di são a altura de armazenamento das áreas permeáveis e impermeáveis; os parâmetros de infiltração de Horton onde I0 é a taxa de infiltração inicial máxima (mm/h), Ib é a taxa de infiltração mínima (mm/h) e k é a constante de decaimento (s-1); nc é o coeficiente de rugosidade de Manning no leito do canal; nr é o coeficiente de rugosidade de Manning na margem direita do canal; nl é o coeficiente de rugosidade de Manning na margem esquerda do canal; R é o coeficiente de correlação entre os valores de vazões observados e calculados; EQp é o erro entre a vazão de pico observada e calculada; e EVt é o erro entre o volume total escoado observado e calculado.

Como na bacia Alto da Colina I os eventos selecionados não foram separados em grupos de acordo com a quantidade de volume escoado, como aconteceu na bacia Alto da Colina II, a validação dos resultados foi feita utilizando somente os valores médios obtidos para cada parâmetro durante a calibração.

Foi feita a simulação de cada um dos eventos individualmente, utilizando o conjunto de valores médios obtidos durante a calibração.

Os valores médios dos parâmetros obtidos durante as calibrações pode ser vistos na tabela a seguir, e na tabela 23 podem ser observados os resultados obtidos para as simulações utilizando o conjunto de valores médios encontrados na calibração.

Tabela 22 – Conjunto dos valores médios dos parâmetros obtidos para a bacia AC durante as calibrações

Conjunto	(ni)	(np)	(di)	(dp)	(lO)	(lb)	(k)	(nl)	(nr)	(nc)
Média Geral	0,020	0,165	5,18	4,88	96,25	8,40	0,005	0,058	0,058	0,110

Tabela 23 – Resultados obtidos para simulações utilizando o conjunto de parâmetros médios obtidos para a bacia ACI

Evento	Conjunto Média Geral		
	R	EQp(%)	EVt (%)
05/06/01	0,95	27,77	1,79
13/11/01	0,99	21,84	10,70
20/02/02	0,98	15,67	30,35
11/03/02	0,99	14,68	32,08
Média Geral	0,98	19,99	18,73

Apesar dos erros médios obtidos para a vazão de pico e para o volume total escoado terem sido um pouco elevados, pode-se dizer que o conjunto de parâmetros médios obtido é representativo para a bacia Alto da Colina I.

5.4 Resultado da calibração do modelo para a bacia Sítio do Tio Pedro

Os resultados obtidos na calibração dos parâmetros para os eventos analisados, no nível de discretização aplicado à bacia Sítio do Tio Pedro, obtiveram bons ajustes representados pelo coeficiente correlação e também levando em conta o erro médio no volume escoado e na vazão de pico.

Na bacia com discretização detalhada obteve-se um coeficiente de correlação médio (R) de 0,93 e erros médios, na vazão de pico e volume escoado, de 4,43% e 5,55 %. Os resultados obtidos, para os 8 eventos calibrados, apresentam-se disponíveis nas figuras 68 a 75 e na tabela 24.

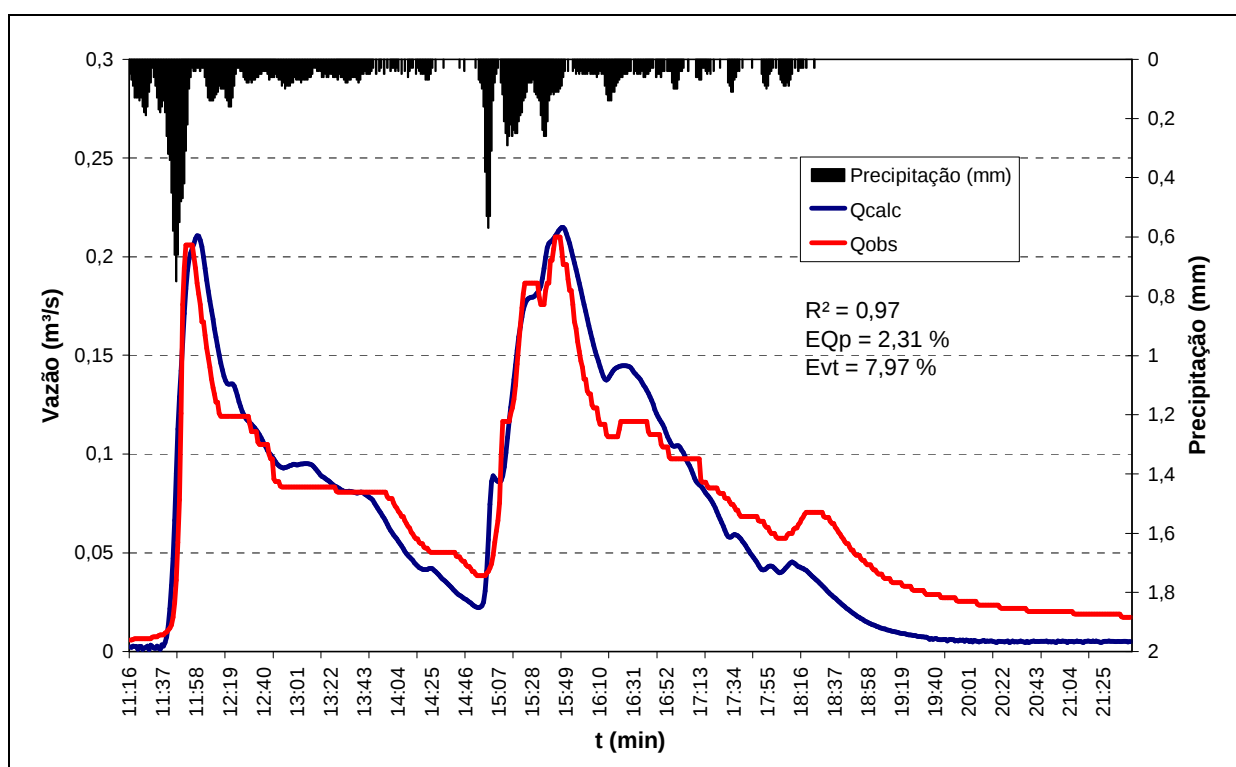


Figura 68 – Evento do dia 08/07/2003 condição de escoamento A

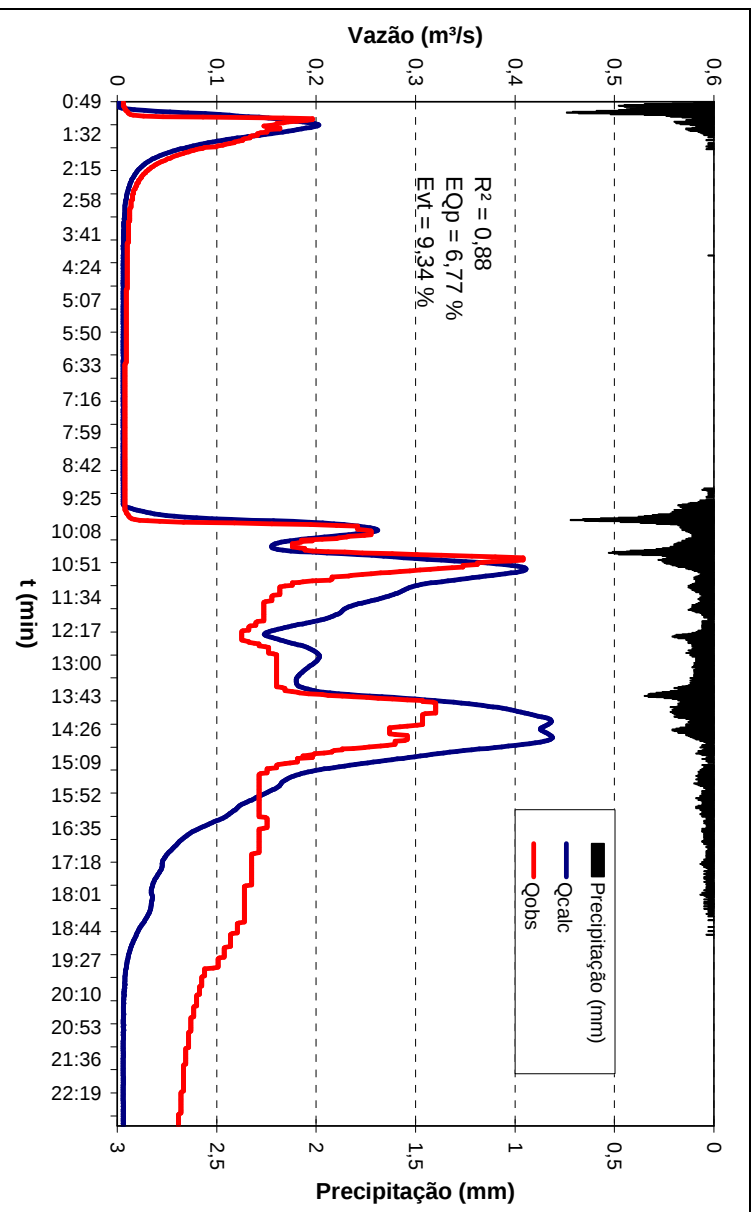


Figura 69 – Evento do dia 16/11/2003 - condição de escoamento A

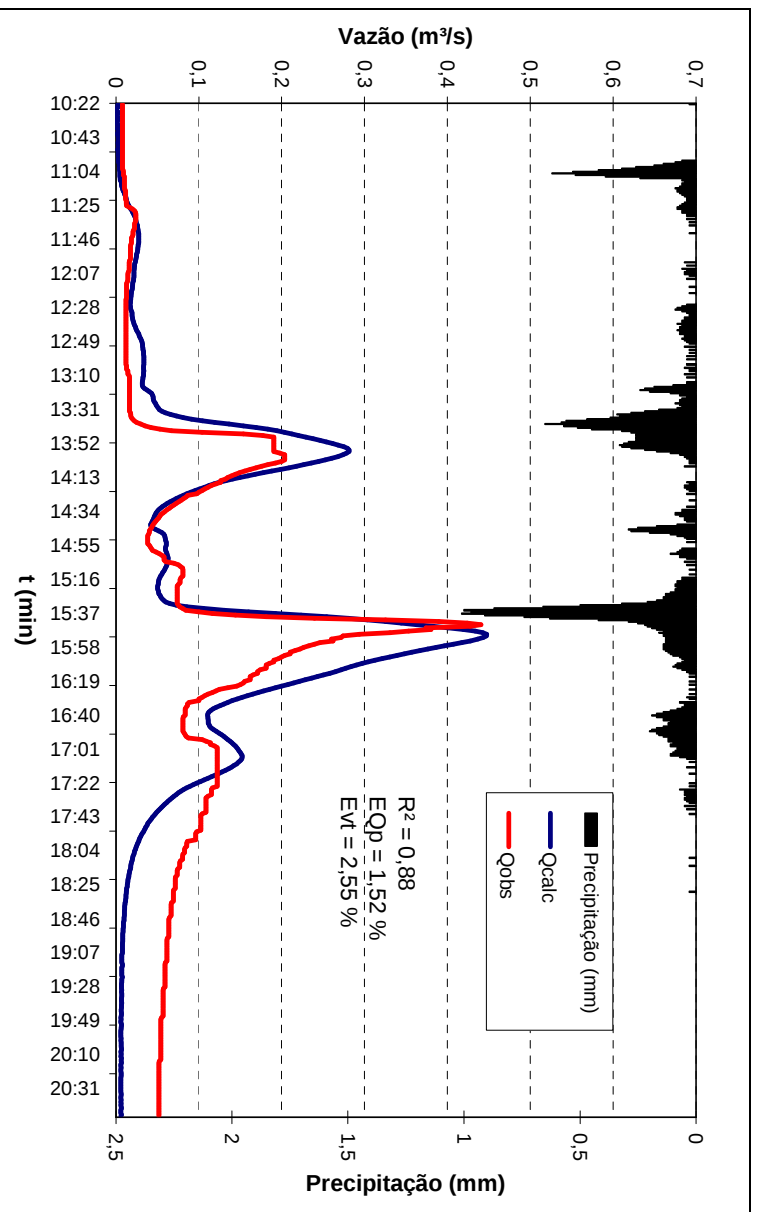


Figura 70 – Evento do dia 08/12/2003 - condição de escoamento A

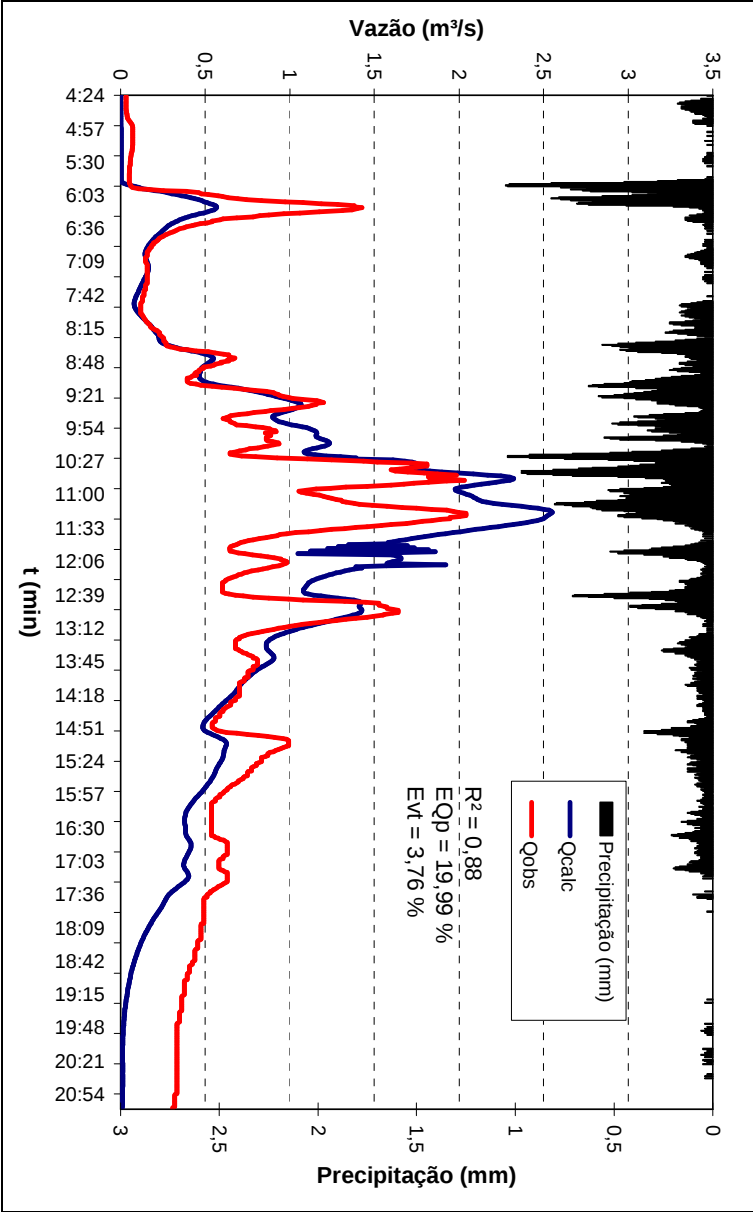


Figura 71 – Evento do dia 15/12/2003 - condição de escoamento A

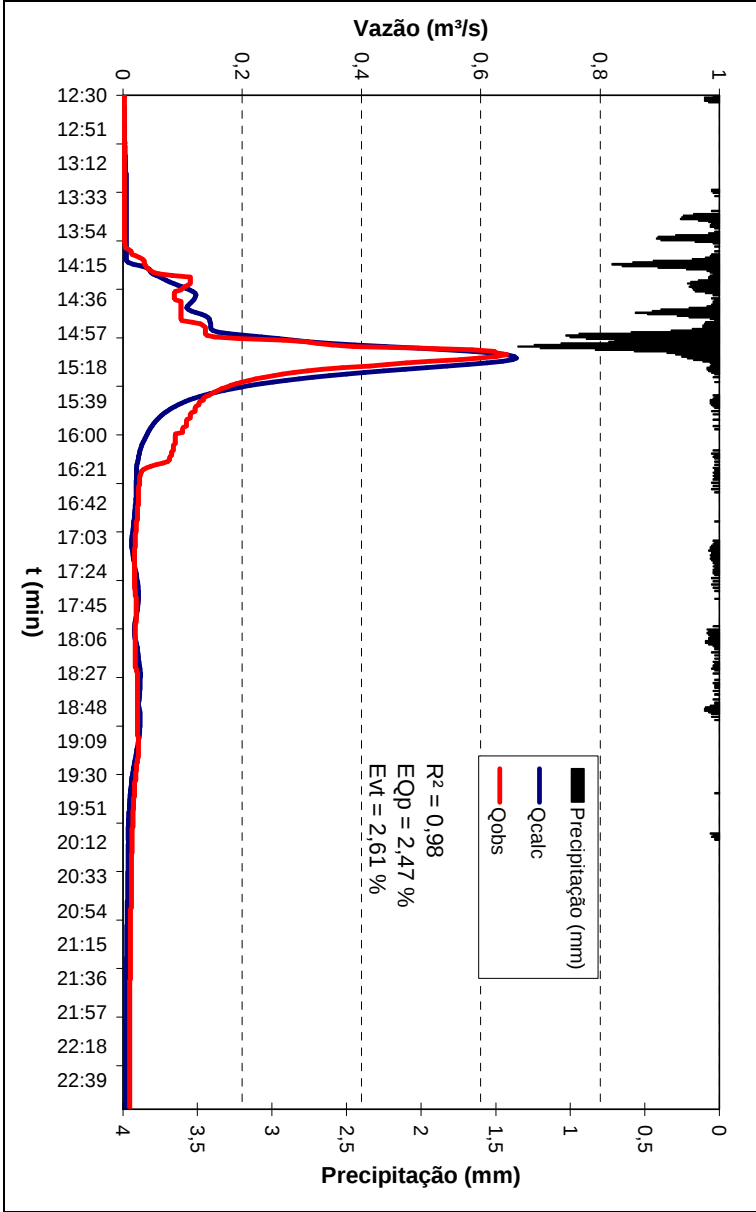


Figura 72 – Evento do dia 22/05/2003 condição de escoamento B

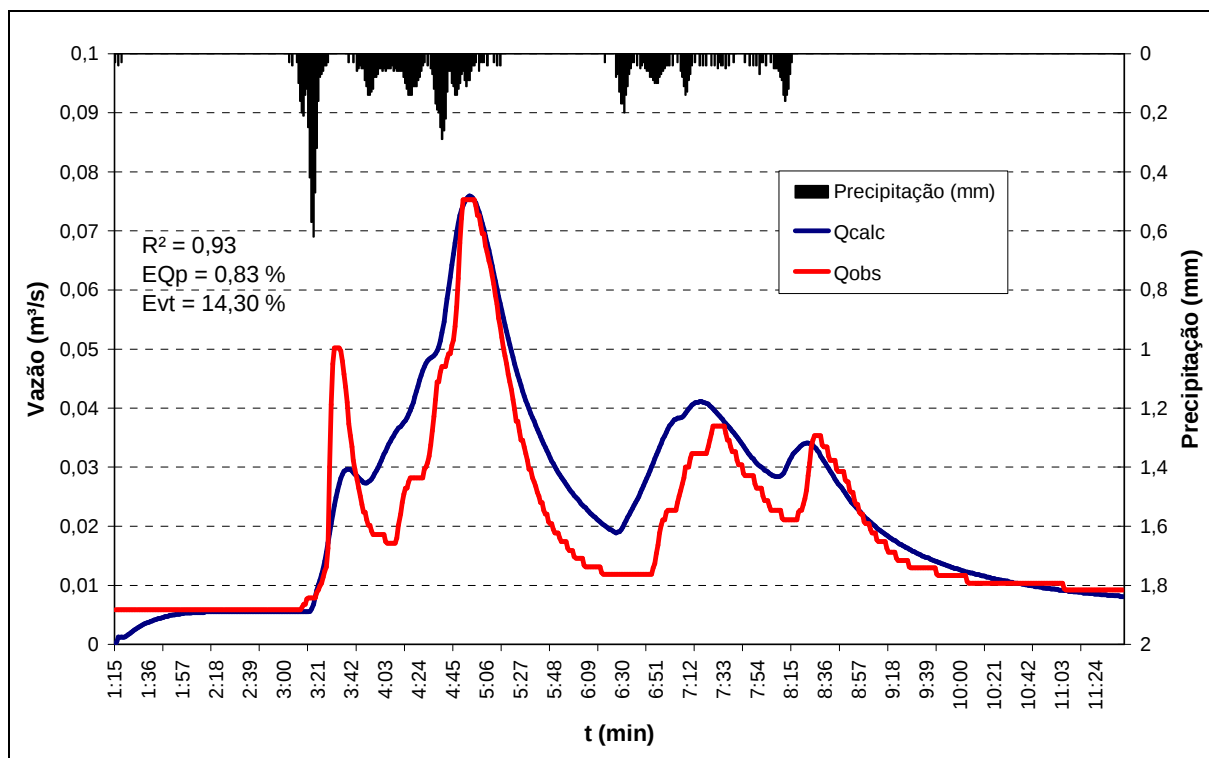


Figura 73 – Evento do dia 01/06/2003 condição de escoamento B

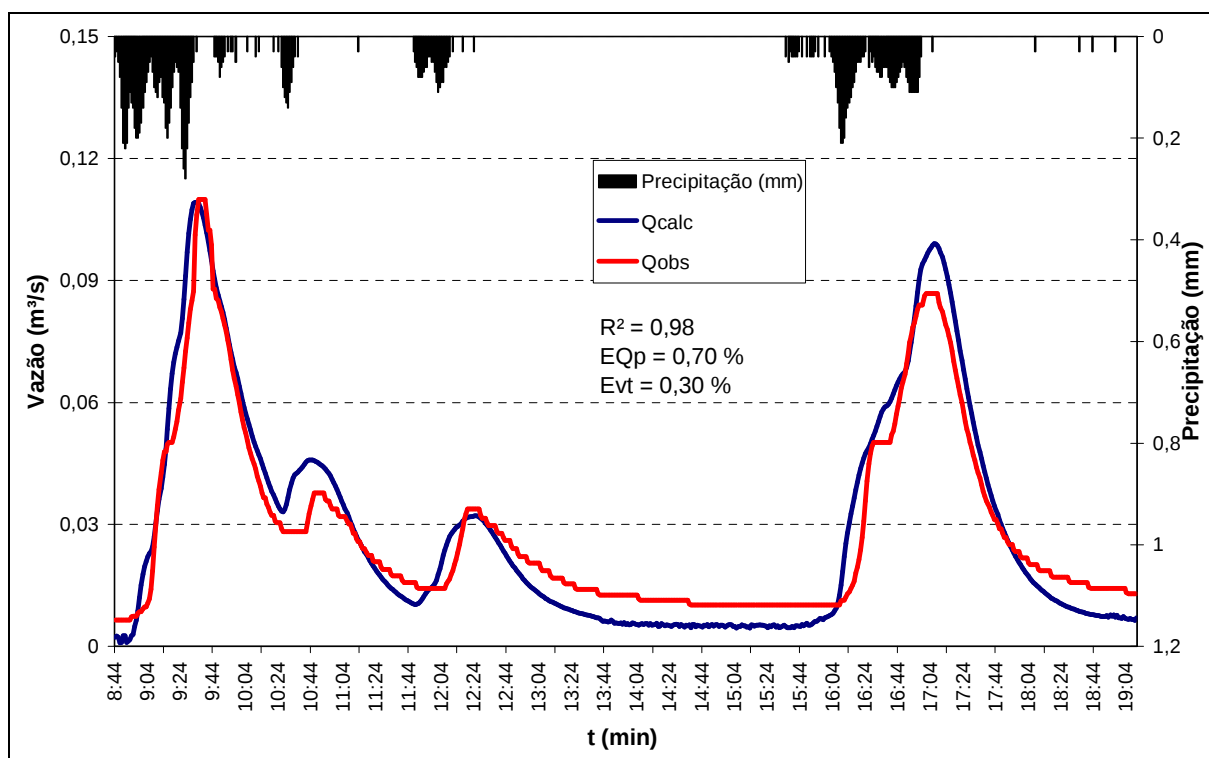


Figura 74 – Evento do dia 24/07/2003 condição de escoamento B

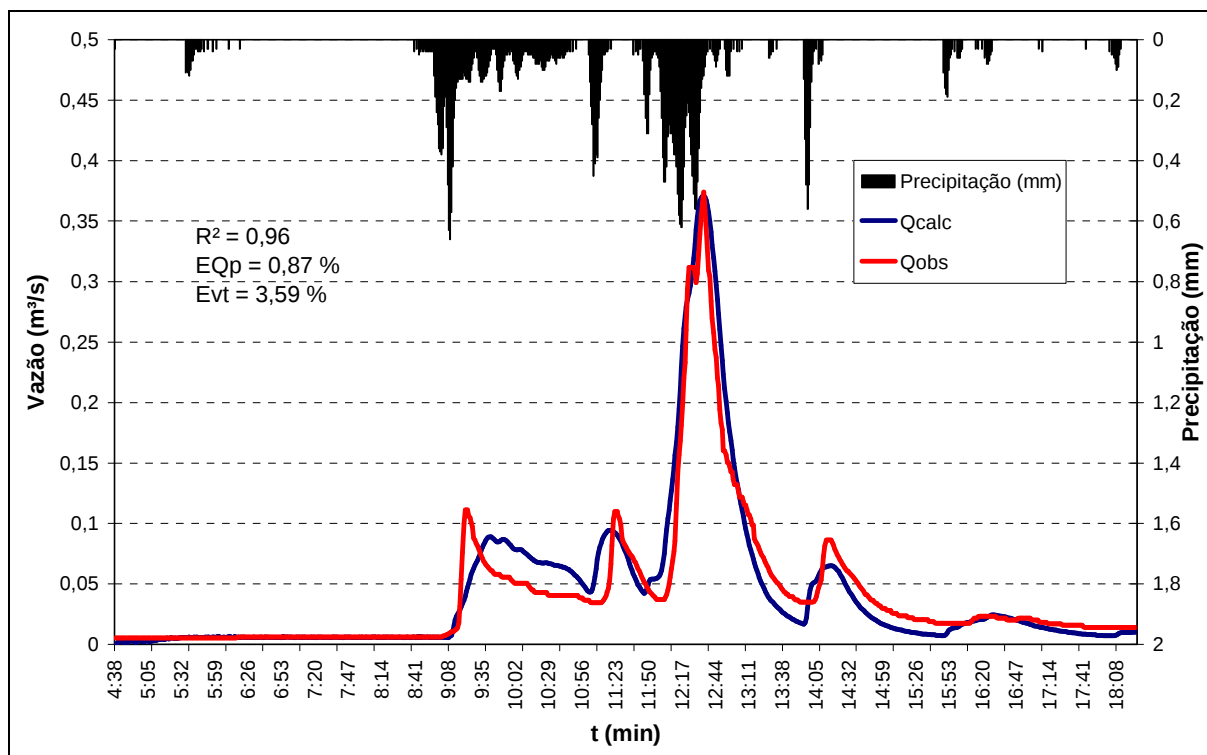


Figura 75 – Evento do dia 12/11/2003 - condição de escoamento B

A partir destes resultados, é possível fazer uma análise para cada um dos parâmetros envolvidos na simulação, principalmente em relação aos valores médios obtidos.

Nos itens a seguir, são feitas observações referentes a cada um dos parâmetros, levando em conta a condição de escoamento.

Tabela 24 – Parâmetros obtidos na calibração do modelo para bacia STP com discretização detalhada

Condição do Escoamento	Evento	(ni)	(np)	(di)	(dp)	(I0)	(Ib)	(k)	(nl)	(nr)	(nc)	R	EQp (%)	EVt (%)
A	8/7/2003	0,02	0,5	2,4	3,8	60	3,75	0,0055	0,06	0,06	0,24	0,97	2,31	7,97
A	16/11/2003	0,04	0,53	2	4	120	5,3	0,0055	0,07	0,07	0,23	0,88	6,77	9,34
A	8/12/2003	0,05	0,49	3,6	4,5	95	6,2	0,0047	0,06	0,06	0,22	0,88	1,52	2,55
A	15/12/2003	0,06	0,85	3	8	60	3	0,005	0,07	0,07	0,14	0,88	19,99	3,76
	Média	0,043	0,593	2,75	5,08	83,8	4,56	0,0052	0,065	0,065	0,208	0,9	7,65	5,91
B	22/5/2003	0,065	0,47	4	8,4	100	9	0,005	0,05	0,05	0,16	0,98	2,47	2,61
B	1/6/2003	0,72	0,45	1,3	2	60	7	0,005	0,05	0,05	0,06	0,93	0,83	14,3
B	24/7/2003	0,04	0,15	1,05	2	50	1,1	0,005	0,06	0,06	0,22	0,98	0,7	0,3
B	12/11/2003	0,06	0,32	5,8	6,2	70	6,7	0,005	0,06	0,06	0,21	0,96	0,87	3,59
	Média	0,221	0,348	3,04	4,65	70	5,95	0,005	0,055	0,055	0,163	0,96	1,22	5,2

Onde: np e ni são o coeficiente de rugosidade de Manning das áreas permeáveis e impermeáveis; dp e di são a altura de armazenamento das áreas permeáveis e impermeáveis; os parâmetros de infiltração de Horton onde I0 é a taxa de infiltração inicial máxima (mm/h), Ib é a taxa de infiltração mínima (mm/h) e k é a constante de decaimento (s-1); nc é o coeficiente de rugosidade de Manning no leito do canal; nr é o coeficiente de rugosidade de Manning na margem direita do canal; nl é o coeficiente de rugosidade de Manning na margem esquerda do canal; R é o coeficiente de correlação entre os valores de vazões observados e calculados; EQp é o erro entre a vazão de pico observada e calculada; e EVt é o erro entre o volume total escoado observado e calculado.

Assim como na bacia Alto da Colina II, na bacia STP os eventos foram divididos em dois grupos, e para se observar e validar os resultados obtidos, os resultados foram separados em grupos de parâmetros de acordo com o valor médio obtido.

Da mesma forma foram obtidos três grupos, sendo dois referentes aos valores médios encontrados para os eventos classificados nos grupos A e B, e o terceiro com os valores médios obtidos para todos os eventos.

Os valores dos parâmetros obtidos para cada grupo podem ser vistos na tabela a seguir, e na tabela 26 podem ser observados os resultados obtidos para as simulações utilizando os conjuntos de valores médios encontrados para cada grupo na calibração.

Tabela 25 – Conjunto dos valores médios dos parâmetros obtidos para cada grupo da bacia STP durante as calibrações

Conjunto	(ni)	(np)	(di)	(dp)	(lo)	(lb)	(k)	(nl)	(nr)	(nc)
Condição A	0,043	0,593	2,75	5,08	83,8	4,56	0,0052	0,065	0,065	0,208
Condição B	0,221	0,348	3,04	4,65	70,0	5,95	0,0050	0,055	0,055	0,163
Média Geral	0,132	0,470	2,89	4,86	76,9	5,26	0,0051	0,060	0,060	0,185

Tabela 26 – Resultados obtidos para simulações utilizando os conjuntos de parâmetros médios obtidos para a bacia STP

Evento	Conj. Condição A			Conj. Condição B			Conj. Média Geral		
	R	EQp(%)	EVt (%)	R	EQp(%)	EVt (%)	R	EQp(%)	EVt (%)
08/07/03	0,93	6,30	53,13	0,94	52,68	56,22	0,94	32,37	54,80
16/11/03	0,88	19,82	5,70	0,86	19,96	19,41	0,87	12,75	6,35
08/12/03	0,86	25,40	27,37	0,85	14,55	7,49	0,85	20,61	17,97
15/12/03	0,85	15,70	33,93	0,84	21,62	36,80	0,84	20,04	27,05
Média	0,88	16,81	30,03	0,87	27,20	29,98	0,88	21,44	26,55
22/05/03	0,93	27,39	38,23	0,87	45,02	45,25	0,88	37,96	44,52
01/06/03	0,89	26,78	13,13	0,91	16,18	9,13	0,91	21,76	10,62
24/07/03	0,93	43,56	40,47	0,87	85,76	47,54	0,91	73,73	43,65
12/11/03	0,96	7,26	16,59	0,95	22,85	19,51	0,96	17,01	19,93
Média	0,93	26,25	27,10	0,90	42,45	30,36	0,91	37,61	29,68
M. Geral	0,90	21,53	28,57	0,89	34,83	30,17	0,90	29,53	28,11

Na bacia Sitio do Tio Pedro constatamos que a classificação dos eventos em função do volume total escoado pode não ter sido a melhor forma de agrupar os eventos, uma vez que a realização das simulações utilizando os valores médios encontrados para o próprio grupo não apresentou resultados muito diferentes do que os realizados com o conjunto de parâmetros médios obtido para o outro grupo ou para o conjunto dos valores médios de todos os eventos.

Para os eventos classificados na condição de escoamento A, os melhores resultados foram obtidos quando as simulações foram feitas utilizando o conjunto de parâmetros médios obtidos para o próprio grupo. Apesar disso, quando a simulação foi feita com os conjuntos de parâmetros obtidos para o outro grupo, e para a média geral os resultados obtidos não foram muito diferentes.

No caso dos eventos classificados na condição de escoamento B, os melhores resultados foram obtidos quando as simulações foram feitas utilizando o conjunto de parâmetros médios obtidos para o conjunto A. Também para as simulações utilizando o conjunto de parâmetros obtido para a média geral de todos os eventos os resultados foram melhores do que para o conjunto de parâmetros do próprio grupo.

Apesar do comportamento um pouco diferente do esperado nas simulações para os eventos do grupo B, com os conjuntos de parâmetros de cada grupo, os resultados apresentados para as simulações utilizando o conjunto de parâmetros obtidos pela média geral de todos os eventos apresentaram resultados considerados bons.

5.5 Análise dos parâmetros obtidos na calibração do módulo Runoff

5.5.1 Coeficiente de rugosidade de Manning para as sub-bacias

O coeficiente de rugosidade de Manning é um parâmetro bastante difícil de ser analisado, devido à grande faixa de valores que ele pode abranger, uma vez que para cada tipo de cobertura do solo ele apresenta uma faixa diferente de valores.

Apesar da divisão em sub-bacias ter sido feita levando em conta também o tipo de uso e ocupação do solo, algumas sub-bacias apresentam parte de suas áreas

urbanas e partes rurais, o que dificulta bastante a adoção de valores representativos da área como um todo.

Em áreas urbanas, onde a heterogeneidade da cobertura do solo é muito grande, a dificuldade na atribuição de um valor específico e representativo de uma determinada área é bem maior.

- Bacia Alto da Colina II

Nas áreas impermeáveis, os valores médios encontrados nas simulações para o coeficiente de rugosidade de Manning para a bacia com discretização detalhada, foram 0,025 e 0,044 para as condições de escoamento A e B, respectivamente.

Para o coeficiente de rugosidade de Manning nas áreas permeáveis, os valores médios encontrados na simulação foram de 0,126 e 0,210 para as condições de escoamento A e B, respectivamente.

Nota-se que os menores valores, para o coeficiente de rugosidade, foram obtidos na condição de escoamento A. Esta condição representa os eventos de alta intensidade, que possivelmente apresentaram inundações na bacia.

- Bacia Alto da Colina I

Nas áreas impermeáveis, os valores médios encontrados nas simulações para o coeficiente de rugosidade de Manning foi de 0,02, e nas áreas permeáveis foi de 0,165.

A variação no coeficiente de rugosidade nas áreas impermeáveis praticamente não apresentou alterações nos hidrogramas de saída, uma vez que a predominância na bacia alto da Colina I é totalmente de áreas impermeáveis, sendo desconsiderada a simulação na bacia Alto da Colina II, por isso a homogeneidade nos valores finais desses parâmetros nas simulações.

- Bacia Sítio do Tio Pedro

Nas áreas impermeáveis, os valores médios encontrados nas simulações para o coeficiente de rugosidade de Manning para a bacia com discretização detalhada, foram 0,043 e 0,221 para as condições de escoamento A e B, respectivamente.

Para o coeficiente de rugosidade de Manning nas áreas permeáveis, os valores médios encontrados na simulação foram de 0,593 e 0,348 para as condições de escoamento A e B, respectivamente.

- Análise e comparação dos resultados

Os valores obtidos nas duas bacias, para os coeficientes de rugosidade de Manning, mostraram-se dentro das faixas de valores encontradas na bibliografia, (James et al, 2003).

As variações evidenciadas nos valores dos coeficientes de rugosidade na bacia para as diferentes condições de escoamento podem estar relacionadas com a lâmina de escoamento, o caminho do fluxo do escoamento e a existência ou não de áreas de inundação.

Durante o processo de simulação foi possível verificar a influência direta dos valores de rugosidade das sub-bacias no volume total escoado e na vazão de pico, porém sem muita influência no tempo de pico.

Quando se trabalha com valores mais baixos de rugosidade, percebe-se uma maior influência na resposta dada pelo modelo quando se fazem variações de mesma proporção nestes parâmetros.

Garcia (2005) encontrou valores médios para o coeficiente de rugosidade de Manning em sub-bacias, para uma bacia urbana, utilizando o modelo SWMM, na ordem de 0,02 e 0,025 para eventos de alta e baixa intensidade respectivamente nas áreas impermeáveis, e 0,027 e 0,417 para as áreas permeáveis, também em eventos de alta e baixa intensidade, respectivamente.

Nota-se uma diferença maior entre os valores obtidos para áreas permeáveis, na condição de escoamento de baixa intensidade, o que pode ser explicado pelo fato da bacia estudada por ele ser quase que totalmente urbana, onde esse valor não influenciou a calibração, o que não acontece nas bacias em estudo que apresentam grande porcentagem de áreas rurais com grande influência desse fator.

Nas figuras 76, 77 e 78 podem ser vistas as variações do coeficiente de rugosidade de Manning nas sub-bacias obtido na calibração para as áreas permeáveis e impermeáveis em função do volume total escoado.

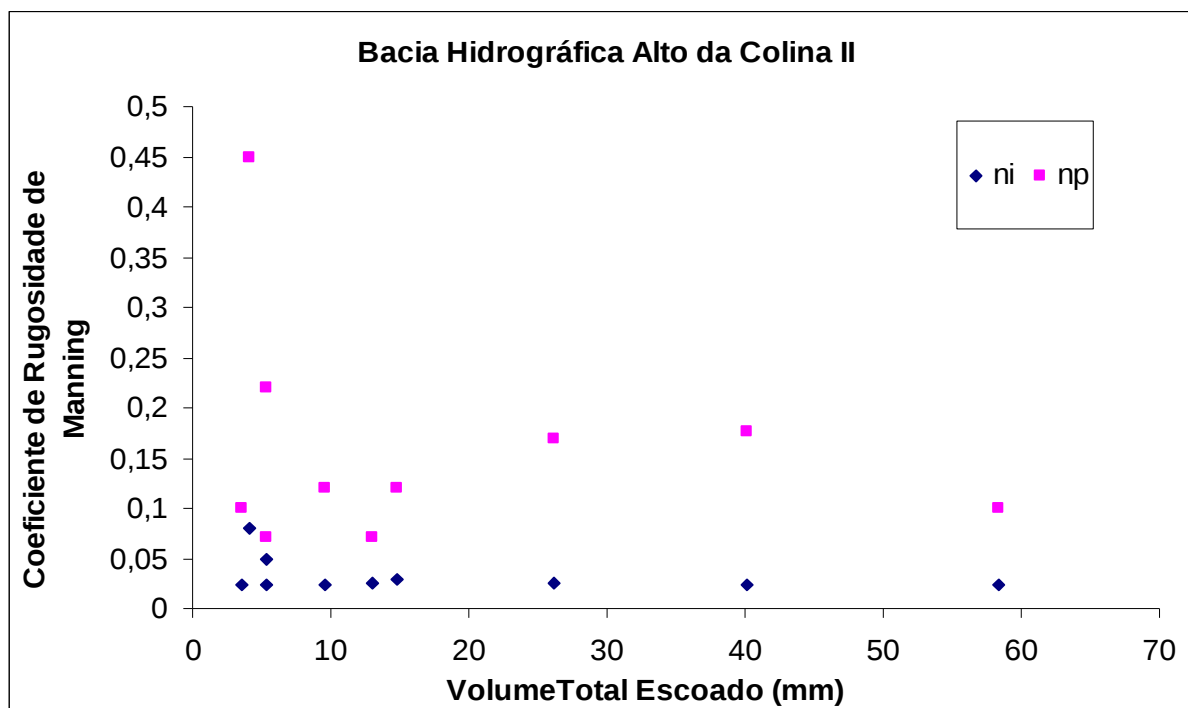


Figura 76 – Variação do coeficiente de rugosidade de Manning em função da precipitação total do evento – AC II

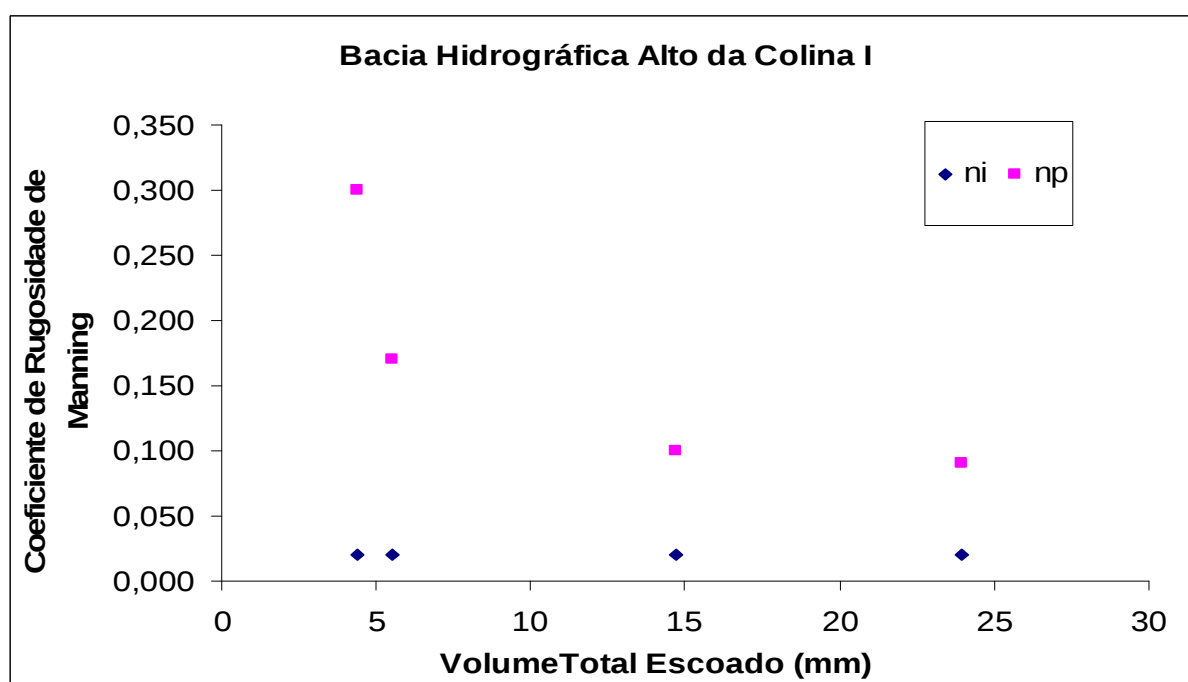


Figura 77 – Variação do coeficiente de rugosidade de Manning em função da precipitação total do evento – ACI

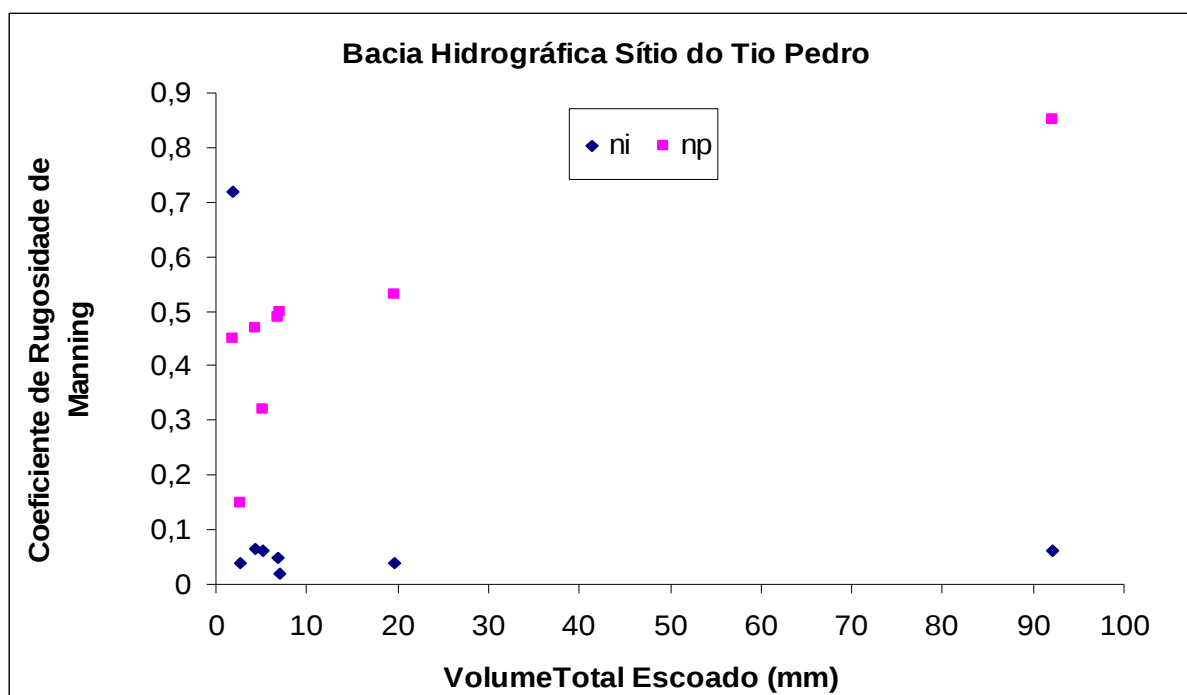


Figura 78 – Variação do coeficiente de rugosidade de Manning em função da precipitação total do evento – STP

5.5.2 Armazenamento em depressões

O armazenamento em depressões está relacionado com as perdas iniciais ocorridas pela detenção da água sobre a superfície, em especial por obras hidráulicas realizadas pelo homem, ou até mesmo represas naturais formadas ao longo da bacia.

Os valores obtidos para os parâmetros de armazenamento em depressão na calibração também foram divididos em dois conjuntos, levando em conta as condições de escoamento.

- Bacia Alto da Colina II

Nas áreas impermeáveis, os valores médios encontrados foram 2,77 mm e 3,75 mm para as condições de escoamento A e B, respectivamente.

Já para as áreas permeáveis, os valores médios encontrados na simulação foram de 1,88 mm e 3,90 mm para as condições de escoamento A e B, respectivamente.

- Bacia Alto da Colina I

Nas áreas impermeáveis, os valores médios encontrados foram 5,18 mm e para as áreas permeáveis, os valores médios encontrados na simulação foram de 4,88 mm.

Estes valores mais elevados em relação aos encontrados para as outras bacias podem ser explicados pelo fato de que nas condições reais, a atenuação na onda de cheia é dada em função das tubulações, e como na discretização adotada as tubulações não foram representadas, outros parâmetros deverão fazer este papel, e o armazenamento em depressões é um deles.

- Sítio do Tio Pedro

Nas áreas impermeáveis, os valores médios encontrados foram 2,75 mm e 3,04 mm para as condições de escoamento A e B, respectivamente.

Já para as áreas permeáveis, os valores médios encontrados na simulação foram de 5,08 mm e 4,65 mm para as condições de escoamento A e B, respectivamente.

- Análise e comparação dos resultados

Keifer (1960 apud JAMES et al., 2003) encontrou valores de 1,6 mm e 6,4 mm para o armazenamento nas áreas impermeáveis e permeáveis respectivamente. Selvalingam et al. (1987 apud GARCIA, 2005) encontraram valores de 2,5 mm e 7,5 mm para o armazenamento nas áreas impermeáveis e permeáveis, respectivamente.

Garcia (2005) encontrou valores de 4,5 mm e 1,5 mm para o armazenamento nas áreas impermeáveis para as condições de escoamento de alta e baixa intensidade respectivamente, e de 1,5 mm e 2,8 mm para o armazenamento nas áreas permeáveis.

Nas figuras 79, 80 e 81 pode ser visualizada a variação da altura do armazenamento para as áreas permeáveis e impermeáveis com o volume total escoado, de cada evento para cada uma das bacias em estudo.

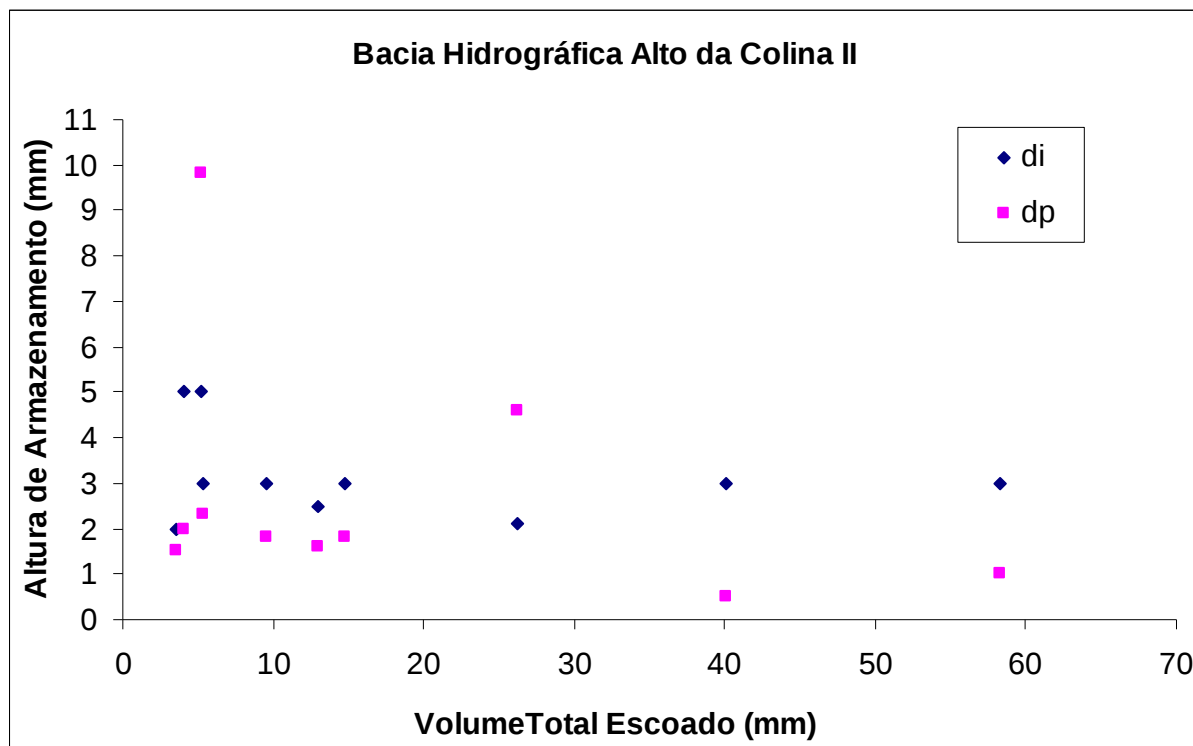


Figura 79 – Variação do armazenamento em função da precipitação total do evento – AC II

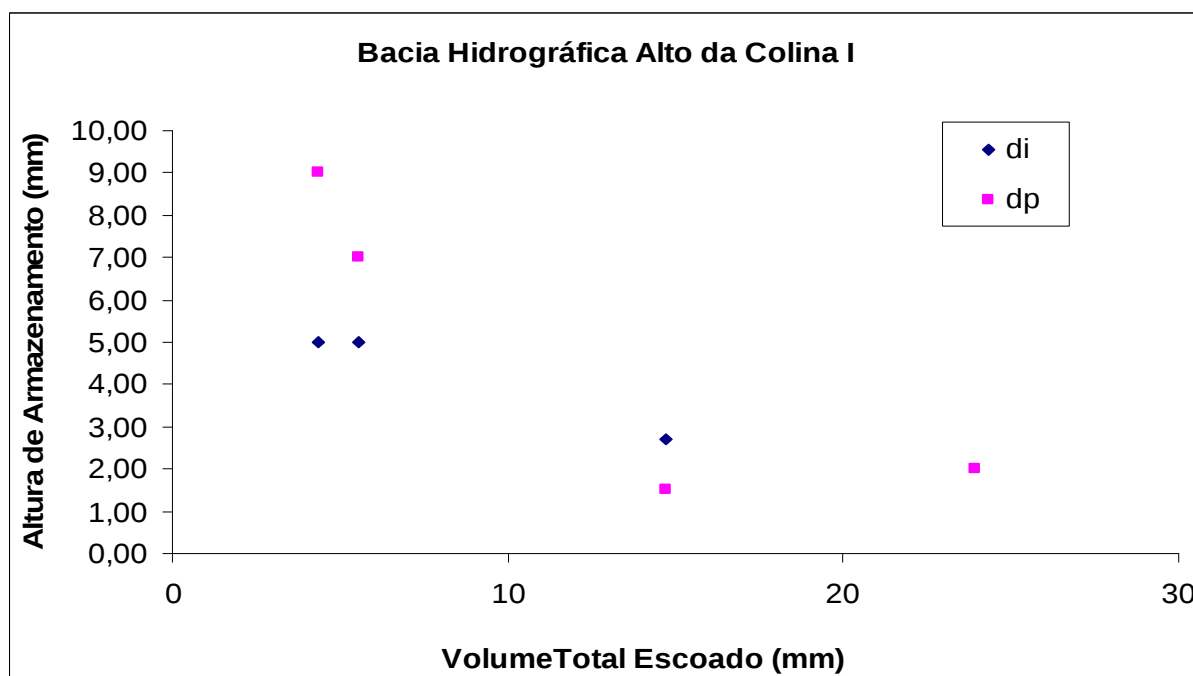


Figura 80 – Variação do armazenamento em função da precipitação total do evento – AC I

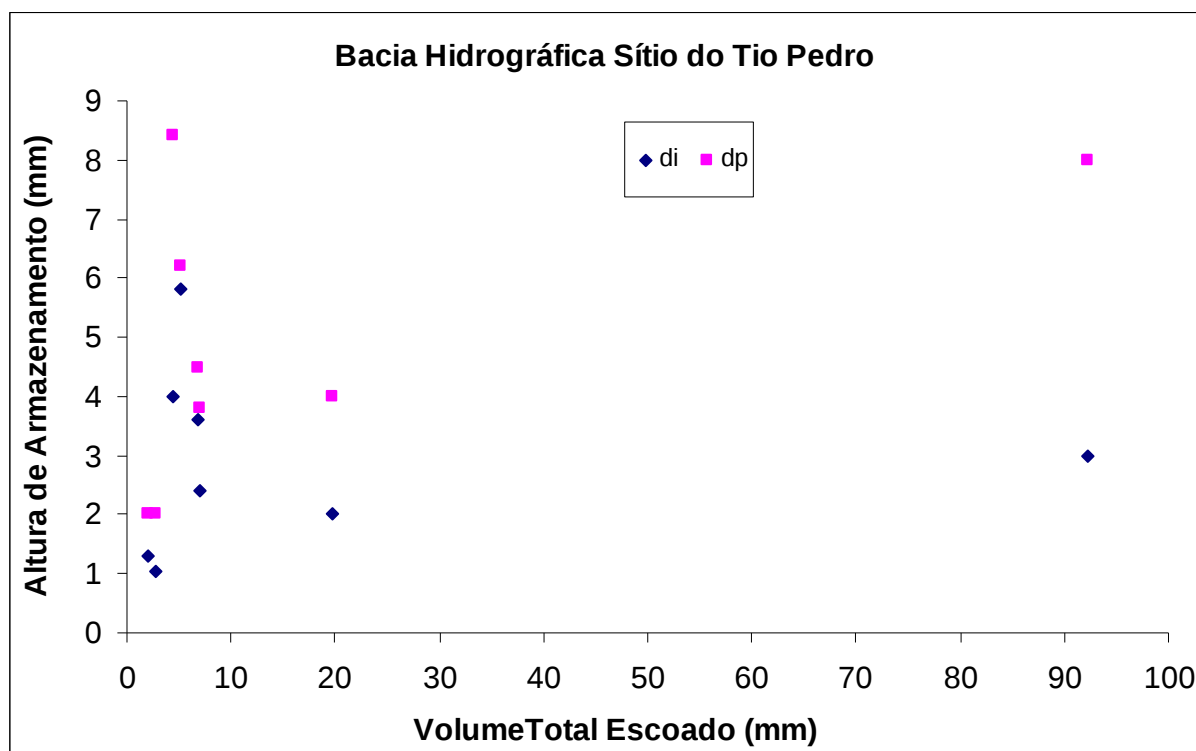


Figura 81 – Variação do armazenamento em função da precipitação total do evento – STP

O armazenamento inicial teve um comportamento crescente com o aumento do volume total precipitado. Os valores dos parâmetros de armazenamento têm como função o ajuste do volume de escoamento e também da vazão de pico, tendo seu valor obtido na calibração. Os resultados encontrados mostram tendência a aumentar o armazenamento para eventos com alta intensidade de precipitação, os quais são responsáveis pelas condições de escoamento A e B.

5.5.3 Parâmetros de infiltração

Foram feitos testes utilizando as equações de infiltração de Horton e de Green-Ampt, uma vez que o modelo permite optar pelo uso de uma ou de outra.

Na equação de infiltração de Horton os parâmetros calibrados foram: I_0 que é a taxa de infiltração inicial máxima (mm/h), I_b que é a taxa de infiltração mínima (mm/h) e k que é a constante de decaimento (s^{-1}).

Na equação de Infiltração de Green-Ampt os parâmetros calibrados são: Ψ que é sucção capilar média (mm), k_z que é condutividade hidráulica de saturação do solo (mm/h) e θ_i que é o déficit inicial de umidade (fração).

Foram escolhidos dois eventos da bacia Alto da Colina II e dois da bacia Sítio do Tio Pedro para comparar os resultados finais da simulação. Nas tabelas a seguir podem ser vistos os resultados finais dos parâmetros calibrados para as duas equações e também os resultados finais das calibrações, em termos de ajustes em função do coeficiente de correlação, do erro médio na vazão de pico e no volume total escoado. Uma visualização dos resultados finais das calibrações pode ser vista nas figuras 82 a 85.

Tabela 27 – Parâmetros obtidos nas calibrações das equações de infiltração

Evento	Horton			Green Ampt		
	(I_o) mm/h	(I_b) mm/h	(k) s-1	(Ψ) mm	(k_z) mm/h	(θ_i)
31/1/2002-AC	268,0	4,7	0,0046	92,0	4,6	0,10
11/3/2002-AC	110,0	7,7	0,0050	84,0	3,0	0,24
Média	189,0	6,2	0,0048	88,0	3,8	0,17
24/7/2003-STP	50,0	1,1	0,0050	52,0	0,9	0,10
8/12/2003-STP	95,0	6,2	0,0047	95,4	4,0	0,10
Média	72,5	3,7	0,0049	73,7	2,5	0,10

Tabela 28 – Ajustes obtidos nas calibrações das equações de infiltração

Evento	Horton			Green Ampt		
	R	$E Qp$	$E Vt$	R	$E Qp$	$E Vt$
31/1/2002-AC	0,96	1,20	0,67	0,91	3,36	11,83
11/3/2002-AC	0,88	0,92	1,23	0,88	1,98	3,57
Média	0,92	1,06	0,95	0,89	2,67	7,70
24/7/2003-STP	0,98	0,70	0,30	0,98	1,99	4,42
8/12/2003-STP	0,88	1,52	2,55	0,87	0,68	0,70
Média	0,93	1,11	1,42	0,93	1,33	2,56

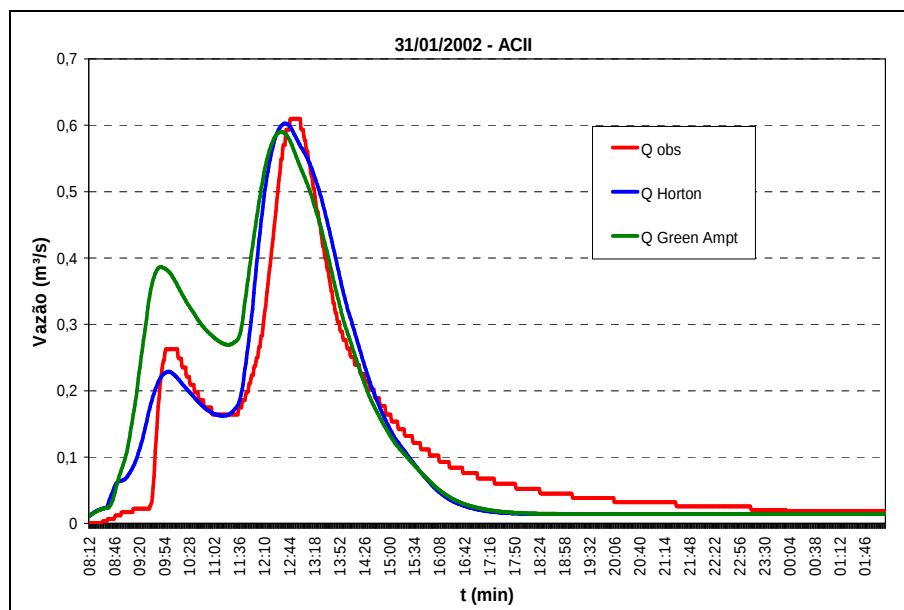


Figura 82 – Calibração do evento do dia 31/01/2002 na bacia Alto da Colina II para comparação entre as equações de Infiltração

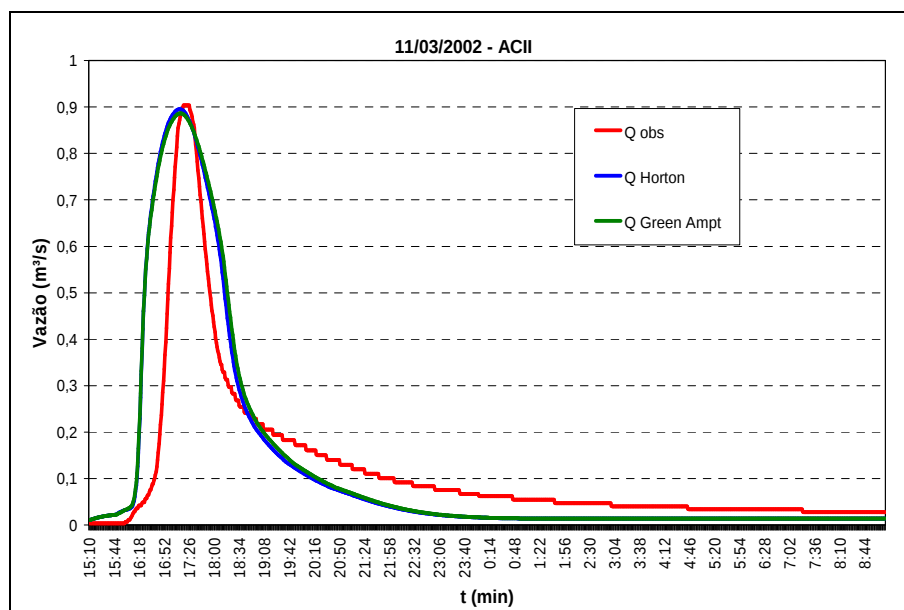


Figura 83 – Calibração do evento do dia 11/03/2002 na bacia Alto da Colina II para comparação entre as equações de Infiltração

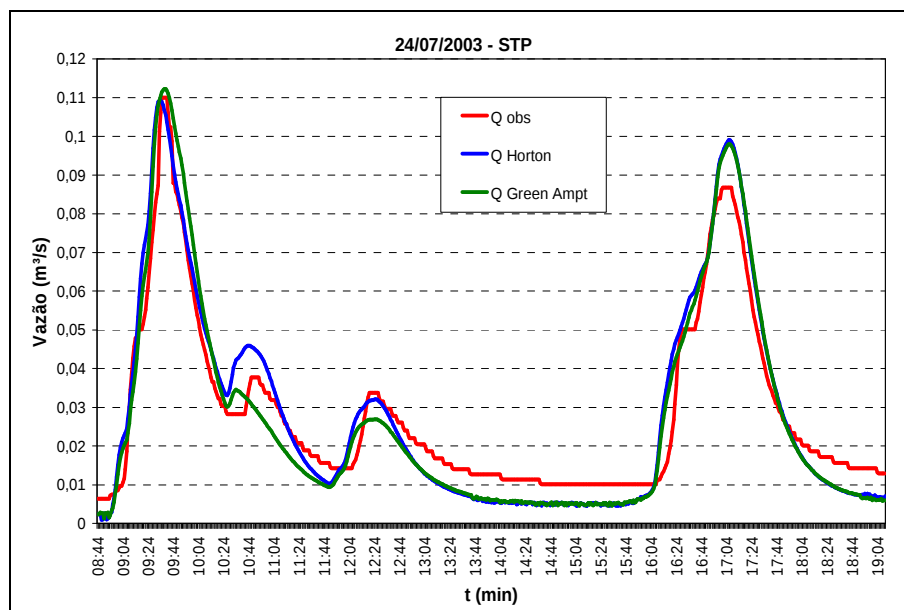


Figura 84 – Calibração do evento do dia 24/07/2003 na bacia Sítio do Tio Pedro para comparação entre as equações de Infiltração

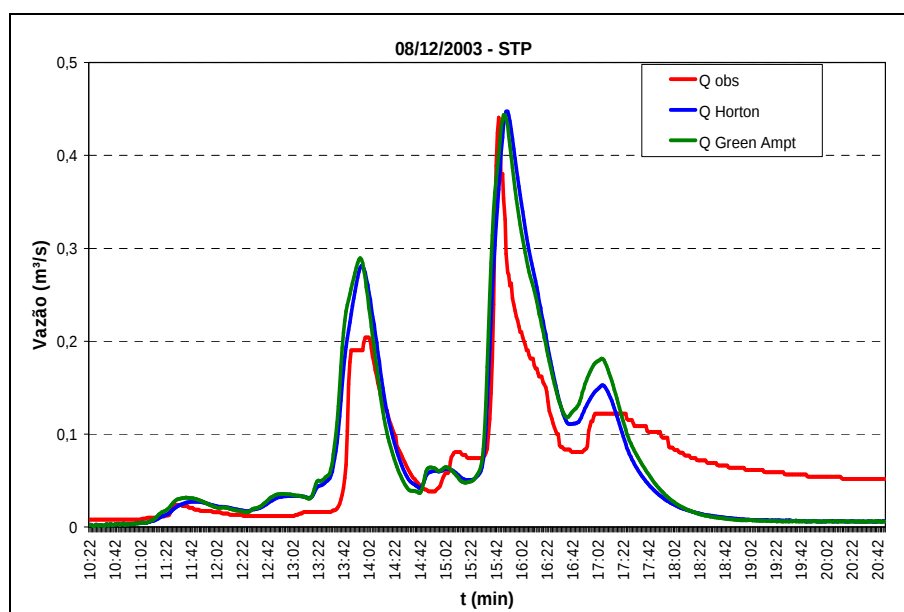


Figura 85 – Calibração do evento do dia 08/12/2003 na bacia Alto da Colina II para comparação entre as equações de Infiltração

A equação adotada para simular a infiltração no modelo foi a equação de infiltração de Horton, onde os parâmetros de infiltração calibrados foram I_0 , I_b e a constante de decaimento k , necessários para a resolução da equação.

O parâmetro I_0 , que representa a infiltração inicial, apresentou valores variáveis na bacia Alto da Colina, e valores mais homogêneos na bacia Sítio do Tio Pedro.

- Bacia Alto da Colina II

Na condição de escoamento A, o valor médio de I_0 encontrado foi de 64,2 mm/h, e para a condição de escoamento B, o valor médio encontrado foi de 172,0 mm/h.

- Bacia Alto da Colina I

Apesar de ser bastante variável, o valor médio de I_0 encontrado foi de 96 mm/h, bem próximo ao valor médio encontrado para as demais bacias.

- Bacia Sitio do Tio Pedro

Na condição de escoamento A, o valor médio de I_0 encontrado foi de 83,8 mm/h, e para a condição de escoamento B, o valor médio encontrado foi de 70,0 mm/h.

- Análise e comparação dos resultados

Paiva et al (2004) realizaram ensaios de campo na bacia Alto da Colina, e obtiveram valores bastante variáveis, porém com o valor médio encontrado igual a 116,1 mm/h, semelhante ao encontrado para as bacias Alto da Colina I e II.

O parâmetro de infiltração I_b , que representa a taxa de infiltração mínima na bacia, e que pode estar relacionado com o tipo de solo existente na bacia, apresentou valores dispersos nas três bacias.

- Bacia Alto da Colina II

Apesar dos valores serem dispersos os valores médios de I_b encontrados para as duas condições de escoamento foram bastante semelhantes, de 1,78 mm/h e 7,68 mm/h para as condições de escoamento A e B respectivamente.

- Bacia Alto da Colina I

Os valores encontrados não apresentaram uma boa correlação, e o valor médio ficou em torno de 8,4 mm/h.

- Bacia Sitio do Tio Pedro

Nesta bacia, os valores encontrados para I_b também foram dispersos nas duas condições de escoamento, porém os valores médios nas duas condições de escoamento foram bastante parecidos, sendo igual a 4,56 mm/h para a condição de escoamento A e 5,95 mm/h para a condição de escoamento B.

- Análise e comparação dos resultados

Meller (2004) encontrou em sua calibração utilizando o modelo MOUSE para a bacia Alto da Colina II uma variação de I_b entre 1,0 mm/h e 9,0 mm/h, sendo o valor

médio de I_b encontrado igual a 6,3 mm/h, o que se aproxima bastante dos valores obtidos neste trabalho.

Nos ensaios realizados por Paiva et al (2004), os valores encontrados foram bastante variáveis, ficando entre 1,4 mm/h e 43,5 mm/h, sendo o valor médio de 13 mm/h.

Garcia (2005) encontrou valores próximos aos encontrados nesta pesquisa, quando simulou uma bacia urbana, onde os valores encontrados na simulação para I_b variaram de 1,7 a 7 mm/h.

Musgrave (1955 apud JAMES et al., 2003) apresentou valores de I_b para solos de diferentes características hidrológicas, solos bem drenados, como a areia, e solos pobremente drenados, como os argilosos. Os valores encontrados, por Musgrave, foram de 11,4 e 1,17 mm/h, para solos bem drenados e solos podremente drenados, respectivamente.

As figuras 86, 87 e 88 mostram a variação do parâmetro I_b com o volume total escoado em cada evento. Apesar de serem bastante dispersos, os valores de I_b apresentaram leve decréscimo com a elevação do total precipitado, e na bacia Alto da Colina II, é possível até o ajuste de uma curva de correlação.

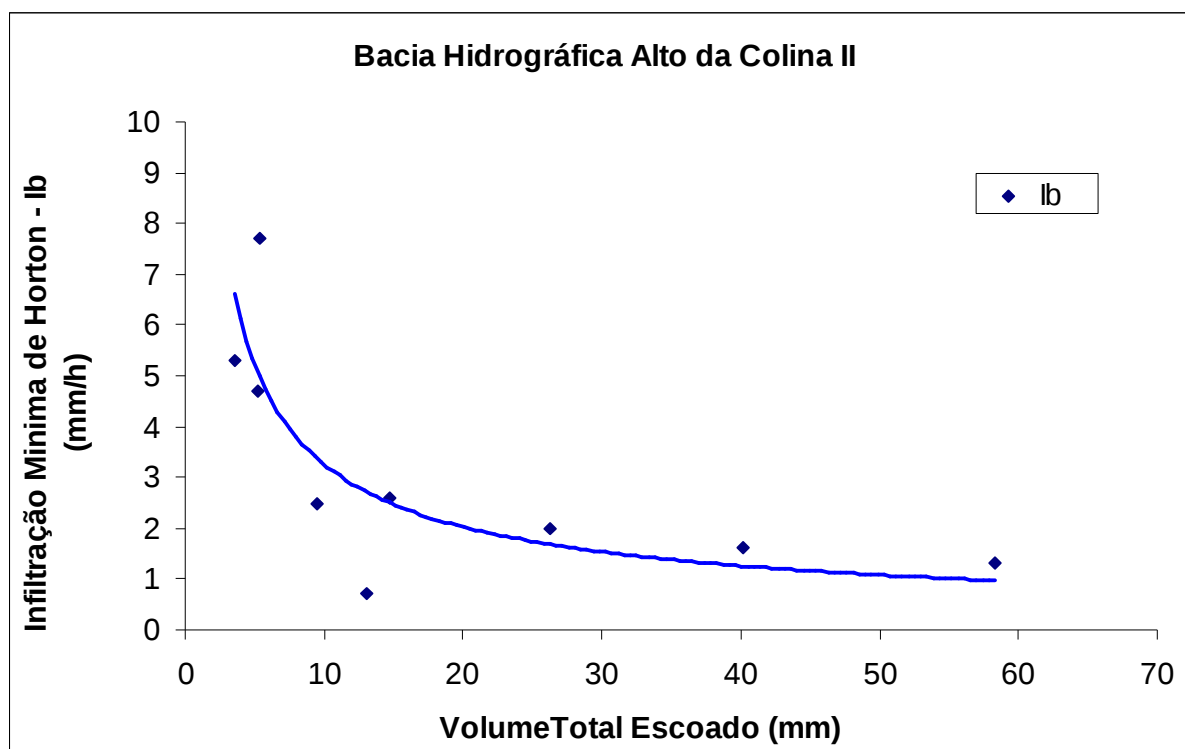


Figura 86 – Variação do parâmetro I_b em função do volume total escoado – ACII

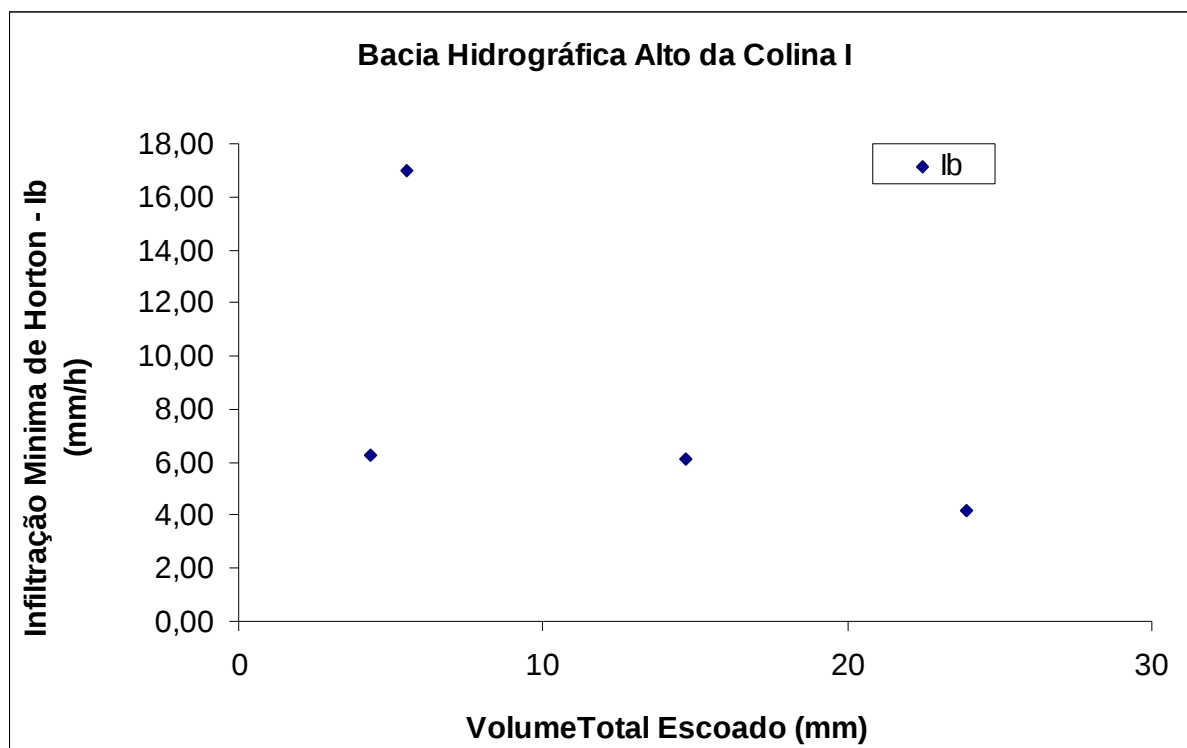


Figura 87 – Variação do parâmetro I_b em função do volume total escoado – AC I

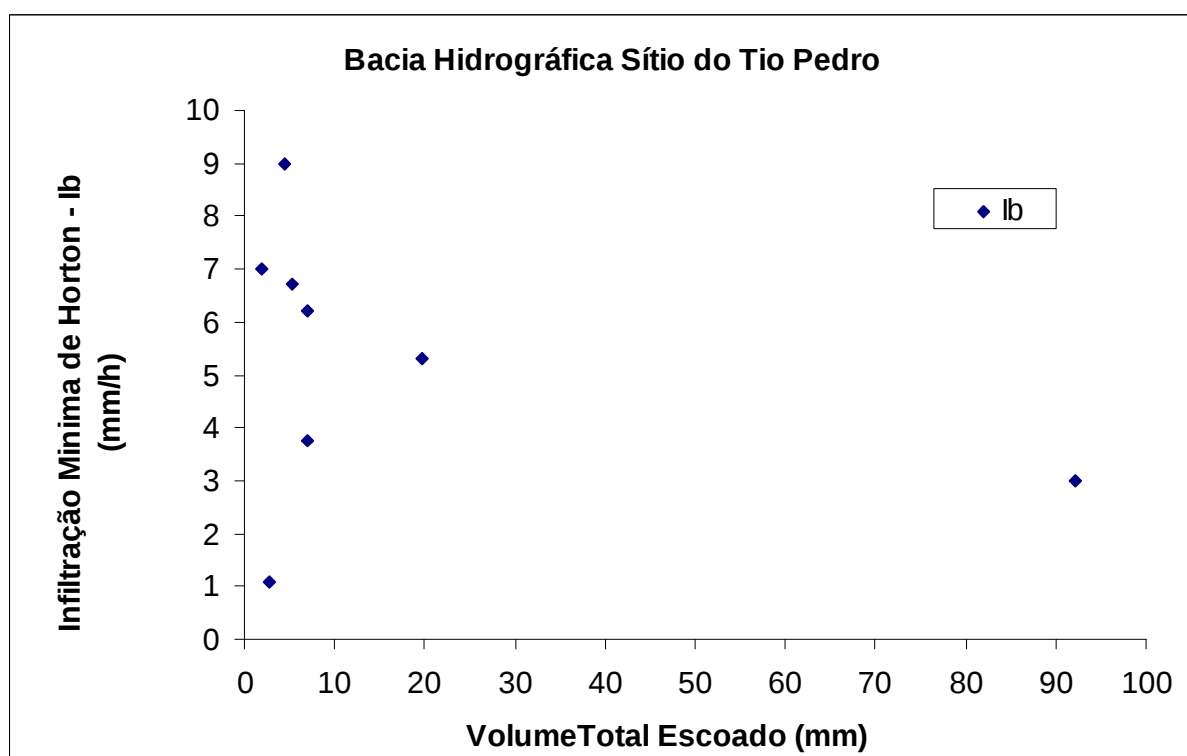


Figura 88 – Variação do parâmetro I_b em função do volume total escoado - STP

O valor da constante de decaimento (k) da equação de Horton apresentou uma pequena variação em função do total precipitado, porém sem fugir muito aos valores médios encontrados:

- Bacia Alto da Colina II

Nesta bacia os valores encontrados para k foram bastante homogêneos nas duas condições de escoamento, ficando o valor médio em $0,0059 \text{ s}^{-1}$ e $0,0045 \text{ s}^{-1}$ para as condições de escoamento A e B respectivamente.

- Bacia Alto da Colina I

Os valores encontrados para k se mantiveram constantes nesta bacia, uma vez que não apresentavam grande influência nos hidrogramas de saída ficando o valor médio em $0,005 \text{ s}^{-1}$.

- Bacia Sítio do Tio Pedro

Para esta bacia os valores encontrados para k , foram bastante homogêneos, com valores inferiores aos encontrados na Bacia Alto da Colina II, sendo os valores médios iguais a $0,0052 \text{ s}^{-1}$ e $0,0050 \text{ s}^{-1}$ para as condições de escoamento A e B respectivamente.

- Análise e comparação dos resultados

Os valores iniciais de k foram adotados baseados nos valores encontrados por Paiva et al (2004) na Bacia Hidrográfica Alto da Colina, onde o valor médio encontrado foi igual a $0,00558 \text{ s}^{-1}$.

5.6 Análise dos parâmetros obtidos na calibração do módulo Extran

O modelo apresenta o coeficiente de rugosidade de Manning para o canal em três parâmetros diferentes nl , nr e nc .

- Bacia Alto da Colina II

Para os coeficientes de rugosidade de Manning nas margens do canal, tanto esquerda (nl) como direita (nr), os valores permaneceram praticamente constantes, uma vez que não apresentaram grande influência nos hidrogramas de saída do modelo, com exceção do evento do dia 13/11/2001, onde o coeficiente de rugosidade na margem esquerda obtido foi 0,03, baixando a média dos eventos com condição de escoamento A para 0,06, sendo os demais todos mantidos constantes em 0,07.

Já o coeficiente de rugosidade no leito do canal (nc) apresentou variações em torno do valor médio, que foi de 0,123 para a condição de escoamento A e 0,153 para a condição de escoamento B.

- Bacia Alto da Colina I

Nesta bacia os parâmetros de rugosidade de Manning para o canal apresentaram influência significativa nos hidrogramas de resposta das simulações, portanto tiveram seus valores alterados durante a simulação.

Nas margens esquerda e direita do canal os coeficientes de rugosidade médios nl e nr foram de 0,058.

O coeficiente de rugosidade de Manning no leito do canal nc apresentou valores não muito variáveis em torno do valor médio que foi de 0,110.

- Bacia Sitio do Tio Pedro.

Nesta bacia, os parâmetros de rugosidade de Manning para o canal apresentaram maior influência nos hidrogramas de resposta das simulações, portanto tiveram seus valores alterados durante a simulação.

Nas margens esquerda e direita do canal os coeficientes de rugosidade médios nl e nr foram 0,065 e 0,055 para as condições de escoamento A e B respectivamente.

O coeficiente de rugosidade de Manning no leito do canal nc apresentou valores bastante dispersos tanto para as condições de escoamento A e B, porém, os valores médios nas duas situações foram bem próximos, sendo 0,208 para a condição de escoamento A e 0,163 para a condição de escoamento B.

- Análise e comparação dos resultados

O fato dos coeficiente de rugosidade de Manning no leito do canal ser maior que o das margens, se deve ao fato de que os leitos dos canais são bastante irregulares, com a presença de galhos e troncos mortos, e até mesmo lixo que obstruem o fluxo, e também pelo fato da grande maioria das margens serem de encostas sem presença de vegetação devido aos processos erosivos. Na bacia Sítio do Tio Pedro, ainda percebe-se um trecho de arroio onde a margem do canal é limitada por um lajeado com superfície lisa.

Nas margens o coeficiente de rugosidade teve uma leve tendência a decrescer com o aumento do volume total escoado na bacia Alto da Colina I e de crescer nas bacias Alto da Colina II e Sítio do Tio Pedro.

Já o coeficiente de rugosidade no leito do canal, teve comportamento bastante disperso em todas as bacias, sem apresentar grandes tendências.

As figuras 89, 90 e 91 mostram a variação do coeficiente de rugosidade para o leito do canal *nc* em função do volume total escoado em cada evento.

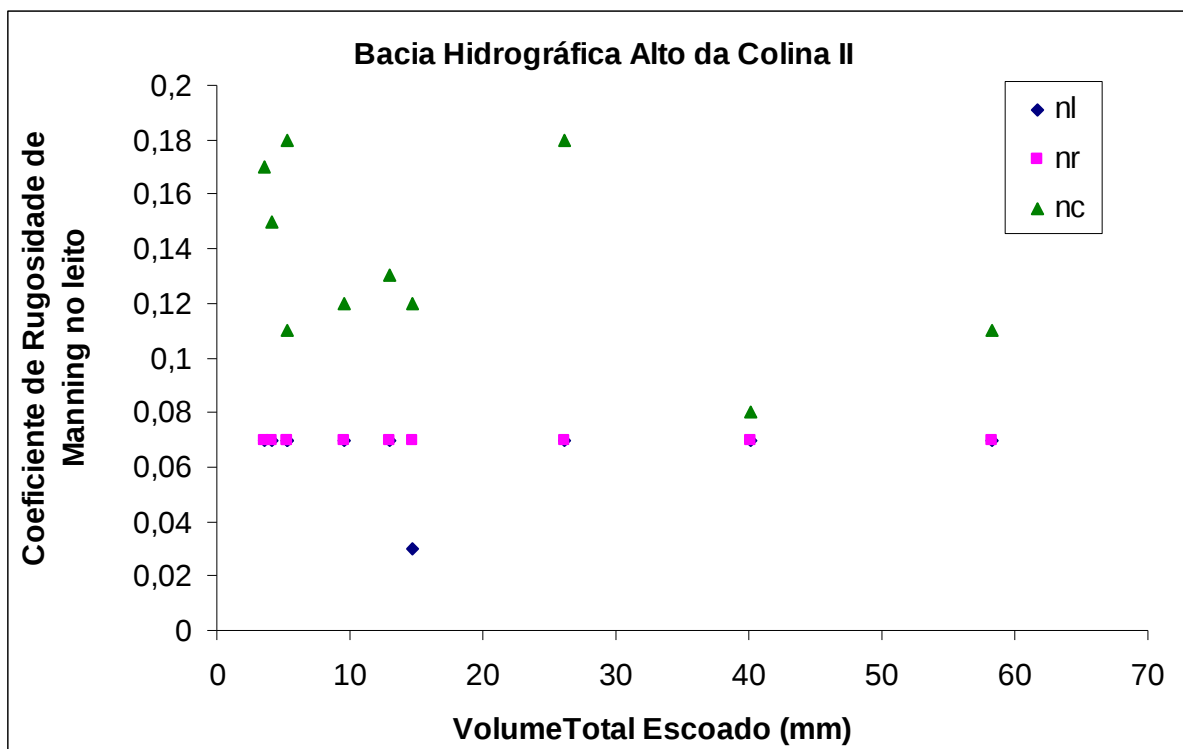


Figura 89 – Variação do coeficiente de rugosidade no canal em função do volume total escoado – AC II

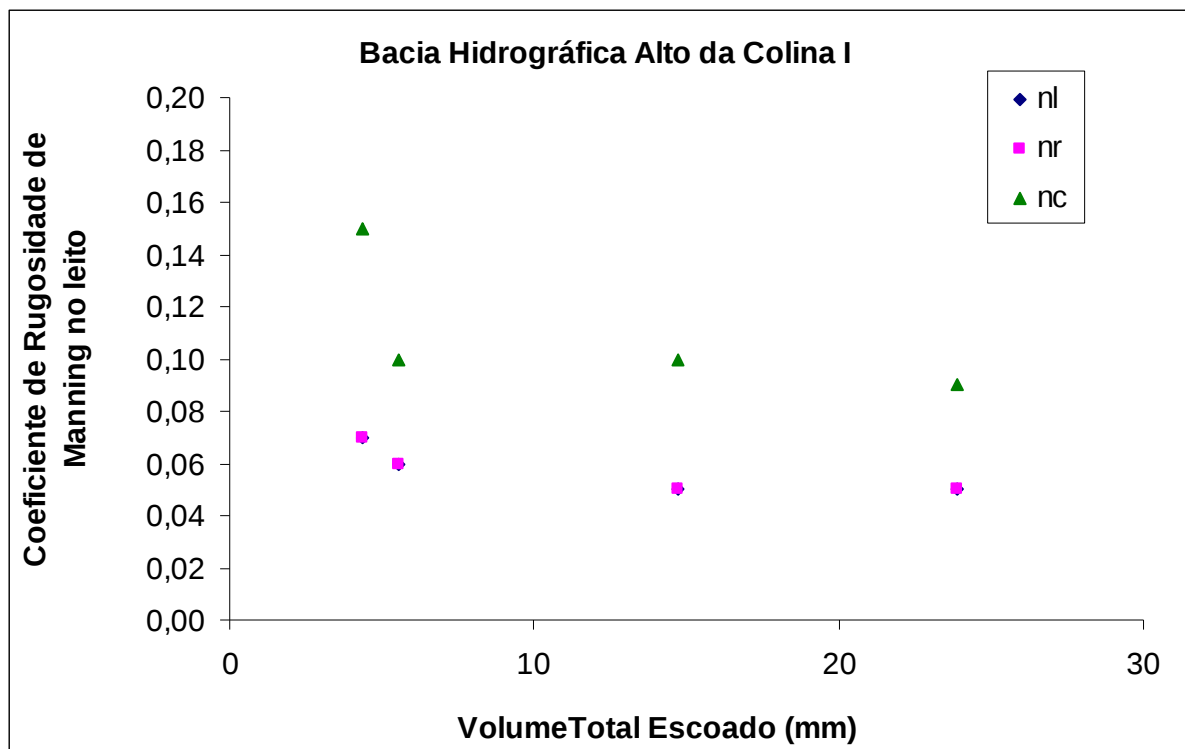


Figura 90 – Variação do coeficiente de rugosidade no canal em função do volume total escoado – AC I

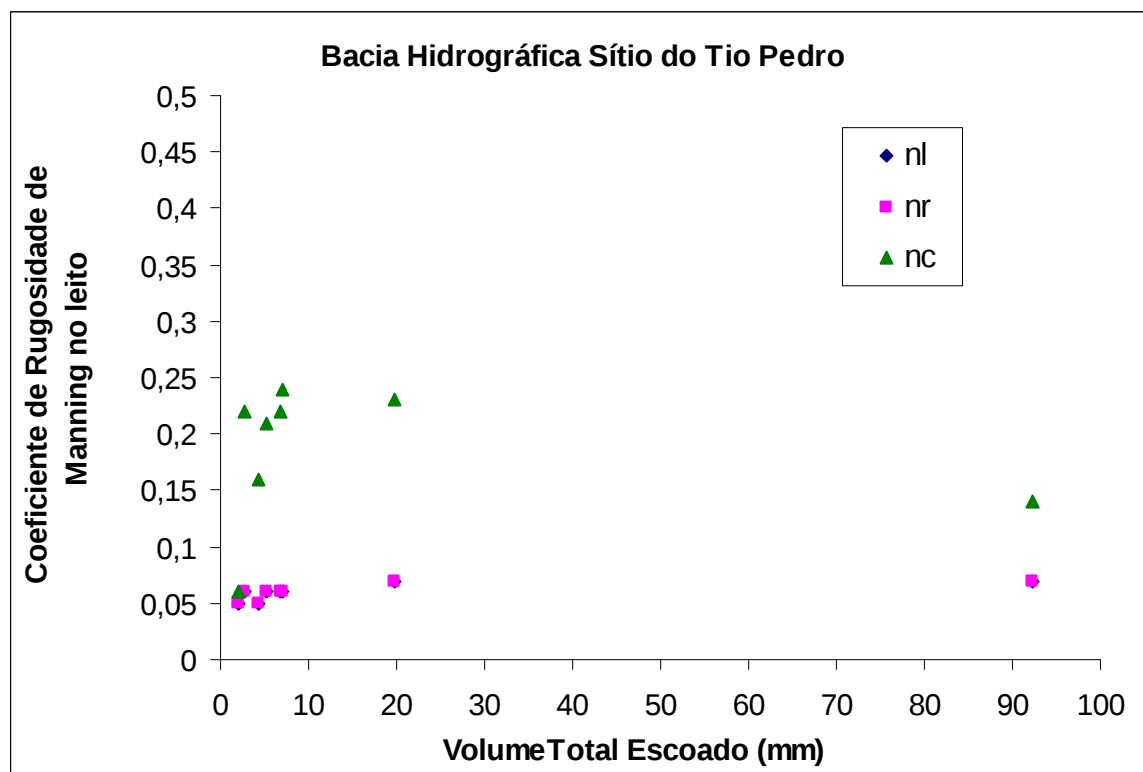


Figura 91 – Variação do coeficiente de rugosidade no canal em função do volume total escoado – STP

6 CONCLUSÕES

O objetivo desta pesquisa foi analisar os parâmetros de calibração do modelo SWMM como elemento para compreensão dos processos envolvidos na estimativa de cheias para as bacias hidrográficas urbanas Alto da Colina e Sítio do Tio Pedro, em Santa Maria-RS, através da variação dos parâmetros envolvidos na calibração, buscando a melhor representação dos processos envolvidos no escoamento pluvial.

A disponibilidade de dados na bacia Alto da Colina, referentes a duas estações fluviográficas existentes, favoreceu a simulação em duas etapas, sendo a primeira feita somente para a área rural da bacia, denominada de bacia hidrográfica Alto da Colina II, e a segunda para a parte mais urbanizada da bacia denominada de bacia hidrográfica Alto da Colina I, o que facilitou a análise dos parâmetros obtidos na calibração sem maior influência entre as áreas.

O nível de discretização em 6 sub-bacias adotado para a bacia hidrográfica Alto da Colina II com base no uso do solo e nas condições locais, em especial a distribuição da rede de drenagem, mostrou-se representativo das condições existentes.

Para a bacia hidrográfica Alto da Colina I, a discretização da bacia levando em conta a distribuição do sistema de drenagem da bacia foi impossibilitada por problemas de instabilidade no modelo, devido ao diâmetro muito pequeno das canalizações, não sendo possível simular o sistema de drenagem na versão do modelo utilizada. O nível de discretização em 8 sub-bacias adotado, apesar de não ser o ideal, e com o hidrograma de saída da bacia Alto da Colina II como um dado de entrada, favoreceu a calibração dos parâmetros para a área urbana da bacia, com resultados considerados bons.

Na bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro, pode-se dizer que a discretização da mesma em 11 sub-bacias, foi bem representativa da distribuição do sistema de drenagem, levando em conta a homogeneidade das sub-bacias.

A classificação dos dez eventos escolhidos para a simulação na bacia hidrográfica Alto da Colina II e dos oito na bacia Sítio do Tio Pedro de acordo com as condições de escoamento, em eventos de alta e de baixa intensidade facilitou o entendimento da relação que os parâmetros envolvidos na calibração têm com o volume escoado e com o total precipitado.

Já na bacia hidrográfica Alto da Colina I, a impossibilidade de simular a bacia com a discretização desejada, levando em conta a distribuição do sistema de drenagem e também os eventos de maior intensidade devido aos problemas de instabilidade apresentados pelo modelo, especialmente pelo diâmetro muito pequeno das canalizações que transbordavam, a simulação foi feita apenas para quatro eventos, e optou-se por não classificá-los pela condição de escoamento.

O aplicativo SWMM (Storm Water Management Model) apresentou bons resultados na simulação dos eventos através da calibração de seus parâmetros, com ajustes representados pelo coeficiente de correlação e pelo erro médio na vazão de pico e volume escoado considerados bons.

Para a discretização adotada na bacia hidrográfica Alto da Colina II foi obtido um coeficiente de correlação médio de 0,94 e erros médios na vazão de pico e volume escoado, de 1,16% e 4,71%, respectivamente, para os eventos simulados.

Na discretização aplicada a bacia hidrográfica Alto da Colina I obteve-se um coeficiente de correlação médio de 0,99, porém com erros médios na vazão de pico e volume escoado de 0,63% e 13,44%, respectivamente.

Para a bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro o coeficiente de correlação médio encontrado foi de 0,93 e erros médios na vazão de pico e volume escoado, de 4,43% e 5,55%, respectivamente.

Na análise de sensibilidade realizada para os principais parâmetros dos módulos Runoff e Extran buscou-se avaliar a influência dos principais parâmetros na vazão de pico e no volume escoado para o aplicativo SWMM. Foi selecionado um evento da bacia hidrográfica Alto da Colina II e um evento da bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro.

Na análise da sensibilidade do módulo Runoff, responsável pela geração do escoamento superficial, os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade quanto à vazão de pico na bacia hidrográfica Alto da Colina II foram: largura do escoamento das sub-bacias (W), coeficiente de rugosidade de Manning para as sub-bacias (nb) e os parâmetros de Infiltração (I). A porcentagem de área impermeável (AI), e a altura do armazenamento (d) não apresentaram grande influência sobre a vazão de pico.

Já na bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro, todos os parâmetros apresentaram grande sensibilidade quando a vazão de pico foi a variável dependente estudada, principalmente para os menores valores. Já para os maiores valores dos

parâmetros, quem apresentou maior sensibilidade foi porcentagem de área impermeável (AI).

Quanto ao volume escoado os parâmetros mais sensíveis na bacia hidrográfica Alto da Colina II foram: infiltração (I) e a largura do escoamento das sub-bacias (w). Os demais parâmetros: porcentagem de área impermeável (AI), rugosidade de Manning para as sub-bacias (nb) e altura do armazenamento (d) não apresentaram influência significativa.

Na bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro, ao analisar a sensibilidade dos parâmetros sendo o volume escoado a variável dependente, os parâmetros mais sensíveis foram a infiltração (I), a porcentagem de área impermeável (AI) e altura do armazenamento (d), principalmente para valores menores dos parâmetros, sendo que para valores maiores, somente a porcentagem de área impermeável (AI) apresentou variações maiores. Os demais parâmetros, rugosidade de Manning (nb) e a largura do escoamento das sub-bacias (w) não apresentaram influência significativa.

No módulo Extran, responsável pela propagação do escoamento nos condutos, estruturas especiais e canais, o parâmetro analisado foi o coeficiente de rugosidade de Manning para o canal (nc). Esse parâmetro apresentou um comportamento semelhante nas duas bacias, apresentando uma maior sensibilidade para a vazão de pico, e quase nenhuma sensibilidade no volume escoado. A maior sensibilidade foi percebida para os valores mais baixos de n para a vazão de pico.

Verificou-se que o modelo SWMM apresenta sérios problemas de instabilidade quando se trata da simulação de condutos fechados operando na capacidade máxima, como foi o caso da simulação da rede de microdrenagem pluvial da bacia hidrográfica Alto da Colina I, em que determinados trechos de canalização apresentaram problemas devido ao pequeno diâmetro, impossibilitando a simulação. Mesmo para a discretização adotada, alguns eventos de cheia de maior intensidade não puderam ser simulados devido a problemas de instabilidade no trecho canalizado do rio.

Desta forma a utilização do modelo SWMM para a simulação da rede de microdrenagem utilizando a técnica padrão do modelo, que considera o armazenamento nos nós, deve ser utilizada com muito cuidado, sendo mais adequada para sistemas de drenagem em que não ocorram inundações.

De qualquer maneira, o modelo SWMM pode ser considerado como ferramenta para o gerenciamento e planejamento da drenagem pluvial no ambiente urbano, principalmente em bacias que apresentam características rurais, como é o caso das bacias em estudo.

Para trabalhos futuros, sugere-se ainda:

- * Utilização do escoamento nas ruas em conjunto com a microdrenagem nos trechos de extravasamento da rede na bacia Alto da Colina I.

- * Continuação do monitoramento na bacia Alto da Colina com reativação da estação ACII, uma vez que a tendência daquela área é o loteamento de toda a bacia.

- * Avaliação de cenários futuros de uso e ocupação do solo para a área rural da bacia Alto da Colina.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

BAPTISTA, M. B.; COELHO, M. M. L. P.; CIRILO, J. A.; MASCARENHAS, F. C. B., **Hidráulica Aplicada**, 2. ed. ver. Ampl. Porto Alegre, ABRH, 2003

BELLINASSO, T. B; PAIVA, J. B. D. Monitoramento Hidrossedimentométrico e estimativa da produção de sedimentos em eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica sub-urbana de encosta.. V ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 2002, São Paulo, **Anais...**, São Paulo/SP, 2002.

BELLINASSO, T. B. Monitoramento Hidrossedimentométrico e Avaliação da Produção de Sedimentos em Eventos Chuvosos em Uma Pequena Bacia Hidrográfica Urbana de Encosta. 2002. 300f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

BELLINASSO, T. B; PAIVA, J. B. D. Avaliação da descarga sólida por arraste de fundo e sua relação com a descarga em suspensão em uma pequena bacia hidrográfica. XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2003, Curitiba, **Anais...**, Curitiba/PR, 2003

BELLÓ, S. L; PAIVA J. B. D. Características hidrossedimentométricas de duas pequenas áreas em fases distintas de urbanização em uma pequena bacia de encosta. XXI CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 2004, São Pedro, **Anais...** São Pedro / SP, Brasil, 2004.

BELLÓ, S. L. **Avaliação do Impacto da Ocupação Urbana Sobre as Características Hidrossedimentométricas de Uma Pequena Bacia Hidrográfica de Encosta**. 2004. 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

BERTONI, J. C. Simulação Matemática de uma Cheia Urbana sob Condições de Registros Escassos: Aplicação do Modelo SWMM. In: BRAGA, B.; TUCCI, C. E. M.; TOZZI, M (Org.). **Drenagem Urbana – Gerenciamento, Simulação e Controle**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1998.

CARVALHO, K.S. **Monitoramento e Caracterização Hidrossedimentométrica de Uma Pequena Bacia Hidrográfica Periurbana**. 2003. 165f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

CARVALHO, K.S; PARANHOS, R. M. e PAIVA, J. B. D. Limitações ao Uso da Relação entre Turbidez e Concentração de Sedimento em Suspensão em Duas

Pequenas Bacias em Santa Maria, RS. In: XXI CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HIDRÁULICA, 2004, São Pedro, Anais... São Pedro/SP. IAHR/AIPH, 2004

CHAVES, H. M. L; ROSA, J. W. C; VADAS, R. G; OLIVEIRA, R. V. T. Regionalização de Vazões Mínimas em Bacias Através de Interpolação em Sistemas de Informação Geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** / ABRH, v. 7, n.3, p.43-51 – Porto Alegre/RS, 2002.

CHOI, K.S; BALL, J. E. Parameter Estimation for Urban Runoff Modelling. **Urban Water** / Elsevier, n. 4, p. 31-41, 2002.

CHOW, V. T.; **Open - channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1959.

CIRILO, J.A. **Hidráulica Aplicada**. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH. 2003. 2 ed., v.8, 621p.

DHI – **Danish Hydraulics Institute** <www.dhisoftware.com>:

EMBRAPA. “Propostas de Revisão e Atualização do Sistema Brasileiro de Classificação de solos. ISSN1517-2627”. Disponível em <www.embrapa.gov.br>.Rio de Janeiro, 2003.

FILHO, V. M; ALVES, M; GARCIA, R; FANTIN, M. Caracterização de Bacias Hidrográficas Impermeabilizadas pelo processo de Urbanização com o Suporte de Geotecnologias In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte/MG, 2003.

GARCIA, J.I.B. **Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da bacia Hidrográfica do Arroio Cancela**. 2005. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

GARCIA, J.I.B.; PAIVA E.M.C.D. , BRITES, A.P.Z. e PAIVA, R.C.D. Avaliação da discretização em uma bacia hidrográfica urbana, através do modelo SWMM. XXI CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 2004, São Pedro, **Anais...** São Pedro / SP, Brasil, 2004.

GARCIA, J.I.B. e PAIVA E.M.C.D. Comparação das Respostas do Modelo SWMM para Diferentes Amplitudes de Cheias. 1º SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS

DO SUL E 1º SIMPÓSIO DE ÁGUAS DA AUGM, 2005, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria/RS, 2005.

GENZ, F; TUCCI, C. E. M. Infiltração em Superfícies Urbanas. **Revista Brasileira de Engenharia**. Caderno de Recursos Hídricos / ABRH, v. 13, n. 1, p.105-124, 1995.

HydroWorks PM help files. WALLINFORD SOFTWARE LTD, Wallinford, 1994.

HUBER, W.C.; DICKINSON, R.E. **Storm Water Management Model: Version 4: User's Manual**. Athens: U.S. Environmental Protection Agency. Georgia, 1992.

JAMES, W.; HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E.; PITT, R. E.; JAMES, W. R. C.; ROSENER, L. A.; ALDRICH, J. A., **User's Guide to SWMM**. Guelph: CHI, 2003, Ontario, Canada.

JI, Z. General Hydrodynamic Model for sewer/channel networks systems. **Journal of Hydraulic Engineering**. / Reston. v.124, n.3, p.307-315, 1998.

MAKSIMOVIC, C. General Overview of Urban Drainage Principles and Practice. **Urban Drainage in Specific Climates** (IHP-V-Technical Documents in Hydrology)/UNESCO, v.1, n.40, p.1-21, 2001

MELLER, A. **Simulação Hidrodinâmica Integrada de Sistema de Drenagem em Santa Maria-RS**. 2004. 164f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MELLER, A; PAIVA, E.M.C.D Modelagem de sistema de microdrenagem utilizando o software MOUSE. XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2003, Curitiba, **Anais...**, Curitiba/PR, 2003.

MELLER, A; PAIVA, E.M.C.D. Comparação entre metodologias de simulação de inundações em redes de drenagem pluviais a uma pequena bacia hidrográfica em urbanização. XXI CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HIDRÁULICA, 2004, São Pedro, **Anais...**, São Pedro/SP, 2004.

MENDONÇA, A. S. Quantificação dos Recursos Hídricos (Razões para a quantificação) In: PAIVA, E. M. C. D. de; PAIVA, J. B. D. de (Org.). **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. Porto Alegre: ABRH, 2001. 625p

MOREIRA, I. A. **Modelagem Hidrológica Chuva-Vazão com dados de Radar e Pluviômetros**. 2005. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidrológica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

NASCIMENTO, N. O; HELLER, L. Ciência, Tecnologia e Inovação na Interface Entre as Áreas de Recursos Hídricos e Saneamento. **Engenharia Sanitária e Ambiental / Scielo**, v. 10, n. 1 p 36-48 – Rio de Janeiro/RJ, 2005.

OSTROWSKY, M. S. B. Sistemática Integrada para Controle de Inundações em Sub-bacias Hidrográficas Urbanas. Estudo de Caso: A Bacia do Córrego Pirajuçara Sob o Enfoque da Integração de Obras com Ações de Educação e Percepção Ambiental In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS / V SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2001, Aracaju. **Anais...** LIVRO DE RESUMOS, p. 108-109, Aracaju/SE, 2002.

PAIVA, E. M. C. D., Monitoramento dos Processos e Variáveis da Bacia - Rede de Monitoramento Hidrológico In: **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. PAIVA, E. M. C. D e PAIVA, J. B. D. Porto Alegre: ABRH, 2001.625p

PAIVA, E.M.C.D; FORGIARINI, F. R. e SANTOS, F. A. Estudo Sedimentológico em Pequena bacia Urbana. In: II SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO SUL SUDESTE, 2002, Campo Grande, **Anais...** Campo Grande/MS, 2002.

PAIVA, E.M.C.D; MELLER, A; PAIVA, R.C D; PAIVA, J.B. D. Taxa de infiltração em Pequena Bacia Suburbana. In: XXI CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HIDRÁULICA, 2004, São Pedro, **Anais...** São Pedro/SP, 2004.

PAZ, M. F; GASTALDINI, M. C. C. e JORGE, M. P. Avaliação da Qualidade do Escoamento Superficial da Bacia Alto da Colina. In: XI SILUBESA – SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA, 2004, Natal, **Anais...** Natal/RN. XI SILUBESA - SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA, 2004, Rio de Janeiro, **Anais...** Rio de Janeiro/RJ: ABES, 2004.

POMPÊO, C. A., Drenagem Urbana Sustentável. **Revista Brasileira dos Recursos Hídricos / ABRH**, v. 5, n.1 p.15-23 – Porto Alegre/RS, 2000.

RAMPELOTTO, G; PAIVA, E. M. C. D; MELLER, A. Monitoramento da bacia hidrográfica Alto da Colina. I SEMINÁRIO DE DRENAGEM URBANA DO MERCOSUL, V SEMINÁRIO NACIONAL DE DRENAGEM URBANA, 2001.

SOLUÇÕES PARA A DRENAGEM URBANA EM PAÍSES DA AMÉRICA LATINA. v.1. p.161 – 166. Porto Alegre: ABRH, 2001.

ROESNER, A.R.; ALDRICH, J.A.; DICKINSON, R.E., **Storm Water Management Model, version 4: EXTRAN ADDENDUM**. Athens: EPA/600/3-88/001b (NTIS PB88-236658/AS). Geórgia, 1998.

SANCHEZ, J. E.. In: **Fundamentos de hidrologia**. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 1987. 333p

SANDS, R.J; CHANG, C.C; MCDONALD, J. M. **Storm Water Management Study After Flooding of the South Bronx, NYC, New York**, 2002.

SANTOS, W. L. **O Processo de Urbanização e Impactos Ambientais em Bacias Hidrográficas: O caso do Igarapé Judia – Acre – Brasil**. 2005. 168f. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Manejo de Recursos Naturais) – Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2005.

TUCCI, C. E. M., Controle de Enchentes. In: TUCCI, C.E.M (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade UFRGS:ABRH:EDUSP, 1993.

TUCCI, C. E. M., Plano Diretor de Drenagem Urbana: Princípios e Concepção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos / ABR**, v. 2, n. 2, p.5-12, 1997.

TUCCI, C. E. M., **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: Editora Universitária UFRGS:ABRH, 1998.

TUCCI, C. E. M., Gerenciamento da Drenagem Urbana. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos / ABRH**, v. 7, n.1, p.5-27 – Porto Alegre/RS, 2002.

US EPA's - **Storm Water Management Model** < <http://www.epa.gov> >

WALLINFORD SOFTWARE - **InfoWorks CS v.4.0** <www.wallinfordsoftware.com>:

WL | DELFT HYDRAULICS. **SOBEK help files**. Netherlands, 2004. <<http://www.sobek.nl>>

ZAGHLOUL, N. A. Sensitivity analysis of the SWMM Runoff-Transport parameters and the effects of catchment discretisation. **Advances in Water Resources** / Elsevier, v.6, p.214-223 1983.

ANEXOS

ANEXO A – Janelas de apresentação do aplicativo PCSWMM 2003

Este anexo tem o objetivo de mostrar a interação do usuário com o aplicativo. O PCSWMM 2003 foi desenvolvido em ambiente Windows para facilitar a entrada de dados, pois a versão original do SWMM foi desenvolvida em linguagem Fortran, em ambiente DOS e necessitava extensos arquivos de entrada com configurações complexas. A seguir são mostradas algumas telas desta versão. A figura 92 mostra a adição de novos módulos.

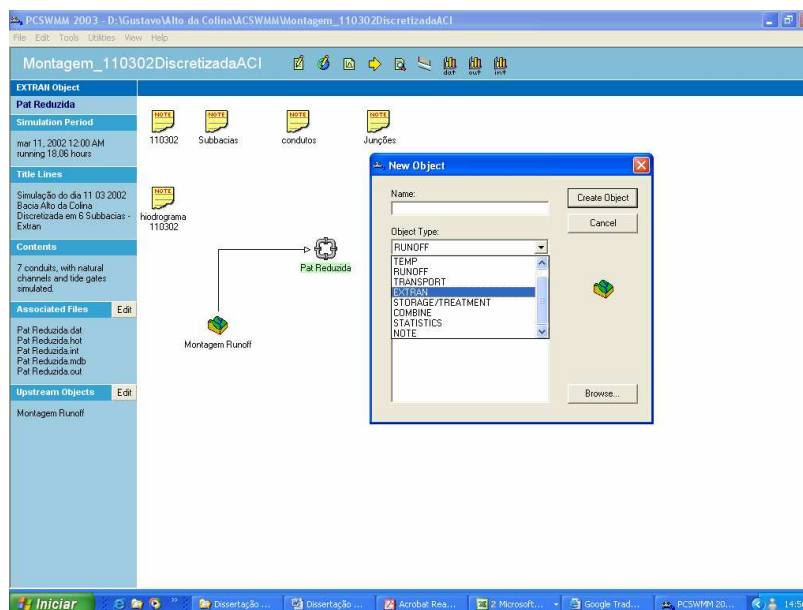


Figura 92 – Caixa para adição de novos módulos

A figura 93 mostra a janela para os dados de entrada no módulo Runoff.

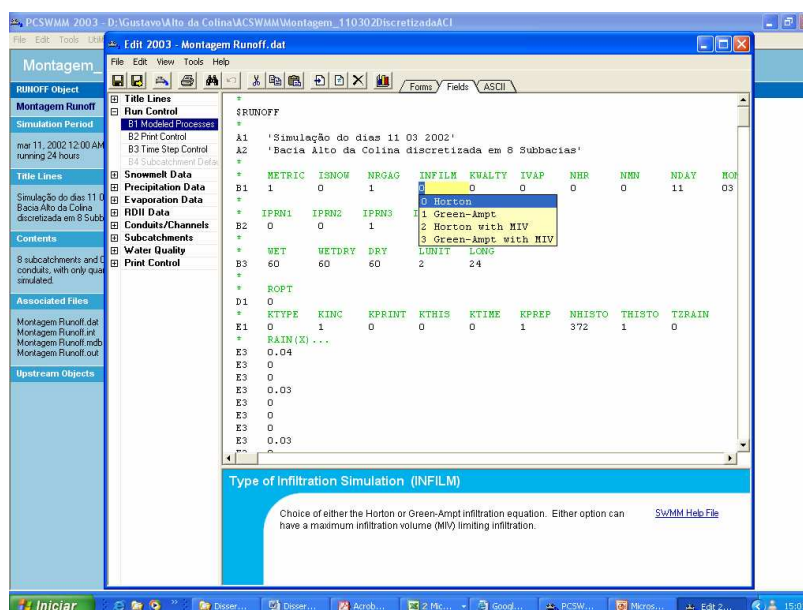


Figura 93 – Caixa de entrada de dados no módulo Runoff

A figura 94 mostra a janela para a entrada de dados nas sub-bacias no módulo Runoff.

The screenshot shows the 'Montagem Runoff.dat' window in PCSWMM 2003. The left sidebar contains a tree view with categories like 'Runoff Object', 'Simulation Period', 'Title Lines', 'Contents', 'Associated Files', and 'Upstream Objects'. The main area is titled 'Subcatchment Data (H1)' and displays various parameters for subcatchment H1. A 'back' button is visible in the bottom right corner of the data entry area.

Subcatchment Data (H1)		
Hyetograph No	Manning's N (Imperv)	Max. Infiltration Volume
1	0.02	0
Subcatchment ID	Manning's N (Perv)	Run-on
107	0.3	No run-on
Channel ID for Drainage	Storage (Imperv)	Percent Zero Depression
9	5	0
Subcatchment Width	Storage (Perv)	
114.10	9	
Subcatchment Area	Maximum Infiltration/Capillary Suction	
6.790	130	
Percent Imperviousness	Min. Infiltration/Sat. Hydraulic Cond.	
0.00	6.3	
Ground Slope	Decay Of Infiltration/Initial Moisture Deficit	
0.04372	0.005	

Run-on (IFLOWP)

Option for directing runoff from one overland flow plane to another. Input of this parameter is optional and required only if redirection of overland flow is desired. Options 2 and 3 route the overland flow to another plane within the same subcatchment, options 4, 5 and 6 route the overland flow to planes in another subcatchment.

[SWMM Help File](#) [More details](#)

Figura 94 – Caixa de entrada de dados para sub-bacias, no módulo Runoff

A figura 95 mostra a janela com o ambiente SIG, no aplicativo PCSWMM 2003, facilitando a comunicação do usuário e o banco de dados.

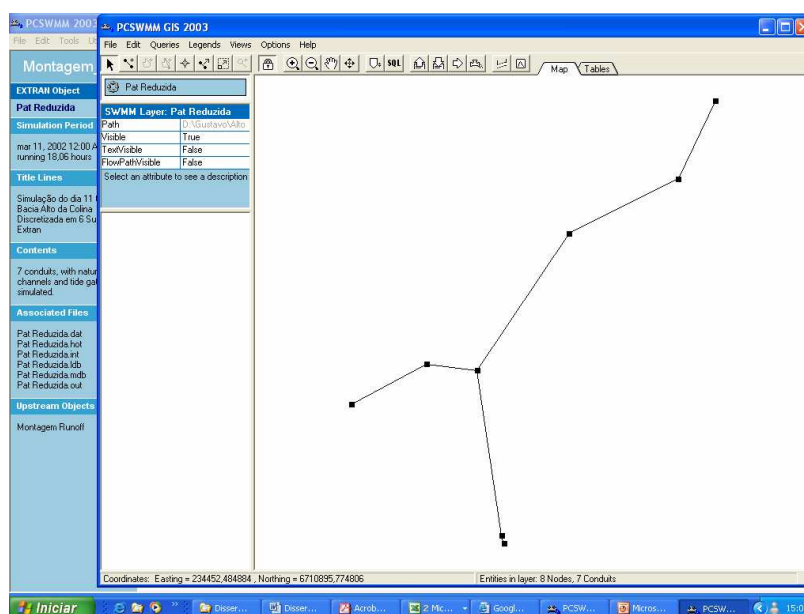


Figura 95 – Ilustração de uma rede de drenagem em ambiente SIG, no aplicativo PCSWMM 2003

**ANEXO B – Equacionamentos e Procedimentos Utilizados pelos Módulos
Runoff e Extran**

Este anexo tem o objetivo de apresentar as equações e procedimentos de cálculo utilizados, pelos módulos Runoff e Extran, do modelo SWMM.

– Módulo Runoff

Segundo Garcia (2005) o módulo Runoff processa suas rotinas com base em dados de precipitação ou neve, simulando degelo, infiltração em áreas permeáveis (modelos de Horton ou Green Ampt), detenção na superfície, escoamento na superfície e em canais, podendo ser utilizado para simulações de eventos isolados ou contínuos. Na análise das sub-bacias, elas são subdivididas em três sub-áreas, como mostrado na figura 96 e na tabela 29. Assim temos que a sub-área A1 é impermeável com armazenamento nas depressões (detenção), a sub-área A2 é permeável com armazenamento nas depressão do solo e a sub-área A3 é impermeável sem armazenamento nas depressão.

O valor das áreas impermeáveis sem armazenamento, nas depressões do solo, é especificado para cada sub-bacia, pelo parâmetro PCTZER (com uma porcentagem):

$$A3 = \frac{PCTZER}{10} (A1 + A3) \quad (21)$$

onde: *PCTZER* = Porcentagem das áreas impermeáveis sem armazenamento.

Em nenhuma sub-bacia pode ser atribuído zero para este parâmetro, sendo utilizado no estudo 25% de áreas impermeáveis com zero armazenamento, valor padrão do modelo.

Tabela 29 - Classificação superficial da sub-bacia (Huber e Dickinson, 1992)

Sub-área	Impermeabilidade	Armazenamento por detenção
A1	Impermeável	Sim
A2	Permeável	Sim
A3	Impermeável	Não

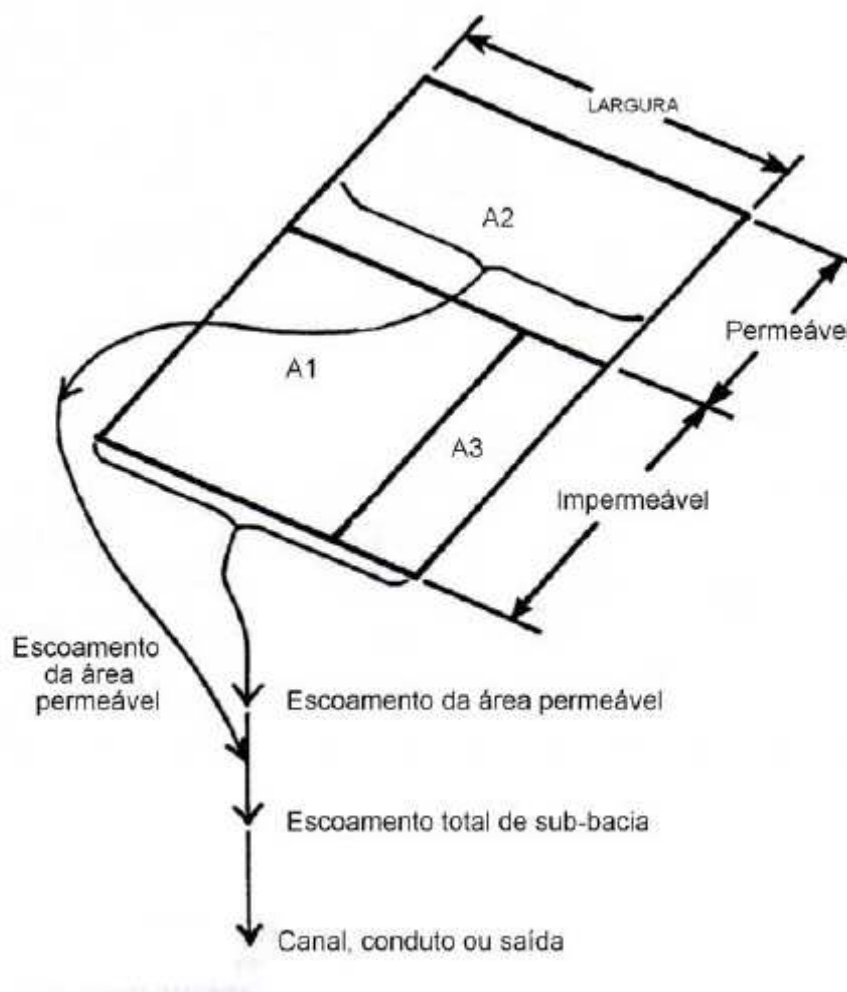


Figura 96 – Esquematização das sub-bacias (Fonte: Garcia, 2005)

O escoamento superficial é obtido através de um reservatório não-linear para cada sub-área, como mostra o esquema na figura 5, e representado pela combinação das equações de Manning e da continuidade, que podem ser escritas da seguinte forma:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = Ai^* - Q \quad (22)$$

onde: $V = A.d$ = volume de água sobre a sub-área (m^3); A = área sub-área da sub-bacia (m^2); i^* = precipitação efetiva; d = profundidade da água no reservatório; t = tempo.

A vazão é gerada usando a equação de Manning

$$Q = W \cdot \frac{1}{n} (d - d_p)^{5/3} \cdot S^{1/2} \quad (23)$$

onde: W = largura da sub-bacia (m); n = coeficiente de rugosidade de Manning;
 d_p = profundidade do armazenamento (m); S = declividade da sub-bacia (m/m).

A figura 97 representa o reservatório não linear para as sub-bacias

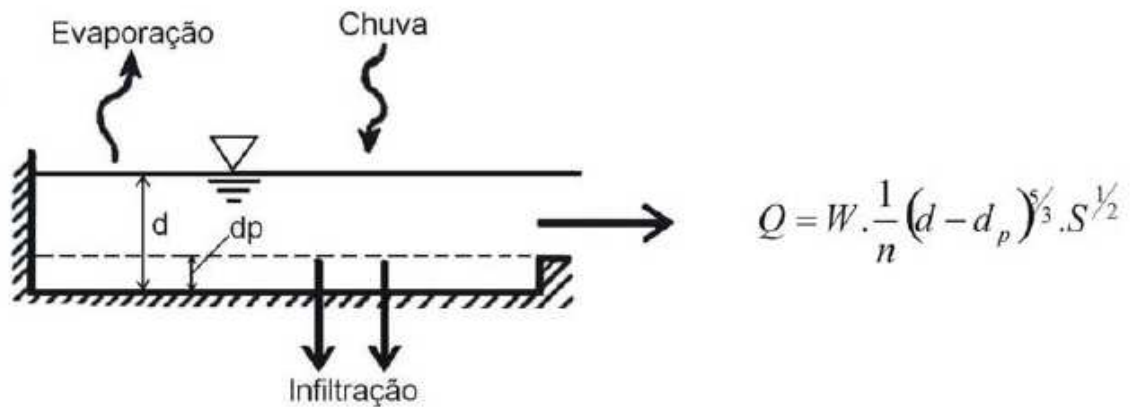


Figura 97 – Representação do reservatório não linear das sub-bacias (Fonte: Garcia 2005)

Essas duas equações (22 e 23) podem ser combinadas em uma equação diferencial não linear, que pode ser resolvida para valores de d desconhecidos.

Produzindo a equação 24 do reservatório não linear:

$$\frac{dd}{dt} = i^* - \frac{W}{A \cdot n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} = i^* + WCOM \cdot (d - d_p)^{5/3} \quad (24)$$

onde:

$$WCOM = \frac{W \cdot S^{1/2}}{A \cdot n} \quad (25)$$

A equação dd/dt é resolvida em cada passo de tempo através do método de diferenças finitas.

A chuva efetiva é dada pelo programa como uma média no passo de tempo. A média dos fluxos de saída é calculada usando a média entre as alturas de armazenamento. Sendo estas representadas como 1 e 2 para o início e o final do passo de tempo, respectivamente, a equação pode ser escrita como:

$$\frac{d_2 - d_1}{\Delta t} = i^* + WCON \cdot \left[d_1 + \frac{1}{2}(d_2 - d_1) - d_p \right]^{5/3} \quad (26)$$

onde: Δt = intervalo de tempo (s).

Esta equação é resolvida para d_2 , através do processo iterativo de Newton-Raphson. Baptista et al. (2003) apresenta em um apêndice a solução de equações não lineares pelo Método de Newton-Raphson.

• Infiltração

Para infiltração em áreas permeáveis o modelo SWMM dispõe de duas opções para sua estimativa: o modelo de Horton ou Green Ampt. No estudo foi utilizado o modelo de Horton na determinação da infiltração.

A equação de Horton calcula a capacidade de infiltração no solo como uma função no tempo:

$$I = I_b + (I_0 - I_b)e^{-kt} \quad (27)$$

onde: I = capacidade de infiltração no solo, mm/h; I_b = taxa mínima de infiltração, mm/h; I_0 = taxa de infiltração máxima ou inicial, mm/h; t = tempo decorrido desde a saturação superficial do solo, segundos; k = coeficiente de decaimento, s⁻¹.

• Escoamento subterrâneo

A descarga subterrânea representa a contribuição do escoamento lateral da zona saturada para o corpo receptor. A equação do escoamento pode ser representada da seguinte forma:

$$GWFLW = A1(D1 - BC)^{B1} - TWFLW + A3.D1.TW \quad (28)$$

e

$$TWFLW = A2.(TW - BC)^{B2} \quad (29)$$

onde: $GWFLW$ = taxa de escoamento subterrâneo; $TWFLW$ = taxa de influência da água no canal; $A1$, $A2$ e $A3$ = coeficientes de escoamento subterrâneo; $B1$ e $B2$ =

expoentes do escoamento subterrâneo; BC = elevação do fundo do canal; TW = elevação da água no canal.

Na figura 98 pode ser visualizado um esquema do escoamento lateral subterrâneo para o canal.

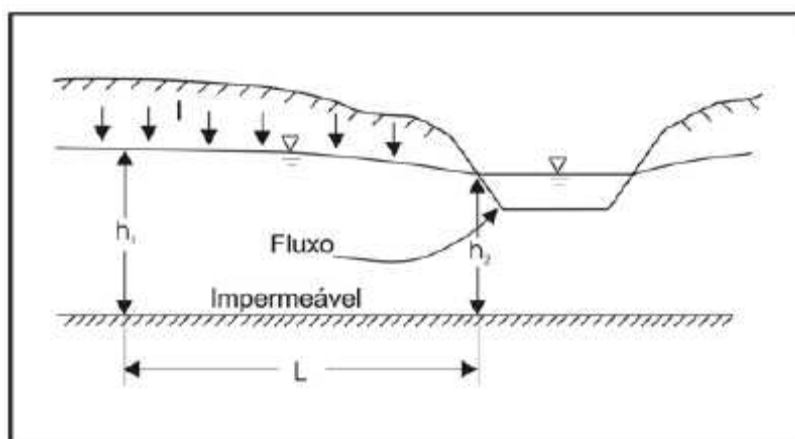


Figura 98 – Esquema do escoamento subterrâneo (Fonte: Garcia, 2005)

Para a configuração apresentada na figura 95, no escoamento subterrâneo, o coeficiente de $D1$ pode ser determinado pela equação 30

$$D1 = \frac{h_1 - h_2}{2} \quad (30)$$

Os valores de $A1$, $A2$, $A3$ e $B1$ das equações 28 e 29, da configuração apresentada na figura 96, podem ser determinados como:

$$A1 = A3 = \frac{4K}{L^2} \quad (31)$$

$$A2 = 0 \quad (32)$$

$$B1 = 2 \quad (33)$$

– Módulo Extran

Segundo Garcia (2005) as equações diferenciais utilizadas pelo modelo no cálculo do escoamento não permanente, em canais abertos ou fechados, são conhecidas como equações de St. Venant. A equação da conservação da massa, tendo variáveis dependentes área e vazão, está representada na equação 34.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (34)$$

onde: A = área da seção transversal; Q = vazão no conduto; x = distancia ao longo do tubo/canal; t = tempo.

A equação da quantidade do movimento pode ser escrita de diversas formas, dependendo das variáveis dependentes escolhidas. Usando a vazão “ Q ” e a cota piezométrica “ H ”, a equação da quantidade do movimento é dada pela equação 35:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (35)$$

onde: g = constante gravitacional; $H = z + h$ = cota piezométrica; z = elevação inversa; h = profundidade de água; S_f = declividade da linha de energia.

O módulo Extran usa a equação da quantidade do movimento aplicada ao longo dos vínculos “links” e a equação da continuidade para os nós. Assim o momento é conservado nos links e a continuidade é conservada nos nós.

A equação 35 pode ser modificada pela seguinte substituição:

$$\frac{Q^2}{A} = V^2 A \quad (36)$$

$$\frac{\partial (V^2 A)}{\partial x} = 2AV \frac{\partial V}{\partial x} + V^2 \frac{\partial A}{\partial x} \quad (37)$$

onde: V = velocidade média do conduto.

Substituindo a equação 37 na equação 35 temos:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + 2AV \frac{\partial V}{\partial x} + V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (38)$$

Esta é a forma da equação da quantidade do movimento utilizada no módulo Extran e tem como variáveis dependentes Q , A , V , e H .

A equação da conservação da massa pode ser modificada para substituir o segundo termo da equação 38 usando $Q=A.V$,

$$\frac{\partial A}{\partial t} + A \frac{\partial A}{\partial x} + V \frac{\partial A}{\partial x} = 0 \quad (39)$$

Com o rearranjo dos termos e multiplicando por v , temos:

$$AV \frac{\partial V}{\partial x} = -AV \frac{\partial A}{\partial t} + V^2 \frac{\partial A}{\partial x} \quad (40)$$

Substituindo a equação 40 na equação 38 para eliminar $\partial V / \partial x$, encontramos a equação usada ao longo dos condutos.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (41)$$

Para a resolução desta equação foi utilizada a solução explícita iterativa, disponibilizada pelo modelo.

A equação 41 é a base da solução explícita. Para as soluções explícitas iterativa a equação da quantidade do movimento é derivada das equações 34 e 35 da seguinte maneira. O termo $d(Q^2/A)/dx$ na equação 35 é desenvolvido como um produto de Q e Q/A no lugar de V^2/A como na solução explícita.

$$\frac{\partial Q^2 A}{\partial t} = Q^2 \frac{\partial (1/A)}{\partial x} + \frac{2Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} = Q^2 \frac{\partial (1/A)}{\partial x} + 2V \frac{\partial Q}{\partial x} \quad (42)$$

Novamente a equação da continuidade 34 é usada para substituir o termo dQ/dx na equação 42. Este termo não é aceito no Extran já que o escoamento deve ser assumido constante no link. A equação da quantidade do movimento utilizada, no link, para as soluções explícita iterativa é vista como:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} + Q^2 \frac{\partial (1/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (43)$$

• Equações básicas do escoamento

Para o uso no Extran, a equação da quantidade do movimento é combinada com a equação da conservação da massa, produzindo uma equação para ser resolvida ao longo de cada link em cada passo de tempo.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (44)$$

onde: Q = descarga ao longo do conduto; V = velocidade no conduto; A = área da seção transversal do fluido; H = cota piezométrica; S_f = declividade da linha de energia.

A declividade da linha de energia é definida pela equação de Manning

$$S_f = \frac{k}{gAR^{4/3}} QV \quad (45)$$

onde: $k = g.n^2$; n = coeficiente de rugosidade de Manning; g = aceleração gravitacional; R = Raio hidráulico.

Substituindo na equação 44 e expressando em diferença finita tem-se:

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{k\Delta t}{R^{4/3}} V_t Q_{t+\Delta t} + 2V \left(\frac{\Delta A}{\Delta t} \right)_t \Delta t + V^2 \left[\left(\frac{A_2 - A_1}{L} \right) \Delta t - gA \left[\left(\frac{H_2 - H_1}{L} \right) \right] \Delta t \right] \quad (46)$$

onde: Δt = intervalo de tempo; L = comprimento do conduto.

Resolvendo a equação 46 para $Q_{t+\Delta t}$ dando a diferença finita final a forma da equação dinâmica do escoamento.

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{1}{1 + \frac{k\Delta t}{R^{4/3} |V|_t}} \left[Q_t + 2\bar{V} \left(\frac{\Delta A}{\Delta t} \right)_t \Delta t + \bar{V}^2 \left[\left(\frac{A_2 - A_1}{L} \right) \Delta t - gA \left[\left(\frac{H_2 - H_1}{L} \right) \right] \Delta t \right] \right] \quad (47)$$

Na equação 47 V , R e A são médias ponderadas dos valores no final do conduto no tempo t , e $(\Delta A/\Delta t)_t$ é a derivada do tempo para os passos de tempo anteriores.

As variáveis desconhecimentos na equação 46 são $Q_{t+\Delta t}$, H_2 e H_1 . As variáveis V , R e A podem ser relacionadas com Q e H . Por essa razão, outras equações são requeridas relacionando Q e H . Esta pode ser obtida pela equação da continuidade em um nó.

$$\frac{\partial H}{\partial t_1} = \frac{\sum Q_t}{A_{S1}} \quad (48)$$

Representada em diferenças finitas, temos:

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \frac{\sum Q_t \Delta t}{A_{St}} \quad (49)$$

onde: A_s = área da superfície no nó.

• Solução da equação do escoamento pelo método de Euler modificado

As equações 47 e 49 podem ser resolvidas sequencialmente determinando a descarga, em cada link, e profundidade, em cada nó, sobre um espaço de tempo Δt .

A integração numérica dessas duas equações é aperfeiçoada efetuada pelo método de Euler modificado. O resultado tem provado ser, relativamente, exato e estável quando certas restrições são seguidas. A figura 99 mostra como ao processo é solucionado se somente a equação da descarga é incluída.

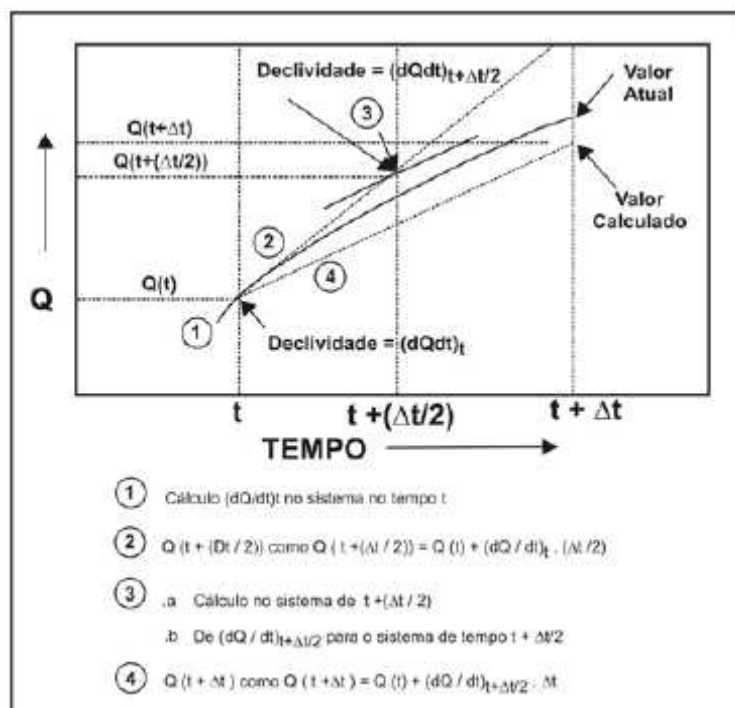


Figura 99 – Método de Euler modificado para a descarga baseado nas projeções de $t+\Delta t/2$ e $t+\Delta t$. (Fonte: Garcia, 2005)

A primeira das 3 operações determina a declividade dQ/dt , valor da descarga na metade do passo de tempo. Em outra sentença é assumido que a declividade, no tempo $t+\Delta t/2$, é a declividade média durante o intervalo. Os cálculos correspondentes à cota de $t+\Delta t/2$ e $t+\Delta t$ são mostrados a seguir:

* Metade do passo de tempo no nó j: time $t+\Delta t/2$

$$H_j(t + \Delta t / 2) = H_j(t) + (\Delta t / 2) \left\{ (1/2) \sum [Q(t) + Q(t + \Delta t / 2)] + \sum [Q(t + \Delta t / 2)] \right\} / A_{z_j}(t) \quad (50)$$

* Passo de tempo completo no nó j Tempo $t+\Delta t$

$$H_j(t + \Delta t) = H_j(t) + \Delta t \left\{ (1/2) \sum [Q(t) + Q(t + \Delta t)] + \sum [Q(t + \Delta t)] \right\} / A_{z_j}(t) \quad (51)$$

Observa-se que o cálculo da cota, na metade do passo de tempo, usa o cálculo da descarga da metade do passo de tempo, em todos condutos conectados.

Similarmente, o cálculo de todo o passo de tempo requer a descarga, no tempo $t+\Delta t$, para todos os condutos conectados. Em adição, as entradas e desvios de fluxo para cada nó por vertedores, orifícios e bombas devem ser calculados em cada metade e todo passo de tempo.

• Estabilidade numérica

□ Restrições no passo de tempo

O método de Euler modificado produz uma solução completamente explícita, na qual a equação do movimento é aplicada para escoamento em cada “Link” e a equação da continuidade para cada “Nó”, com uma ligação implícita durante o passo de tempo.

Os métodos explícitos envolvem regularmente aritmética simples e requerem pouco espaço de armazenamento, se comparados com métodos implícitos.

Entretanto, existem, geralmente, perdas de estabilidade que muitas vezes requerem passos de tempo muito curtos.

O módulo Extran apresenta uma boa estabilidade numérica quando as seguintes desigualdades são satisfeitas:

– Canais e Condutos

$$\Delta t \leq \frac{L}{(gD)^{1/2}} \quad (52)$$

onde: Q = descarga (m³/s); Δt = passo de tempo (s); L = comprimento do canal (m); g = aceleração gravitacional (9,8 m/sec²); D = profundidade máxima do canal (m).

A equação 52 é conhecida como forma da condição de Courant, na qual o passo de tempo é limitado para um tempo requerido pela onda dinâmica, para propagar o comprimento de um conduto.

– Nós

$$\Delta t \leq \frac{C' A_s \Delta H_{mas}}{Q} \quad (53)$$

onde: C' = constante adimensional, aproximadamente igual a 0,1; ΔH_{máx} = nível máximo da superfície d'água no passo de tempo; A_s = área da superfície correspondente ao nó; Q = vazão na entrada do nó.

Examinando as desigualdades das equações 52 e 53 revela-se que o passo de tempo máximo admissível (Δt) será determinado pelos condutos curtos que tenham grandes vazões de entrada. Se a estabilidade numérica não for atingida, será necessário que o usuário elimine ou agregue condutos e canais menores.

□ Condutos equivalentes

Um conduto equivalente é a substituição computacional de um elemento atual, do sistema de drenagem, por um conduto imaginário, que é hidraulicamente idêntico. Usualmente, um conduto equivalente é usado quando se suspeita que a instabilidade numérica é causada pelo elemento do sistema de drenagem.

Os condutos curtos são, freqüentemente, causadores de problemas de instabilidade, sendo necessária sua substituição por condutos equivalentes. Os orifícios não apresentam este problema, pois são automaticamente convertidos para condutos equivalentes pelo programa.

□ Solução de equação do escoamento pelo método iterativo

Para a resolução das equações de escoamento gradualmente variado, fluxo variável uni-dimensional para canais abertos, foi utilizado as soluções pelo método explícito iterativo, disponibilizado pelo módulo Extran. As equações básicas do escoamento foram apresentadas anteriormente pelas equações 44, 46 e 47.

A equação 46 é a base para a solução do método iterativo. Resolvendo a equação 46 para $Q_{t+\Delta t}$ e usando coeficientes ponderados apropriados, a seguinte forma da diferença finita para a solução iterativa da equação dinâmica do escoamento é observada:

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{\left\{ Q_1 + (1-w) \left[-g\bar{A} \left(\frac{H_2 - H_1}{L} \right) \Delta t \right] + \frac{k\Delta t}{R^{4/3}} |V| + \left[\left(\frac{Q/A_2 - Q/A_1}{L} \right) \Delta t \right] + w \left(-g\bar{A} \left[\left(\frac{H_2 - H_1}{L} \right) \Delta t \right]_{t+\Delta t} \right) + V \left(\frac{\Delta A}{\Delta t} \right) \right\}}{w \left[\frac{k\Delta t}{R^{4/3}} |V| + \left[\left(\frac{Q/A_2 - Q/A_1}{L} \right) \Delta t \right]_{t+\Delta t} \right]} \quad (54)$$

Os valores de V , R , A , na equação 54, são médias ponderadas do início, meio e fim do conduto no tempo t e/ou $t+\Delta t$. Os valores no tempo $t+\Delta t$ são valores para direção da iteração. Na primeira iteração eles são iguais aos valores previstos no passo de tempo. A_1 , A_2 , H_1 e H_2 representam a área da seção transversal e a altura do conduto nos nós de montante (1) e jusante (2). $V(\Delta A/\Delta t)$ é a média da área do conduto, derivada no tempo, e a velocidade média do conduto base, na média ou diferença do passo de tempo antecedente e as iterações ocorridas. O valor do fator(w) da equação 53 é 0,55.

Os conhecimentos básicos na equação 54 são $Q_{t+\Delta t}$, H_1 e H_2 . As variáveis R , V , A , A_1 e A_2 podem ser relacionadas com Q e H . A equação relaciona Q e H com a equação da continuidade em um nó, para a solução iterativa.

$$\left(\frac{\partial H}{\partial t} \right)_t = \frac{\sum (Q_t + Q_{t+1})}{A_{St} + A_{St+\Delta t}} \quad (55)$$

onde: A_{St} = área da superfície do nó no tempo t , e $A_{St+\Delta t}$ = área da superfície do nó no tempo $t + \Delta t$; Δt = intervalo de tempo; $A(t)$ = área da seção transversal de fluido no conduto;

As equações 54 e 55 podem ser resolvidas iterativamente para determinar a descarga, em cada link, e a cota, em cada nó, no final de um passo de tempo t .

A integração numérica dessas duas equações é realizada na solução de uma matriz iterativa sob-relaxação. Deve-se notar que a equação 43 tem sido linearizada pelo uso do produto de $Q_{t+\Delta t}$ e $(Q/A)_t$ e usando a equação 45 para o termo S_f .

O método iterativo usa um fator de sob-relaxação de 0,75 para a primeira iteração e 0,5 para as iterações subseqüentes. Assim, a nova estimativa de $Q_{t+\Delta t}$ em cada iteração é:

$$Q_{t+\Delta t} = (1 - U_f)Q_j + U_f Q_{j+1} \quad (56)$$

onde: U_f = fator de sob-relaxação (0,75 ou 0,5); Q_j = vazão no conduto na iteração j ; Q_{j+1} = vazão no conduto na iteração $j+1$.

Similarmente, a estimativa da altura n nó em cada iteração é:

$$H_{t+\Delta t} = (1 - U_f)H_j + U_f H_{j+1} \quad (57)$$

onde: U_f = fator sob-relaxação (0,75 ou 0,5); H_j = vazão no conduto na iteração j ; H_{j+1} = vazão no conduto na iteração $j+1$.

A solução do novo passo de tempo é encontrada quando todas as estimativas dos escoamentos do conduto e cota piezométrica dos nós satisfazem o critério da convergência (o valor recomendado para o parâmetro de convergência é 0,0025).

O critério de convergência para escoamento em condutos e altura em nó é:

$$|Q_{j+1} - Q_j| / Q_{full} \leq SURTOL \quad (58)$$

$$|H_{j+1} - H_j| / H_{full} \leq SURTOL \quad (59)$$

onde: Q_{full} = vazão de projeto no conduto; H_{full} = distância entre o fundo e o topo do nó.

A vazão de projeto, para condutos com declividade zero, é baseada em uma diferença assumida de 0,01 entre a cota de fundo montante e a de jusante.

O método iterativo usa um passo de tempo variável. O passo de tempo, especificado nos dados de entrada do modelo (DELT= comprimento do passo de tempo), é o máximo passo de tempo permitido para o programa usar durante a simulação.

O programa selecionará o passo de tempo baseado no menor número de Courant dos condutos no início de cada passo de tempo. O modelo determina o número do menor comprimento de passo de tempo requerido igual a DELT.

O número de Courant para conduto é:

– Para condutos fechados:

$$C\# = \frac{L}{V + (gD)^{1/2}} \quad (60)$$

– Para canais abertos:

$$C\# = \frac{L}{V + (gA/T)^{1/2}} \quad (61)$$

onde: $C\#$ = número corrente para o conduto (segundos); L = comprimento do canal (m); g = aceleração da gravidade (9,8 m/s²); D = profundidade no conduto ou canal (m); V = velocidade média no conduto ou canal (m/s); A = área da seção transversal do conduto ou canal (m²); T = largura do canal (m).

Se o menor $C\#$ igualar ou exceder DELT o programa usará somente um pequeno passo de tempo. Se o menor número de Courant $C\#$ for menor que DELT o programa, então, calculará o número do menor passo de tempo requerido para igualar DELT.

**ANEXO C – Pontos de controle utilizados no georeferenciamento da imagem
do satélite Ikonos para a bacia Alto da Colina.**

Tabela 30 - Pontos de controle utilizados no georreferenciamento da imagem do satélite Ikonos para a bacia Alto da Colina

Ponto	Coordenadas de tela		Coordenadas da carta		RMS
	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	
1	30,057	1308,152	233493,227	6711215,856	9,67
2	99,935	1026,732	233555,043	6710911,028	3,57
3	166,367	866,087	233619,479	6710741,801	4,28
4	699,640	483,064	234169,943	6710324,431	7,78
5	661,810	640,010	234124,292	6710495,201	4,57
6	444,754	635,106	233905,876	6710489,038	6,66
7	970,802	371,520	234437,788	6710205,318	2,88
8	1277,517	246,567	234754,812	6710069,819	6,88
9	1933,508	831,605	235447,520	6710642,568	3,80
10	1061,312	1049,136	234551,361	6710895,528	3,58
11	1102,745	819,421	234589,404	6710667,750	7,46
12	820,313	758,555	234296,328	6710606,099	2,99
13	1858,025	1100,707	235370,583	6710925,195	4,16
14	2068,921	1111,025	235584,036	6710917,929	8,49
15	2058,255	1690,711	235576,471	6711519,334	omitted
16	1783,926	1836,194	235312,550	6711684,286	2,02
17	1460,920	2014,560	234990,954	6711879,830	5,49
18	1690,487	1374,112	235205,130	6711204,842	5,06
19	311,943	933,298	233773,768	6710805,213	3,17
20	495,798	1291,747	233978,878	6711182,895	omitted
21	1458,300	1262,499	235054,818	6711105,080	omitted
RMS					5,56

**ANEXO D – Pontos de controle utilizados no georeferenciamento da imagem
do satélite Ikonos para a bacia Sítio do Tio Pedro**

Tabela 31 - Pontos de controle utilizados no georreferenciamento da imagem do satélite Ikonos para a bacia Sítio do Tio Pedro

Ponto	Coordendas de tela		Coordenadas da Carta		RMS
	X	Y	X	Y	
1	0,00	0,00	223065,00	6706833,82	0,889
2	9973,00	0,00	233037,06	6706833,82	1,625
3	0,00	10417,00	223065,06	6717249,79	1,199
4	9973,00	10417,00	233037,06	6717249,87	2,554
5	6912,77	6168,81	230000,00	6713000,00	7,476
6	4926,98	7197,39	228000,00	6714000,00	4,160
7	4926,87	4216,16	228000,00	6711000,00	omitted
8	3930,24	6191,20	227000,00	6713000,00	8,809
9	5911,30	5164,94	229000,00	6712000,00	omitted
10	4926,86	6188,34	228000,00	6713000,00	2,550
11	3930,66	5165,43	227000,00	6712000,00	omitted
12	5911,63	7196,94	229000,00	6714000,00	omitted
13	3930,16	7196,44	227000,00	6714000,00	1,929
14	3929,45	4215,61	227000,00	6711000,00	omitted
15	2920,45	6174,99	226000,00	6713000,00	3,052
RMS					4,263

ANEXO E – Dados das seções dos canais e canalizações para a bacia Alto da Colina

Neste anexo estão presentes os dados das canalizações e das seções irregulares utilizados na representação dos trechos nas simulações da bacia hidrográfica Alto da Colina.

Na tabela 32 são apresentadas as características das canalizações e na tabela 33 as características das seções transversais irregulares.

Tabela 32 – Características das canalizações da bacia Alto da Colina

Trecho	Tipo de Canal	Diâmetro (m)	Comprimento (m)
60	Circular	1,00	14,20
100	Circular	1,20	86,22
110	Circular	1,20	214,48
120	Circular	1,20	141,17

Tabela 33 – Coordenadas (x,y) das seções irregulares utilizadas para representação dos trechos da bacia Alto da Colina

Trechos							
10, 20 e 30		40, 50, 80 e 90		70		130 e 140	
X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
2,68	0,00	2,21	0,00	1,40	0,00	1,18	0,00
2,12	0,66	1,57	1,91	0,64	1,10	0,87	13,59
1,49	3,23	1,26	5,11	0,32	2,62	0,70	18,29
1,30	7,16	1,12	7,26	0,24	6,64	0,60	21,85
1,45	19,11	0,55	7,52	0,02	7,07	0,47	23,13
0,27	19,69	0,26	8,68	0,00	7,54	0,25	23,50
0,00	20,46	0,00	9,03	0,18	8,13	0,08	24,52
0,18	21,02	0,00	9,75	0,26	10,04	0,00	27,23
1,46	21,86	0,51	10,28	0,19	14,75	0,05	29,02
1,62	23,58	1,10	10,57	0,69	16,05	0,22	30,02
1,66	23,74	1,33	12,76	1,22	17,38	0,51	30,64
2,63	25,41	1,26	15,12	1,44	22,64	0,61	34,64
		1,39	34,60			1,28	66,89
		2,27	37,32				

**ANEXO F – Dados das seções dos canais e bueiros para a bacia Sítio do Tio
Pedro**

Neste anexo estão presentes os dados dos bueiros e das seções irregulares utilizados na representação dos trechos nas simulações da bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro.

Na tabela 34 são apresentadas as características dos bueiros e na tabela 35 as características das seções transversais irregulares.

Tabela 34 – Características dos bueiros da bacia Sítio do Tio Pedro

Trecho	Tipo de Bueiro	Diâmetro (m)	Comprimento (m)
50	Circular	1,00	11,80

Tabela 35 – Coordenadas (x,y) das seções irregulares utilizadas para representação dos trechos da bacia Sítio do Tio Pedro

Trechos							
10, 20, 30 e 40		60 e 70		80 e 90		100 e 110	
X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)	X (m)	Y (m)
1,80	0,00	1,25	0,00	0,94	0,00	1,45	0,00
1,54	2,29	1,20	1,64	0,70	1,22	1,21	0,92
1,07	3,38	0,83	2,73	0,24	2,35	0,50	2,03
0,26	3,94	0,18	4,48	0,02	2,86	0,68	4,19
0,00	4,81	0,00	5,67	0,00	3,33	0,59	5,60
0,02	5,00	0,00	6,81	0,14	3,72	0,29	6,44
0,72	5,80	0,79	7,73	0,35	4,32	0,00	6,84
1,52	6,40	1,75	8,10	0,35	4,88	0,00	7,14
1,79	7,43	2,40	11,11	1,16	5,07	0,02	7,65
				1,59	6,15	0,29	8,11
						0,58	8,72
						0,55	9,80
						0,87	10,95
						1,40	12,31
						1,40	12,33