

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

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO
KINEROS 2 PARA SIMULAÇÃO
HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM DUAS PEQUENAS
BACIAS HIDROGRÁFICAS.**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Giuliano Crauss Daronco

**Santa Maria, RS, Brasil
2008**

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO KINEROS 2
PARA SIMULAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM DUAS
PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS.**

por

Giuliano Crauss Daronco

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 a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil**

Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva

**Santa Maria, RS, Brasil
2008**

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

A Comissão Examinadora, abaixo-assinado,
aprova a Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO KINEROS 2 PARA
SIMULAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM DUAS PEQUENAS
BACIAS HIDROGRÁFICAS.**

elaborado por
Giuliano Crauss Daronco

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

COMISSÃO ORGANIZADORA:

Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva
(Presidente/Orientador – UFSM)

Prof. Dr. Cristovão Scapulatempo Fernandes (UFPR)

Profª. Drª. Daniela Guzzon Sanagiotto (UFSM)

Santa Maria, 31 de outubro de 2008

Aos meus pais, Leonel e Ivete
Aos meus irmãos Letícia e Leonardo

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo que sou.

Aos meus pais Leonel e Ivete, pelo carinho e incentivo nos meus estudos desde os primeiros anos de vida.

Aos meus irmãos Letícia e Leonardo, por serem meus irmãos.

A minha namorada, Camila, pelo incentivo, paciência e compreensão durante a realização deste trabalho.

Ao professor orientador João Batista Dias de Paiva, por ter permitido usufruir sua vasta experiência e sabedoria, numa orientação segura e precisa, em todos os momentos e pela cobrança que me foi essencial.

Ao meu amigo, Josué Marques Passini, pela colaboração e ajuda na criação do software para leitura dos arquivos de precipitações.

Ao Amigo Richarde Marques da Silva, pela inestimável ajuda em compreender o modelo.

A Leonardo Pereira e Silva, pela colaboração no entendimento dos planos e canais de escoamento.

À Fernanda Paiva, pela colaboração na reta final do trabalho.

Aos professores da Área de Recursos Hídricos da UFSM: pelos conhecimentos adquiridos e dedicação durante o curso.

Aos colegas de curso, pelo companheirismo e união durante o curso.

Por fim, agradeço a todos aqueles, que de alguma forma, contribuíram para a conclusão desta pesquisa.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO KINEROS 2 PARA SIMULAÇÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM DUAS PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS.

AUTOR: GIULIANO CRAUSS DARONCO
ORIENTADOR: PROF. DR. JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 31 de outubro de 2008.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar os parâmetros do modelo Kineros2 para as bacias hidrográficas periurbanas Alto da Colina II e Sítio do Tio Pedro, pequenas sub-bacias do rio Vacacaí-Mirim, em Santa Maria-RS, através da variação dos parâmetros envolvidos na calibração, buscando a melhor representação dos processos envolvidos no escoamento pluvial. As bacias Alto da Colina II e Sítio do Tio Pedro têm áreas de 1,44, e 0,39 km² e porcentagens de áreas impermeáveis de 3,82 e 13,09% respectivamente. A bacia Sítio do Tio Pedro foi discretizada em 10 elementos, sendo destes 7 planos e 3 canais. A bacia Alto da Colina II, por sua vez, foi discretizada em 22 elementos, sendo destes 15 planos e 7 canais. O enfoque principal do trabalho foi a calibração de eventos selecionados para as respectivas bacias e o entendimento dos parâmetros envolvidos nas simulações. Foram selecionados 5 eventos chuvosos para cada uma das duas bacias estudadas, correspondendo a eventos utilizados por Bastos (2007), obtidos de Belló (2004) e Carvalho (2003) para a avaliação do modelo SWMM. Foram utilizadas as características físicas e do uso e ocupação do solo obtidas por Bellinaso (2003) e Carvalho (2003). As seções transversais representativas dos trechos de arroio, foram obtidas de levantamento topográfico realizado por Meller (2004). 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 determinação médio entre os valores calculados e observados de 0,92 para a vazão e 0,78 para sedimentos totais. Na discretização aplicada à bacia hidrográfica Sítio do tio Pedro o coeficiente de determinação médio encontrado foi de 0,78 para a vazão e para sedimentos totais não se pode calcular o coeficiente de determinação devido às dimensões diminutas da bacia.

ABSTRACT

Master Dissertation
Program of Post-Graduation in Civil Engineering
Federal University of Santa Maria, RS state, Brazil

PARAMETERS ASSESSMENT OF THE KINEROS-2 MODEL FOR HYDROSEDIMENTOLOGICAL SIMULATION IN TWO SMALL CATCHMENT AREAS.

AUTHOR: GIULIANO CRAUSS DARONCO

ADVISOR: PROF. DR. JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA

Date and place of Dissertation Defense: Santa Maria, October, 31th 2008.

The aim of this research is to evaluate the parameters of Kineros-2 model to the periurban catchments areas Alto da Colina II and Sítio do Tio Pedro, two little catchments of Vacacai-Mirim river, in Santa Maria, RS state through the parameters variations involved in the calibration, trying to reach a better representation of the processes of the rainwater drainage. The catchments areas Alto da Colina II and Sítio do Tio Pedro are 1.44 km² and 0.39 km² as well as 3.82% and 13.09% of impermeable area respectively. The catchments area of Alto da Colina II was discretized in 22 elements, which were 15 flats and 7 canals. The catchments area of Sítio do Tio Pedro was discretized in 10 elements, which were 7 flats and 3 canals. The main focus of this work was the calibration of selected events to the respective catchments areas and the understanding of the parameters involved in the simulations. Five events rainy for each of the two catchments studied, corresponding to events used by Bastos (2007), obtained from Belló (2004) and Carvalho (2003) for the evaluation of the model SWMM. The physical characteristics and the use and occupancy of the soil were obtained from Bellinaso (2003) and Carvalho (2003). The cross sections representing stretches of stream, were obtained from survey conducted by MELLER (2004). The results obtained in the calibration of parameters were satisfactory. For the discretization adopted in the Alto da Colina II catchment has obtained an average coefficient of determination between the calculated and observed from 0.92 to 0.78 for flow and sediment totals. In discretization applied to the Sítio do Tio Pedro Catchment, the determination coefficient average of 0.78 was found to flow and sediment to total one can not calculate the determination coefficient because the small size of the catchment.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Características Físicas da Bacia Alto da Colina II.	57
TABELA 2 – Uso do Solo da Bacia Alto da Colina II.	60
TABELA 3 – Características Físicas da Bacia Sítio do Tio Pedro.	68
TABELA 4 – Uso do Solo da Bacia Sítio do Tio Pedro.	71
TABELA 5 – Áreas e Declividades da Bacia Alto da Colina II.	83
TABELA 6 – Estimativa para Propriedades Hidráulicas do Solo.	84
TABELA 7 – Valores finais para os parâmetros para a Bacia Alto da Colina II.	85
TABELA 8 – Valores do coeficiente de determinação obtidos na calibração dos eventos individuais e na simulação com os parâmetros médios.	91
TABELA 9 – Resultados da calibração da produção de sedimentos para a Bacia Alto da Colina II.	94
TABELA 10 – Valores do coeficiente de determinação obtidos na calibração dos eventos individuais e na simulação com os parâmetros médios.	97
TABELA 11 – Resultados da simulação da produção de sedimentos para a Bacia Alto da Colina II utilizando os valores médios dos parâmetros.	97
TABELA 12 – Áreas e Declividades da Bacia Sítio do Tio Pedro.	102
TABELA 13 – Estimativa para Propriedades Hidráulicas do Solo.	103
TABELA 14 – Resultados dos parâmetros para a Bacia Sítio do Tio Pedro.	104
TABELA 15 – Valores do coeficiente de determinação obtidos na calibração dos eventos individuais e na simulação com os parâmetros médios.	108
TABELA 16 – Resultados dos parâmetros para a Bacia Sítio do Tio Pedro.	109
TABELA 17 – Resultados da produção de sedimentos para a Bacia Sítio do Tio Pedro utilizando os valores médios dos parâmetros.	110

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Exemplo de um arquivo de entrada de chuva do modelo <i>Kineros2</i> (1990).	49
FIGURA 2 – Exemplo de um arquivo de entrada dos parâmetros do modelo <i>Kineros2</i> (1990).	50
FIGURA 3 – Localização da Bacia do Rio Vacacaí-Mirim com destaque para a Bacia do Arroio Vacacaí-Mirim.	53
FIGURA 4 – Mapa de Declividades da Bacia do Rio Vacacaí-Mirim, com destaque para a Bacia do Arroio Vacacaí-Mirim.	53
FIGURA 5 – Mapa de Usos do Solo da Bacia do Rio Vacacaí-Mirim, com destaque para a Bacia do Arroio Vacacaí-Mirim.	54
FIGURA 6 – Mapa de Tipos de Solo da Bacia do Rio Vacacaí-Mirim, com destaque para a Bacia do Arroio Vacacaí-Mirim.	54
FIGURA 7 – Localização da Bacia Alto da Colina II.	55
FIGURA 8 – Foto aérea da Bacia Alto da Colina II.	56
FIGURA 9 – Tipos de Solo da Bacia Alto da Colina II.	58
FIGURA 10 – Uso e Ocupação do Solo da Bacia Alto da Colina II.	59
FIGURA 11 – Uso e Ocupação do solo da Bacia Alto da Colina II.	60
FIGURA 12 – Declividades da Bacia Alto da Colina II.	61
FIGURA 13 – Mapa Planialtimétrico da Bacia Alto da Colina II.	62
FIGURA 14 – Localização da Bacia Sítio do Tio Pedro.	66
FIGURA 15 – Foto aérea da Bacia Sítio do Tio Pedro.	67
FIGURA 16 – Tipos de Solo da Bacia Sítio do Tio Pedro.	69
FIGURA 17 – Tipos de Solo da Bacia Sítio do Tio Pedro.	69
FIGURA 18 – Uso e Ocupação do solo da Bacia Sítio do Tio Pedro.	71
FIGURA 19 – Localização da Bacia Sítio do Tio Pedro na bacia do Arroio Vacacaí Mirim., com ênfase no uso solo	72
FIGURA 20 – Declividades da Bacia Sítio do Tio Pedro.	73
FIGURA 21 – Calhas de medição de sedimentos (STP).	76
FIGURA 22 – Calha 2 de medição de sedimentos (STP).	76
FIGURA 23 – Amostrador US-U-59 (ANA).	77
FIGURA 24 – Curvas de Nível da Bacia Alto da Colina II.	79

FIGURA 25 – Discretização da Bacia Alto da Colina II.	80
FIGURA 26 – Representação Esquemática da Discretização da Bacia Alto da Colina II.	80
FIGURA 27 – Granulometria do Material em Suspensão da Bacia Alto da Colina II.	82
FIGURA 28 – Calibração da Vazão para o Evento 05/06/2001 da Bacia Alto da Colina II.	86
FIGURA 29 – Calibração da Vazão para o Evento 13/11/2001 da Bacia Alto da Colina II.	87
FIGURA 30 – Calibração da Vazão para o Evento 15/11/2001 da Bacia Alto da Colina II.	87
FIGURA 31 – Calibração da Vazão para o Evento 25/03/2002 da Bacia Alto da Colina II.	88
FIGURA 32 – Calibração da Vazão para o Evento 19/07/2001 da Bacia Alto da Colina II.	88
FIGURA 33 – Simulação da Vazão para o Evento 05/06/2001 da Bacia Alto da Colina II, utilizando os valores médios dos parâmetros.	89
FIGURA 34 – Simulação da Vazão para o Evento 13/11/2001 da Bacia Alto da Colina II, utilizando os valores médios dos parâmetros.	89
FIGURA 35 – Simulação da Vazão para o Evento 15/11/2001 da Bacia Alto da Colina II,utilizando os valores médios dos parâmetros.	90
FIGURA 36 – Simulação da Vazão para o Evento 25/03/2002 da Bacia Alto da Colina II,utilizando os valores médios dos parâmetros.	90
FIGURA 37 – Simulação da Vazão para o Evento 19/07/2001 da Bacia Alto da Colina II,utilizando os valores médios dos parâmetros.	91
FIGURA 38 – Calibração da Produção de Sedimentos para o Evento 05/06/2001 da Bacia Alto da Colina II.	92
FIGURA 39 – Calibração da Produção de Sedimentos para o Evento 13/11/2001 da Bacia Alto da Colina II.	93
FIGURA 40 – Calibração da Produção de Sedimentos para o Evento 15/11/2001 da Bacia Alto da Colina II.	93
FIGURA 41 – Calibração da Produção de Sedimentos para o Evento 25/03/2002 da Bacia Alto da Colina II.	93

FIGURA 42 – Calibração da Produção de Sedimentos para o Evento 19/07/2001 da Bacia Alto da Colina II.	94
FIGURA 43 – Simulação da produção de sedimentos para o Evento 05/06/2001 da Bacia Alto da Colina II,utilizando os valores médios dos parâmetros.	95
FIGURA 44 – Simulação da produção de sedimentos para o Evento 13/11/2001 da Bacia Alto da Colina II,utilizando os valores médios dos parâmetros.	95
FIGURA 45 – Simulação da produção de sedimentos para o Evento 15/11/2001 da Bacia Alto da Colina II,utilizando os valores médios dos parâmetros.	96
FIGURA 46 – Simulação da produção de sedimentos para o Evento 25/03/2002 da Bacia Alto da Colina II,utilizando os valores médios dos parâmetros.	96
FIGURA 47 – Simulação da produção de sedimentos para o Evento 19/07/2001 da Bacia Alto da Colina II, utilizando os valores médios dos parâmetros.	96
FIGURA 48 – Curvas de Nível da Bacia Sítio do Tio Pedro.	99
FIGURA 49 – Discretização da Bacia Sítio do Tio Pedro.	100
FIGURA 50 – Representação Esquemática da Discretização da Bacia Sítio do Tio Pedro.	100
FIGURA 51– Granulometria do Material em Suspensão da Bacia Sítio do Tio Pedro.	101
FIGURA 52 – Calibração da Vazão para o Evento 22/05/2003 da Bacia Sítio do Tio Pedro.	105
FIGURA 53 – Calibração da Vazão para o Evento 24/07/2003 da Bacia Sítio do Tio Pedro.	105
FIGURA 54 – Calibração da Vazão para o Evento 12/11/2003 Bacia Sítio do Tio Pedro.	105
FIGURA 55 – Calibração da Vazão para o Evento 16/11/2003 Bacia Sítio do Tio Pedro.	106
FIGURA 56 – Calibração da Vazão para o Evento 08/12/2003 da Bacia Sítio do Tio Pedro.	106

FIGURA 57 – Simulação da Vazão para o Evento 22/05/2003 da Bacia Sítio do Tio Pedro, utilizando os valores médios de parâmetros.	107
FIGURA 58 – Simulação da Vazão para o Evento 12/11/2003 da Bacia Sítio do Tio Pedro, utilizando os valores médios de parâmetros.	107
FIGURA 59 – Simulação da Vazão para o Evento 16/11/2003 da Bacia Sítio do Tio Pedro, utilizando os valores médios de parâmetros.	107
FIGURA 60 – Simulação da Vazão para o Evento 08/12/2003 da Bacia Sítio do Tio Pedro, utilizando os valores médios de parâmetros.	108

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – Vazões Médias e Mínimas (jun/01 – mar/02) para a Bacia Alto da Colina II.	63
GRÁFICO 2 – Vazões Máximas (jun/01 – mar/02) para a Bacia Alto da Colina II.	63
GRÁFICO 3 – Dados Pluviográficos para a Bacia Alto da Colina II.	64
GRÁFICO 4 – Curva -chave de sedimento em suspensão para a descida da onda de cheia, para o Amostrador AMS-1, da bacia hidrográfica Alto da Colina II, Santa Maria RS.	65
GRÁFICO 5 – Curva -chave de sedimento em suspensão para a subida da onda de cheia, para Amostrador AMS-1, da bacia hidrográfica Alto da Colina II, Santa Maria RS.	65
GRÁFICO 6 – Vazões Médias e Mínimas (mar/03 – dez/03) para a Bacia Sítio do Tio Pedro.	74
GRÁFICO 7 – Vazões Máximas (mar/03 – dez/03) para a Bacia Sítio do Tio Pedro.	74
GRÁFICO 8 – Dados Pluviográficos para a Bacia Sítio do Tio Pedro.	75
GRÁFICO 9 – Curva -chave de sedimento em suspensão, para o Amostrador U-US-59 (ANA), da bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro, Santa Maria RS.	79

LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

<i>A</i>	Área de seção transversal do escoamento (m^2).
<i>a</i>	Coeficiente da relação entre vazão e profundidade do escoamento ou entre Vazão e área da secção transversal do canal.
<i>a</i>	Fator de erodibilidade do solo nos canais ($M.L.M^{-3/2}L^{-3/2}T^{-3}T^{-1}$).
C_D	Coeficiente de arrasto.
C_f	Coeficiente na equação de erosão devido ao impacto das gotas de chuva.
C_g	Coeficiente da taxa de transferência na erosão/deposição hidráulica (T^{-1}).
<i>c</i>	Coeficiente de amortecimento devido à lâmina d'água na equação de erosão por impacto das gotas de chuva.
C_m	Concentração de equilíbrio na capacidade de transporte de sedimentos ($L^3.L^{-3}$).
C_o	Coeficiente relacionado à coesão do solo.
C_s	Concentração de sedimentos.
C_s	Concentração de sedimentos no escoamento.
C_v	Coeficiente de variação da condutividade hidráulica efetiva do solo.
<i>d</i>	Tamanho característico dos sedimentos (L).
d_{50}	Diâmetro médio dos sedimentos.
f_c	Taxa de infiltração ($L.T^{-1}$).
<i>G</i>	Valor efetivo do potencial de capilaridade (L).
<i>g</i>	Aceleração da gravidade ($L.T^{-2}$).
<i>h</i>	Profundidade do escoamento (L).
<i>I</i>	Infiltração acumulada (L).
<i>i</i>	Intensidade de precipitação ($L.T^{-1}$).
<i>K</i>	Condutividade hidráulica do solo ($L.T^{-1}$).
K_i	Parâmetro de erodibilidade do solo pelo impacto das gotas de chuva ($M.T.L^{-4}$).
K_r	Parâmetro de erodibilidade do solo pelo escoamento superficial ($M.L.M^{-3/2}L^{-3/2}T^{-3}T^{-1}$).
K_s	Condutividade hidráulica saturada efetiva ($L.T^{-1}$).
<i>L</i>	Comprimento do plano (L).

L_c	Lâmina calculada (L).
L_o	Lâmina observada (L).
m	Expoente na relação entre vazão e profundidade do escoamento ou entre vazão e área da secção transversal do canal.
n	Coefficiente de rugosidade de Manning.
N_s	Parâmetro de sucção/umidade do solo (L).
Φ	Porosidade.
q	Fluxo de entrada lateral por unidade de comprimento do canal ou excesso de precipitação nos planos ($L.T^{-1}$).
Q	Vazão ($L^3.T^{-1}$).
Q_s	Entrada lateral de sedimentos no canal ($L^3.T^{-1}.L^{-1}$).
R	Raio hidráulico (L).
r	Taxa de entrada de água na superfície do solo durante a redistribuição de água ($L.T^{-1}$).
r_e	Excesso de precipitação ($L.T^{-1}$).
R_n	Número de Reynolds da partícula.
S_f	Declividade da linha de energia.
S_i	Saturação inicial relativa do solo.
S_o	Declividade do plano ou do fundo do canal.
S_s	Densidade relativa do sedimento.
t	Tempo (T).
t_p	Tempo de empoçamento (T).
T_w	Largura de topo do escoamento (L).
u	Velocidade média do escoamento ($L.T^{-1}$).
v_s	Velocidade de queda das partículas ($L.T^{-1}$).
W	Largura do plano (L).
x	Distância na direção do escoamento (L).
Z	Profundidade da frente de molhamento a partir da superfície (L).
γ	Peso específico da água ($M.L.T^{-2}.L^{-3}$).
ν	Viscosidade cinemática da água ($L^2.T^{-1}$).
δ	Coefficiente para cálculo da tensão de cisalhamento crítica.
Φ	Porosidade efetiva.
Ψ	Potencial mátrico do solo (L).
ζ_c	Tensão de cisalhamento crítica ($M.L.T^{-2}.L^{-3}$).
$\bar{\zeta}_c$	Tensão de cisalhamento crítica média ($M.L.T^{-2}.L^{-3}$).
ϵ_c	Coefficiente de deposição nos canais.

θ_i	Umidade inicial do solo.
ε_p	Coeficiente de deposição nos planos.
γ_s	Peso específico dos sedimentos (M.L.T ⁻² .L ⁻³).
θ_s	Umidade de saturação do solo.

SUMÁRIO

RESUMO	5
LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE GRÁFICOS	12
LISTA DE SIGLAS, SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	13
APRESENTAÇÃO	20
1 INTRODUÇÃO e OBJETIVOS	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Tópicos Importantes	23
2.1.1 Pequenas Bacias Hidrográficas	23
2.1.2 Infiltração	23
2.1.3 Escoamento superficial	24
2.1.4 Erosão do Solo e Produção de Sedimentos	25
2.1.5 Processos erosivos	26
2.1.6 Origem dos processos erosivos	27
2.1.7 Transporte Sólido	28
2.1.8 Transporte sólido nos cursos de água	29
2.1.9 Transporte de sedimentos em rios	29
2.2 Modelos Hidrossedimentológicos	29
2.3 Exemplos de Modelos Hidrossedimentológicos	30
2.3.1 Equação Universal de Perda de Solos (EUPS) – (Wichmeier e Smith – 1978, citado por Paiva (2003)	30
2.3.2 Equação Universal de Perda de Solos Modificada (EUPSM) – (Williams , 1975 citado por Paiva (2003)	31
2.3.3 Modelo IPH2-SED – (Goldenfum, 1991, citado por Paiva (2003)	31
2.3.4 Modelo LHANO e BARO – (LHANO e BARO, 1983)	32
2.3.5 KINEROS – Kinematic Runoff e erosion model – (Woolhiser, Smith e Goodrich, 1990)	32
2.3.6 KINEROS2 – Kinematic Runoff e erosion model – (desenvolvido pela USDA-ARS Southwest Watershed Research Center)	33
2.4 Trabalhos com o uso do Modelo Kineros2 (1990)	33

2.5 Sistema de Informações Geográficas e Modelagem Hidrológica	36
3 METODOLOGIA: MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 Modelo Utilizado na Pesquisa	39
3.2 Definição do Modelo Kineros2 (1990)	39
3.2.1 Componente de Infiltração	40
3.2.2 Fluxo nos Planos de Escoamento	42
3.2.3 Condições de Fronteira	43
3.2.4 Recessão e Microtopografia	44
3.2.5 Fluxo nos Canais de Escoamento	44
3.2.6 Modelagem da Erosão nos Planos e Canais de Escoamento	45
3.3 Dados de Entrada do Modelo Kineros2 (1990)	48
3.4 Parâmetros do Modelo Kineros2 (1990)	49
3.4.1 Parâmetros globais do modelo Kineros2 (1990)	49
3.4.2 Parâmetros dos Planos e Canais de Escoamento do Modelo Kineros2 (1990)	50
3.4.3 Estimativa dos parâmetros do modelo Kineros2 (1990)	51
4 ÁREA DE ESTUDO	52
4.1 Bacia do Rio Vacacaí-Mirim	52
4.1.1 Declividades da Bacia do Rio Vacacaí-Mirim	53
4.1.2 Uso e Ocupação do Solo da Bacia do Rio Vacacaí-Mirim	54
4.1.3 Tipos de Solo da Bacia do Rio Vacacaí-Mirim	54
4.2 Bacia ALTO DA COLINA II	55
4.2.1 Características Físicas da Bacia Alto da Colina II (ACII)	56
4.2.2 Clima e Solos (ACII)	57
4.2.3 Uso e Ocupação do Solo (ACII)	58
4.2.4 Características de Relevo do Solo (ACII)	61
4.2.5 Dados Fluvigráficos Disponíveis (ACII)	62
4.2.6 Dados Pluviográficos Disponíveis (ACII)	63
4.2.7 Dados de Sedimentos Disponíveis (ACII)	64
4.3 Bacia SÍTIO DO TIO PEDRO	66
4.3.1 Características Físicas da Bacia Sítio do Tio Pedro (STP)	67
4.3.2 Clima e Solos (STP)	68
4.3.3 Uso e Ocupação do Solo (STP)	70

4.3.4 Características de Relevo do Solo (STP)	72
4.3.5 Dados Fluviográficos Disponíveis (STP)	73
4.3.6 Dados Pluviográficos Disponíveis (STP)	75
4.3.7 Dados de Sedimentos Disponíveis (STP)	75
5 RESULTADOS	79
5.1 Bacia Alto da Colina II	79
5.1.1 Discretização da Bacia Alto da Colina II	79
5.1.2 Determinação dos Parâmetros do Modelo Kineros2 (1990)	81
5.1.3 Resultados dos parâmetros para a Bacia Alto da Colina II	84
5.1.4 Simulação do Escoamento Superficial e Erosão do Solo	85
5.1.5 Resultado da calibração do modelo para a Bacia Alto da Colina II	86
5.1.6 Simulação de vazão para a Bacia Alto da Colina II com os valores médios dos parâmetros	88
5.1.7 Resultado da calibração da Produção de Sedimentos para a Bacia Alto da Colina II	91
5.1.8 Simulação da Produção de Sedimentos para a Bacia Alto da Colina II com os valores médios dos parâmetros	95
5.2 Bacia Sítio do Tio Pedro	99
5.2.1 Discretização da Bacia Sítio do Tio Pedro	99
5.2.2 Determinação dos Parâmetros do Modelo Kineros2 (1990)	101
5.2.3 Resultados dos parâmetros para a Bacia Sítio do Tio Pedro	103
5.2.4 Simulação do Escoamento Superficial e Erosão do Solo	104
5.2.5 Resultado da calibração do modelo para a Bacia Sítio do Tio Pedro	104
5.2.6 Simulação de vazão para a Bacia Sítio do Tio Pedro com os valores médios dos parâmetros	106
5.2.7 Resultado da calibração da Produção de Sedimentos para a Bacia Sítio do Tio Pedro	108
5.2.8 Simulação da Produção de Sedimentos para a Bacia Sítio do Tio Pedro com os valores médios dos parâmetros	109
6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	110
7 CONCLUSÕES FINAIS	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi estruturado em tópicos independentes, com a finalidade de valorizar o mérito do tema da pesquisa.

No primeiro tópico, INTRODUÇÃO, foi exposto a importância do tema enumerando os objetivos.

O segundo tópico, REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, tratou do embasamento teórico em trabalhos anteriormente apresentados e em pesquisa de estudos realizados no âmbito da teoria crítica.

O terceiro tópico, METODOLOGIA, mostrou os processo de elaboração do trabalho e os materiais utilizados.

O quarto tópico, ÁREA DE ESTUDO, tratou da localização e da caracterização dos componentes físicos, bem como das informações coletadas nos trabalhos de campo e publicações.

O quinto tópico, RESULTADOS, mostrou os resultados obtidos no trabalho.

O sexto tópico, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS, teceu comparações dos resultados com trabalhos anteriormente realizados.

O sétimo tópico, CONCLUSÕES FINAIS, demonstrou diversas discussões, as quais aparecem ao longo do trabalho, com reflexões a partir daquilo que foi proposto enquanto objetivo do trabalho.

1 INTRODUÇÃO e OBJETIVOS

A questão da gestão da água na sociedade moderna vem despertando reações contraditórias há décadas, devido ao fato de muitas pessoas, confiantes na abundância do recurso, não se preocuparem com a quantidade de água disponível; Outras, mais esclarecidas, tinham consciência que o recurso é finito e que a quantidade disponível poderia não ser suficiente no futuro, pois estimativas indicam que até 2025, 50% da população mundial estará vivendo em áreas urbanas.

O aumento populacional ocorrido nas últimas décadas, verificado em praticamente todo o planeta, gerando vários efeitos para o meio ambiente, entre eles destaca-se o aumento das cheias, que vem ocorrendo com maior frequência nos grandes centros. Ocorre devido à grandes áreas, antes permeáveis, passarem a ser impermeáveis, tornando-se produtoras de escoamento superficial adicional, acarretando diversos problemas em locais mais a jusante. Combinado com a prática cada vez mais comum e sem critério da canalização de rios e córregos, resulta no aumento de frequência de cheias e alagamentos, causando grandes prejuízos materiais.

O elevado crescimento populacional das áreas urbanas tem acelerado a implantação de novos loteamentos, na maioria das vezes de forma não planejada. Essa ocupação desordenada da área periurbana tem desencadeado diversos problemas erosivos. Atualmente diversos são os estudos que enfatizam aplicações da modelagem hidrológica em bacias hidrográficas, porém poucos trabalhos vem sendo feitos tratando a previsão hidrossedimentológica.

Segundo Silva (2005), a previsão hidrossedimentológica é de grande valia para o conhecimento do gerenciamento dos recursos hídricos de bacias periurbanas, pois auxiliam na simulação de diversos processos, como:

1. simulação das vazões efluentes de reservatórios para o abastecimento urbano;
2. avaliar possíveis riscos de enchentes em zonas urbanas.

O estudo e 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 com a população.

Esta pesquisa foi desenvolvida como parte das atividades do Grupo de

Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (GHIDROS) da Universidade Federal de Santa Maria, na Bacia Hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim, iniciadas em 1993. Utilizou informações de trabalhos anteriores realizados em duas pequenas bacias hidrográficas periurbanas de características distintas, uma de área plana, a Bacia Alto da Colina II, e outro de encosta, a Bacia Sítio do Tio Pedro, com diferentes graus de urbanização, onde se dispõe de uma pequena base de dados medidos de chuva, vazão e sedimentos. Nas bacias estudadas, foram realizados trabalhos de caracterização do meio físico e coleta de dados de chuva, vazão e sedimentos, por Bellinaso (2003), Carvalho (2003), Belló (2004) e Meller (2004). Meller (2004) aplicou o Modelo Mouse na Bacia Alto da Colina II, obtendo bons resultados na previsão de vazões. Bastos (2007), utilizando dados de Carvalho (2003), Bellinaso (2003) e Belló (2004) aplicou o Modelo SWMM, nas duas bacias, obtendo bons resultados para a simulação de hidrogramas. Neste trabalho, foram utilizados os mesmos dados utilizados por Bastos (2007), para avaliar a eficiência do Modelo **Kineros2 (1990)** na previsão de vazões e sedimentos.

A motivação para a realização deste trabalho foi o fato de que se observa, no Brasil, uma crescente utilização do **Kineros2 (1990)** para prever a resposta hidrossedimentológica de bacias hidrográficas. No entanto, salvo raras exceções, esses trabalhos são realizados sem a necessária calibração da resposta do modelo em termos de previsão de sedimentos. É comum verificar-se uma boa calibração em termos de vazões líquidas e nenhuma calibração em termos de vazões sólidas, sob a alegação de falta de dados sedimentológicos. Aliado a isso, o fato de se dispor de alguns eventos de chuva, vazão e sedimentos nas bacias escolhidas, nas quais já foram realizados estudos com outros modelos, permitindo comparações ainda que de resultados de simulação de vazões, contribui para a escolha da área objeto de estudo.

Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho foi analisar os parâmetros de calibração do modelo **Kineros2 (1990)**, como elemento para compreensão dos processos envolvidos na estimativa da resposta hidrossedimentológica em eventos de cheias em pequenas bacias periurbanas utilizando dados de monitoramento hidrossedimentológico de duas pequenas bacias, de características distintas, em Santa Maria – RS.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo, é dada uma atenção especial à alguns aspectos importantes para a fundamentação teórica deste trabalho. Dentre os temas pesquisados e revisados na literatura, são abordados os seguintes:

1. Tópicos Importantes;
2. Modelos Hidrossedimentológicos;
3. Exemplos de Modelos Hidrossedimentológicos;
4. Trabalhos com o uso do Modelo *Kineros2 (1990)*;
5. Sistema de Informações Geográficas e Modelagem Hidrológica;

2.1 Tópicos Importantes

2.1.1 Pequenas Bacias Hidrográficas

Segundo Carvalho (2003), uma bacia hidrográfica é considerada pequena se apresenta algumas ou todas das seguintes propriedades:

- A precipitação pode ser considerada como uniformemente distribuída no espaço, sobre toda a bacia;
- A duração das tormentas geralmente excede o tempo de concentração da bacia;
- A geração de água e sedimento se dá principalmente pelo escoamento nas vertentes;

2.1.2 Infiltração

A infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo. É um processo que depende fundamentalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da superfície e das quantidades de água e ar inicialmente presentes no interior do solo (Tucci, 1998).

À medida que a água infiltra pela superfície, as camadas superiores do solo vão se umedecendo de cima pra baixo, alterando gradativamente o perfil de

umidade. Enquanto há entrada de água, o perfil de umidade tende à saturação.

Normalmente as precipitações naturais não são capazes de saturar todo o solo, saturando em geral apenas as camadas próximas à superfície, formando um perfil típico onde a umidade do solo decresce com a profundidade.

2.1.3 Escoamento superficial

O escoamento superficial é o resultado da interação da precipitação com a bacia hidrográfica. Geralmente é modelado propagando-se o excesso de precipitação, definido como sendo a diferença entre a intensidade de precipitação e a capacidade de infiltração do solo.

Em regiões úmidas, o principal mecanismo de geração de escoamento ocorre devido à elevação do lençol subterrâneo.

A modelagem do escoamento superficial em bacias hidrográficas é baseada na resolução de equações diferenciais parciais que descrevem o fluxo e a profundidade do nível de água como funções do tempo e do espaço. Estas equações são conhecidas como equações de Saint-Venant, as quais são formadas pela equação da continuidade e pela equação de quantidade de movimento.

As suposições básicas para o desenvolvimento dessas equações são (Chow et al., 1988):

- (a) o escoamento é unidimensional e gradualmente variado;
- (b) a declividade do canal é pequena e o seu leito é fixo;
- (c) os coeficientes de resistência para fluxo permanente e uniforme podem ser utilizados;
- (d) o fluido é incompressível e a massa específica é constante.

A equação da continuidade possui a seguinte forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

onde Q é a vazão (m^3/s), A é a área da seção transversal do canal (m^2), q é a entrada de fluxo lateral (m^2/s), x é a coordenada espacial (m) e t é a coordenada

temporal (s).

A equação da quantidade de movimento apresenta a seguinte forma:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = q$$

onde y é a profundidade do fluxo (m), g é a aceleração da gravidade, S_0 é a declividade do fundo do canal e S_f é a declividade da linha de energia. As outras variáveis já foram descritas anteriormente. Os termos a partir da esquerda na equação da quantidade de movimento representam, respectivamente, a aceleração local do fluido, aceleração convectiva do fluido, a força devido à pressão e a força devido à inércia e ao cisalhamento.

Quando na modelagem do escoamento superficial consideram-se todos os termos da equação da quantidade de movimento, o modelo é classificado como hidrodinâmico. Quando os termos que representam as acelerações do fluido são desprezados, o modelo é dito de difusão. Os modelos são classificados como cinemáticos quando são desprezados os termos que representam as acelerações do fluido e a pressão, ou seja, assumem que a declividade da linha de energia é igual à declividade do fundo do canal, sendo assim, as forças devido ao cisalhamento no fluido e devido ao peso do fluido estão equilibradas.

2.1.4 Erosão do Solo e Produção de Sedimentos

A erosão do solo constitui um dos processos naturais que mais degradam o meio ambiente. Dentre os vários impactos causados pela erosão, tem-se: destruição das nascentes dos rios, aumento do risco de desertificação, remoção da camada fértil de zonas agrícolas.

Atualmente existem diversas fórmulas para a modelagem do processo de erosão do solo, cada uma tendo sido desenvolvida em condições específicas de escoamento e de características dos sedimentos. As taxas de erosão calculadas utilizando essas diferentes fórmulas para prever a produção de sedimentos variam significativamente. Logo, a escolha correta de uma dessas fórmulas para prever a

produção de sedimentos é uma tarefa bastante difícil (Alonso et al., 1981).

A produção de sedimentos compreende os processos de desagregação, transporte e deposição dos sedimentos. A desagregação diz respeito ao desprendimento de partículas sólidas do meio de que fazem parte, devido principalmente ao impacto das gotas de chuva, além de outros fatores, tais como: reações químicas, flutuação de temperatura e ações mecânicas. O material erodido ficará exposto à ação do vento ou do escoamento superficial ou mesmo a ação de outras chuvas, disponível para ser transportado. O impacto das gotas de chuva é, após a ação do homem, o fator que mais contribui para a erosão. O transporte através da água pode acontecer de várias maneiras, dependendo do escoamento e das características das partículas. Partículas pesadas são transportadas por deslizamento, rolamento ou saltos. Partículas muito leves são transportadas em suspensão no interior do fluxo e constituem a carga de lavagem (Simons e Sentürk, 1992). A deposição acontece quando a quantidade de partículas presente no fluxo é maior que a capacidade que o escoamento possui para transportar a massa sólida. Ela geralmente acontece em deltas de rios e em áreas onde a velocidade do escoamento é bastante reduzida. Essa concentração de sedimentos em equilíbrio no escoamento superficial é denominada de capacidade de transporte de sedimentos.

2.1.5 Processos erosivos

A energia gerada pelo impacto das gotas de chuva e a energia gravitacional são forças combinadas que formam os processos erosivos, que modificam e modelam a superfície terrestre.

O processo erosivo causado pela água das chuvas tem abrangência em quase toda a superfície terrestre, em especial nas áreas com clima tropical, onde as intensidades são bem mais elevadas do que em outras regiões do planeta. Além disso, em muitas dessas áreas, as chuvas concentram-se em certas estações do ano, o que agrava ainda mais a erosão do solo. O processo é acelerado pelo desmatamento para a exploração de madeira e/ou para a produção agrícola, uma vez que os solos ficam desprotegidos da cobertura vegetal e, conseqüentemente, as chuvas incidem diretamente sobre a superfície do terreno. (Guerra et al., 1999).

2.1.6 Origem dos processos erosivos

Diversas podem ser as atuações dos processos erosivos, podendo ser citados:

- processos móveis (antrópicos); rios, ventos, marés, enxurradas - ocorre o transporte imediato do material.
- processos imóveis (natural); intemperismo - processo gradual e lento.

Em locais onde os solos são mais susceptíveis e desprotegidos favorecem a aceleração de tais processos, nestes casos a erosão superficial é responsável pelo arraste de um volume considerável de solo para o interior das calhas de rios.

Segundo Belló (2004), o processo erosivo inicialmente se manifesta no solo, particularmente nas áreas sem proteção vegetal, através da água da chuva, desagregando suas partículas, onde os filetes de água têm força suficiente para arrastar as partículas que foram soltas.

A água ao escorrer encosta abaixo pode provocar a lavagem da superfície do solo ou até mesmo remover camadas mais espessas do solo.

Mutchler & Young (1975) appud Belló (2004), concluíram que o impacto das gotas de água tem maior poder erosivo, quando a superfície do solo é coberta por uma lâmina de água de espessura entre 0,14 e 0,20 do diâmetro da gota e é insignificante, quando a espessura ultrapassa cerca de três vezes o diâmetro da gota.

A intensificação do escoamento superficial concentrado em determinados pontos pode causar os seguintes resultados:

- sulcos: pequenas saliências com largura e profundidade inferiores a cinquenta centímetros.
- calhas: Pouco profundas como os sulcos e com largura inferior a cinco metros, caracterizam-se por bordas suaves.
- ravinas: agravamento dos sulcos.

2.1.7 Transporte Sólido

O transporte sólido nos cursos de água pode ser feito, basicamente, de duas formas :

- suspensão na massa líquida;
- arrastamento no fundo.

No transporte em suspensão, as partículas sólidas são transportadas pelas componentes horizontais das velocidades do fluxo turbulento, suportadas pelas componentes verticais destas velocidades, sem contato com o leito do curso d'água, essas partículas formam a carga sólida em suspensão.

No transporte por arrastamento, as partículas sólidas rolam ou escorregam longitudinalmente no curso d'água, praticamente não perdendo contato com o leito deste. Essas partículas formam a carga sólida de arrasto. (Carvalho 1993).

As partículas sólidas sofrem a influência de várias forças atuantes, o que torna muito complicada a análise da capacidade e forma do transporte de sedimentos.

Conforme descrito por Tucci (1998), capacidade de transporte refere-se à quantidade máxima de sólido que um escoamento à superfície livre pode transportar. Não deve ser confundida com a competência do escoamento, a qual designa o maior tamanho das partículas sólidas que esse pode carrear. O ciclo sedimentológico é acionado pela energia que dispõe a água em movimento.

Os principais fatores que afetam a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica são:

- Precipitação – quantidade, intensidade e frequência;
- Tipo de solo e formação geológica;
- Cobertura do solo;
- Uso do solo;
- Topografia;
- Natureza da rede de drenagem – densidade, declividade, forma, tamanho e conformação de canais;
- Escoamento superficial;

2.1.8 Transporte sólido nos cursos de água

O deslocamento e o transporte do sedimento dependem da forma, tamanho, peso da partícula, e das forças exercidas pela ação do escoamento. Quando estas forças se reduzem e não conseguem deslocar a partícula, ocorre o processo de deposição.

2.1.9 Transporte de sedimentos em rios

Por ocasião do transporte e deposição de sedimentos em canais e rios, pode-se constatar que estes trazem grandes transtornos quanto a qualidade da água para uso humano, como também na redução da capacidade de suporte do leito. Grande parte do transporte de sedimentos em rios ocorre em períodos chuvosos principalmente durante as fortes precipitações.

2.2 Modelos Hidrossedimentológicos

Paiva (2003) afirma que os modelos hidrossedimentológicos podem classificar-se quanto a estrutura, em empíricos e conceituais. Os modelos empíricos utilizam relações empíricas simples, com interesse em estudos preliminares e estimativas grosseiras, tentam relacionar concentração e vazão e não podem prever sempre a variação da qualidade das águas superficiais e o impacto das mudanças das práticas agrícolas na qualidade das águas. Os modelos conceituais equacionam os processos de transformação e o transporte de poluentes na bacia vertente. As equações são de derivadas parciais, por representar o escoamento da água e o transporte de poluentes associado.

Quanto à escala, os modelos são separados com respeito à capacidade de representar as heterogeneidades do clima, relevo, solo, vegetação e ocupação do solo na bacia vertente. Os modelos globais consideram a bacia vertente como uma unidade homogênea em toda a sua superfície, não considerando os processos de transformação e transporte. Os limites de aplicação são muito variáveis, podendo-se encontrar valores de 5 km² a 500 km². Os modelos distribuídos dividem a bacia vertente em unidades homogêneas de características uniformes, que são simuladas

por um modelo global. Uma função de transferência da água e dos sedimentos assegura a propagação da resposta. Este tipo de modelo não tem limite de área.

2.3 Exemplos de Modelos Hidrossedimentológicos

2.3.1 Equação Universal de Perda de Solos (EUPS) – (Wichmeier e Smith – 1978, citado por Paiva (2003))

É um modelo de erosão, destinado a calcular a perda de solo média, em períodos longos, proveniente da erosão laminar e por sulcos. Não prevê deposição e não computa produção de sedimento por ravina e erosão das margens e fundo do canal. O maior propósito desta equação é como guia sistemático no planejamento da conservação do solo.

Não é recomendada para prever perda de solo de eventos específicos, prevê perda de solo média de eventos, no caso a perda de solo de um evento único pode diferir largamente na média, devido à flutuação aleatória do tempo.

A equação universal de perda de solos é baseada na equação abaixo que calcula a perda de solo de uma parcela:

$$A = R.K.LS.C.P$$

Onde:

A: perda de solo, t/(ha.ano);

R: fator energético da chuva, Mj.mm/(ha.h);

K: fator de erodibilidade do solo, t.h/(Mj.mm);

LS: fator conjunto de comprimento e grau de declive;

C: fator de uso e manejo do solo;

P: fator de práticas conservacionistas.

Para a entrada são necessários:

- dados de pluviógrafo,
- razão de perda de solo entre área cultivada
- área continuamente descoberta, obtida por tabelas,
- cobertura do solo,
- seqüência de manejo,

- práticas conservacionistas,
- dimensões da parcela,
- tipo de solo,
- percentagem de matéria orgânica,
- permeabilidade e estrutura do solo.

O resultado da aplicação é determinada a perda de solo por unidade de área para o período selecionado. Normalmente é dada em t/ha/ano.

2.3.2 Equação Universal de Perda de Solos Modificada (EUPSM) – (Williams , 1975 citado por Paiva (2003))

Modificação da Equação Universal da Perda de Solo (EUPSM.) através da substituição do fator de energia (R) para um fator de escoamento, com a finalidade de prever a deposição. Quando a deposição ocorre, a produção de sedimentos é altamente correlacionada com as características do escoamento, uma vez que o escoamento controla a capacidade de transporte de sedimentos, que é relacionada a carga de sedimentos. Deve ser aplicada a eventos de chuvas individuais.

Devem ser usados dados de entrada iguais aos da EUPS, com exceção dos dados de pluviógrafos, que devem ser substituídos por dados de linígrafos, para determinação da vazão de pico e volume de escoamento superficial.

2.3.3 Modelo IPH2-SED – (Goldenfum, 1991, citado por Paiva (2003))

O modelo IPH2-SED é uma adaptação do modelo IPH-II, para permitir a predição de valores de perda de solos em eventos de pequenas bacias rurais através da EUPSM. Ele inclui como opção a Metodologia do Soil Conservation Service para o cálculo do hidrograma de cheia, possibilitando a sua utilização em bacias com carência de dados. É caracterizado por dois sub-modelos principais: um modelo hidrológico e um modelo de erosão.

Quando houver dados suficientes para ajuste e verificação usa-se o modelo IPH-II para cálculo de vazões e volumes, na inexistência destes dados usa-se a

metodologia do Soil Conservation Service. Após o cálculo de vazões e volumes, é estimada a produção de sedimentos pela EUPSM.

Desenvolvido por Tucci et al (1983), o modelo IPH II apresenta poucos parâmetros, e é aplicável em bacias que não necessitem de propagação no leito do rio. O modelo possui três algoritmos básicos: propagação dos escoamentos superficial e subterrâneo, evaporação e interceptação e separação dos escoamentos.

2.3.4 Modelo LHANO e BARO – (LHANO e BARO, 1983)

Modelo conceitual, distribuído, de intervalo diário ou por evento, necessita de calibração para ser aplicado. Através deste modelo pode-se calibrar qualitativamente e quantitativamente a erosão hídrica de bacias hidrográficas, sejam pequenas e homogêneas ou grandes e heterogêneas.

A metodologia requer o uso da EUPS para determinar a erosão e requer o uso da EUPSM para quantificar as saídas de sedimentos das bacias.

2.3.5 KINEROS – Kinematic Runoff e erosion model – (Woolhiser, Smith e Goodrich, 1990)

Modelo semi-conceitual, orientado a evento, descreve os processos de interceptação, infiltração, escoamento superficial e erosão em pequenas bacias urbanas e rurais. A bacia é representada por uma cascata de planos e de canais; as equações diferenciais parciais que descrevem o fluxo nos planos, o fluxo nos canais, a erosão e o transporte do sedimento são resolvidas pelo método das diferenças finitas. A variação espacial da precipitação, da infiltração, do escoamento, e dos parâmetros da erosão pode ser considerada. Este modelo pode ser usado para determinar os efeitos, no hidrograma e no sedimentograma de uma seção qualquer, de possíveis mudanças nas características da bacia, tais como: urbanização de uma área, construção de reservatórios, desmatamento, etc.

2.3.6 KINEROS2 – Kinematic Runoff e erosion model – (desenvolvido pela USDA-ARS Southwest Watershed Research Center)

Evolução do modelo KINEROS (Woolhiser, Smith e Goodrjch, 1990), com as seguintes alterações:

- Infiltração
O algoritmo de infiltração trabalha com um perfil de duas camadas de solo e incorpora um novo método, baseado na física do solo, para redistribuir a água do solo durante períodos de estiagem.
- Sedimentos
Solos e sedimentos são caracterizados por uma distribuição de até cinco classes de diâmetro das partículas, em vez de uma única partícula tamanho médio.
- Composição dos canais.
O algoritmo dos canais foi estendido para permitir uma composição de seções transversais com nível da linha de energia elevado, onde os parâmetros de infiltração e hidráulica podem diferir dos dados da seção principal.

O modelo ***Kineros2 (1990)*** será melhor descrito no capítulo 3.

2.4 Trabalhos com o uso do Modelo ***Kineros2 (1990)***

Lopes (2003), aplicou o modelo ***Kineros2 (1990)***, em três subbacias da Bacia Representativa de Sumé, para determinar os efeitos de escala na modelagem hidrossedimentológica na região semi-árida do estado da Paraíba. Concluiu que os dois modelos simulam bem o escoamento superficial e razoavelmente bem a produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas da região semi-árida.

Silva (2005), aplicou o modelo ***Kineros2 (1990)*** na Bacia do Rio Pirapama, na Região Metropolitana do Recife – RMR e Zona da Mata Pernambucana, para desenvolvimento do trabalho “Previsão Hidrossedimentológica numa Bacia Periurbana Através do Acoplamento de Modelos Climáticos e Hidrológicos”, obtendo bons resultados para a previsão de vazões líquidas. Os resultados da previsão de sedimentos não foram comparados com dados observados, segundo o autor, devido a deficiência de dados sedimentológicos na região nordeste do Brasil.

Pereira e Silva (2007), realizou o trabalho denominado “Modelagem e Geoprocessamento na Identificação de Áreas com Risco de Inundação e Erosão na Bacia do Rio Cuiá, com a aplicação do modelo ***Kineros2 (1990)***. A bacia hidrográfica do Rio Cuiá está inserida no município de João Pessoa, com uma área de aproximadamente 40 km² com valores altimétricos que variam de 0 até 60 m. Sua conclusão foi que a aplicação do modelo ***Kineros2 (1990)*** é viável e pode ser usado também na simulação de eventos contínuos de chuva-vazão em bacias hidrográficas.

Pereira e Silva (2007), analisou apenas dados de produção total de sedimentos, não efetuou uma análise de correlação de dados de vazão através do modelo ***Kineros2 (1990)***. Para os dados de sedimentos totais, Pereira e Silva (2007) não fez comparações com dados observados, alegando a inexistência dos mesmos na região Nordeste do Brasil.

Paiva (2008) utilizou o modelo ***Kineros2 (1990)*** em seu trabalho denominado “Estudo Comparativo entre Três Modelos de Base Física na Modelagem Hidrossedimentológica em microbacias na Região Semi-Árida Paraibana”.

No trabalho, Paiva (2008) utilizou dados de bacias experimentais do Rio Sumé, no município de Sumé, estado da Paraíba.

Concluiu que o modelo mostrou-se bastante confiável com resultados robustos, tanto para o escoamento superficial como para a produção de sedimento, em nível da região semi-árida paraibana;

Green et al (1999), da Kansas State University, efetuou o trabalho denominado “UTILIZATION OF THE KINEMATIC RUNOFF AND EROSION MODEL

IN PREDICTING THE EFFECTS OF VEGETATION ON HEAVY METAL CONTAINMENT ON SOUTHEAST KANSAS”, com a aplicação do modelo **Kineros2 (1990)** e do modelo AGNPS :

Green et al (1999) analisou uma bacia de 800 hectares, à oeste da cidade de Galena, Kansas nos Estados Unidos da América. A bacia foi discretizada em 39 segmentos. Através do modelo **Kineros2 (1990)** procurou-se simular a diferença de transporte de sedimentos em regiões com cobertura vegetal e em regiões com ausência de cobertura vegetal.

Foram usados eventos de precipitação com tempo de retorno de 2 anos, 10 anos e 50 anos. O modelo **Kineros2 (1990)** retornou um decréscimo de apenas 8% para eventos com tempo de retorno de 2 anos para as diferentes áreas.

Kalin et al (2003), USEPA, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, EUA, efetuou o trabalho “EFFECT OF GEOMORPHOLOGIC RESOLUTION ON MODELING OF RUNOFF HYDROGRAPH AND SEDIMENTOGRAPH OVER SMALL WATERSHEDS”, aplicando o modelo **Kineros2 (1990)** .

Para o estudo, Kalin et al (2003) utilizou duas bacias experimentais denominadas “W-2” e “W-3”, sendo a bacia “W-2” com aproximadamente 33 ha e a bacia “W-3” com 42 ha. As duas bacias escolhidas possuem características semelhantes com encostas com desnível de 2% a 4%. O solo predominante é Siltoso com superfícies muito propensas à erosão.

Para a calibração da bacia “W-2” foram usados 40 eventos e para a bacia “W-3” foram usados 12 eventos.

Para quantificar numericamente a eficácia do modelo usou-se o índice R_N^2 Nash and Sutcliffe (1970), definido por:

$$R_N^2 = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2}$$

Sendo:

$$F_0^2 = \sum (q - \bar{q})^2$$

e

$$F^2 = \sum (d - q)^2$$

Onde: F^2_0 é a variação inicial, F^2 o índice de dispersão. As quantidades q e q^1 são respectivamente as vazões observadas e computadas e \bar{q} é a média das vazões observadas.

Na simulação de escoamentos encontrou-se R^2_N médio de 0,64 para a bacia “W-2” e 0,48 para a bacia “W-3”.

Na simulação de produção de sedimentos, o índice R^2_N médio para a bacia “W-2” foi de 0,38 e 0,54 para a bacia “W-3”.

Kalin et al (2003) considerou satisfatórios os resultados obtidos com o modelo ***Kineros2 (1990)***.

2.5 Sistema de Informações Geográficas e Modelagem Hidrológica

A modelagem hidrológica das alterações em bacias hidrográficas é um problema complexo, e uma questão que vem preocupando os responsáveis pelo gerenciamento dos recursos naturais na bacia. O desenvolvimento de modelos hidrológicos distribuídos tem conduzido a significativas melhorias nas simulações hidrológicas, uma vez que a análise pode ser realizada do ponto de vista espacial.

A incorporação de modelos hidrológicos em um sistema de informações geográficas (SIG) auxilia na interpretação dos resultados do modelo, sendo assim uma ferramenta poderosa no cruzamento de informações espaciais (vetoriais) e tabulares de uma forma objetiva e eficiente, economizando tempo e gastos desnecessários.

A utilização de uma ferramenta SIG constitui hoje um instrumento de grande valia para o estabelecimento de planos integrados de uso e ocupação do solo e da água, seja no meio rural ou urbano.

O SIG foi desenvolvido com o objetivo de apoiar as funções operacionais, gerenciais e, mais recentemente, de auxiliar à tomada de decisão. Nesse sentido, o acoplamento de modelos hidrológicos e o SIG tem contribuído amplamente na predição, no planejamento e também no gerenciamento do controle da erosão, ajudando no processo de tomada de decisão (Cruz Júnior et al., 1999; Rufino et al., 2003).

Ramirez (1994) divide as aplicações do SIG em cinco categorias principais:

- a) **Uso de recursos naturais** – controle do extrativismo vegetal e mineral; classificação de poços petrolíferos; planejamento de gasodutos e oleodutos; distribuição de energia elétrica; identificação de mananciais e gerenciamento costeiro e marítimo.
- b) **Meio ambiente** – controle de queimadas; estudos de modificações climáticas; acompanhamento de emissão e ação de poluentes e gerenciamento florestal de desmatamento e reflorestamento.
- c) **Atividades econômicas** – planejamento de *marketing*; pesquisas sócio-econômicas; distribuição de produtos e serviços, e transporte de matéria-prima.

A principal vantagem na utilização do SIG reside na possibilidade de se estudar diferentes cenários com um baixo custo e de forma rápida. O acoplamento de modelos hidrológicos com o SIG não é uma integração recente e nos últimos anos tem aumentado consideravelmente.

Desde o desenvolvimento do modelo *Stanford Watershed* em 1966, inúmeros modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos usando as bacias periurbanas como uma unidade espacial fundamental para descrever os vários componentes do ciclo hidrológico, tanto em escalas temporal e espacial (Semmens et al., 2000). Nas últimas décadas, modelos de chuva-vazão-erosão têm sido utilizados cada vez mais na investigação das mudanças climáticas e nos impactos do uso e ocupação do solo sobre a produção de sedimentos e o escoamento superficial em bacias periurbanas.

Numerosos estudos têm descrito o uso de SIG na modelagem hidrológica, alguns estudos enfatizam a importância destas aplicações para o desenvolvimento de novas técnicas no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos (Maidment, 1993; Saghafian et al., 2000).

Pullar e Springer (2000) também realizaram aplicações de modelos hidrológicos com modelos digitais do terreno. No mesmo estudo testaram a integração do SIG e vários modelos ambientais para bacias hidrográficas. Concluíram que o acoplamento de modelos hidrológicos e o SIG é possível e traz resultados significativos, pois pode ajudar nos processos de apoio à decisão.

Jain e Dolezal (2000) aplicaram o modelo EPIC - *Environmental Productivity Impact Calculator*, um modelo semi-empírico que usa parâmetros distribuídos num SIG, para estimar os processos de erosão em dezoito sub-bacias da bacia do rio Cernici, inserida na região da Boêmia Central, República Tcheca. Alguns dados de

entrada para o EPIC, como áreas, elevações, comprimentos e declividades são preparados usando um sistema de informações geográficas, os demais são preparados fora do ambiente SIG e importados para a realização da simulação hidrológica.

Imagens de sensores remotos e técnicas de geoprocessamento também vêm sendo empregadas freqüentemente em estudos de modelagem hidrológica, e em estudos geoambientais. Shrimali et al. (2001), por exemplo, realizaram o diagnóstico da susceptibilidade da erosão do solo na bacia do Lago Sukhna, nordeste da Índia, usando imagens de satélite e técnicas de geoprocessamento para o tratamento dos resultados.

Lacroix et al. (2002) apresentaram a comparação dos resultados obtidos da modelagem hidrológica para a bacia do rio Creek, localizada no Estado de Yukon, Canadá, utilizando o modelo hidrológico semi-distribuído denominado de SLURP – *Semi-distributed Land Use- based Runoff Processes* através de técnicas de análise digital do terreno.

Kalin et al. (2003) estimaram a vazão e a produção de sedimentos através do acoplamento entre o modelo ***Kineros2 (1990)*** – *Kinematic Runoff Erosion Model* e o Arcview em duas pequenas bacias experimentais da USDA – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, através do uso de técnicas de geoprocessamento como sobreposição de mapas físicos da bacia para a obtenção de sua rede de fluxo, delineamento da bacia e declividade.

3 METODOLOGIA: MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Modelo Utilizado na Pesquisa

O modelo utilizado nesta pesquisa foi o modelo ***Kineros2 (1990)***, uma versão modificada do modelo ***Kineros*** (Woolhiser et al., 1990). ***Kineros2 (1990)*** é um modelo hidrossedimentológico, físico, distribuído, orientado a evento, simula os processos de infiltração, escoamento superficial e erosão do solo.

3.2 Definição do Modelo ***Kineros2 (1990)***

A partir de 1970, começou-se estudar com mais intensidade a aproximação cinemática para simular o movimento do excesso de chuva sobre a superfície. Rovey et al. (1977), aplicou o modelo chamado ***Kingen***, que operava através de redes arbitrárias de planos e canais, ou seja, as redes de escoamento eram definidas pelo modelo e não pelo usuário. A partir dessa primeira experiência o modelo ***Kingen*** foi sendo modificado para poder simular a erosão, o transporte de sedimentos e a infiltração, recebendo o nome de ***Kineros2 (1990)***.

A nova versão do ***Kineros2 (1990)*** inclui características singulares segundo Santos et al. (2001) e Lopes (2003), tais como:

- Algoritmo de infiltração que abrange o perfil do solo com duas camadas e incorpora um novo método baseado nas características físicas do solo, com a finalidade de redistribuir a água no solo durante os períodos sem chuva.
- O solo e os sedimentos são caracterizados por uma distribuição em até cinco classes de diâmetros de sedimentos.

Segundo Silva et al. (2005), a representação do solo em duas camadas também se adapta às condições da bacia uma vez que o modelo representa satisfatoriamente as condições das camadas inferiores do solo, além de permitir o cálculo da produção de sedimentos através da distribuição em classes de sedimentos, ajudando na identificação das áreas que mais contribuem para o processo de erosão.

3.2.1 Componente de Infiltração

O componente de infiltração utilizado no **Kineros2 (1990)** permite uma redistribuição de água no solo, incluindo a recuperação da capacidade de infiltração durante os intervalos entre as chuvas, determinando as taxas de infiltração durante e após esse intervalo sem chuva. A taxa de infiltração f_c é uma função da lâmina acumulada de infiltração I e de alguns outros parâmetros que descrevem as propriedades de infiltração no solo como: condutividade hidráulica saturada efetiva K_s (m/s), valor efetivo do potencial de capilaridade G (m), porosidade do solo Φ , e índice de distribuição dos tamanhos dos poros λ . Há também um parâmetro opcional (Cv), que descreve a variação aleatória espacial da condutividade hidráulica saturada do solo, assim como um parâmetro que representa a porcentagem de rochas, **ROCK**. O modelo utiliza também uma variável da saturação relativa inicial do solo Si (m^3/m^3), cujo valor é dado por $\theta i/\Phi$, onde θi é o índice de umidade inicial do solo. O cálculo da taxa de infiltração f_c (m/s) é feito pela seguinte equação (Smith e Parlange, 1978):

$$f_c = K_s \left[1 + \frac{\alpha}{e^{\alpha I/\beta} - 1} \right] \quad (1)$$

onde $\beta = (G + h)(\theta s - \theta i)$, combinando os efeitos do potencial efetivo de capilaridade, G , profundidade do fluxo, h (m), e da capacidade de armazenamento de água do solo, $\Delta\theta = (\theta s - \theta i)$, onde θs é a umidade de saturação do solo (m^3/m^3). O parâmetro α representa o tipo de solo; α se aproxima de 0 para areia e se aproxima de 1 para um solo franco bem uniforme. Segundo Paiva (2008), a maioria dos tipos de solo é melhor representada por um valor de α igual a 0,85.

O valor efetivo do potencial de capilaridade G é dado pela seguinte expressão:

$$G = \int_{-\infty}^0 \frac{K(\Psi)}{K_s} d\Psi \quad (2)$$

onde Ψ é o potencial matricial do solo (m). O modelo de infiltração também leva em consideração a recuperação da capacidade de infiltração do solo, a qual ocorre em períodos em que não há precipitação, ou em períodos em que a precipitação não produz escoamento, geralmente quando a intensidade de precipitação é inferior à permeabilidade do solo. A equação utilizada no modelo para o cálculo da variação da umidade do solo nestes períodos é:

$$\frac{d\theta_0}{dt} = \frac{\Delta\theta_{i0}}{I} \left[r - K_i - \left(K(\theta_0) + \frac{\beta p K_s \Delta\theta_{i0} G(\theta_i, \theta_0)}{I} \right) \right] \quad (3)$$

onde: $\Delta\theta = \theta_0 - \theta_i$ é diferença de umidade do solo acima e abaixo da frente de molhamento; I é a lâmina de infiltração acumulada (m); r é a taxa de entrada de água na superfície do solo durante a redistribuição de água no solo, a qual pode ser menor do que a permeabilidade K_s , negativa (devido à evaporação) ou zero;

$$\beta = \frac{1}{Z(\theta_0 - \theta_i)} \int_0^Z (\theta - \theta_i) dz = 0,85 \quad (4)$$

Z é a profundidade da frente de molhamento;

p é um fator efetivo de profundidade:

($p = 2$ para $r = 0$; $p = 1,5$ para $0 < r < K_s$; $p = 3$ para $r < 0$); e $G(\theta_i, \theta_0)$ é o valor efetivo do potencial de capilaridade na frente de redistribuição de água (m).

Nestes períodos, onde a umidade do solo está abaixo da umidade de saturação, a equação utilizada para calcular a condutividade hidráulica do solo é (Brooks e Corey, 1964):

$$K(\theta) = K \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{3+2/\lambda} \quad (5)$$

onde:

θ é a umidade do solo no período de redistribuição de água;

K_s é a permeabilidade efetiva do solo (m/s);

θ_r é a umidade residual do solo;

θ_s é a umidade do solo na saturação; e

λ é o parâmetro de distribuição do tamanho dos poros (parâmetro de Brooks e Corey).

Maiores detalhes sobre o modelo de redistribuição de água no solo, utilizado no modelo **Kineros2 (1990)**, podem ser obtidos em Smith et al., (1993) e Corradini et al., (1994).

3.2.2 Fluxo nos Planos de Escoamento

Visto em uma escala muito pequena, o fluxo nos planos de escoamento é um processo tridimensional extremamente complexo. Numa escala maior, entretanto, pode ser visto como um processo unidimensional, governado pelas equações de Saint Venant. As simplificações das equações de Saint-Venant, para o caso de uma onda cinemática, não preservam todas as suas propriedades, tais como as utilizadas em modelos difusos, os quais consideram os efeitos de jusante sobre o escoamento proveniente de montante, e como nos modelos hidrodinâmicos, onde se consideram as equações de Saint-Venant em sua forma geral, ou seja, incluindo os termos que representam a gravidade, o atrito, a pressão e a inércia do fluxo (Woolhiser et al., 1990). Mesmo assim, o modelo utiliza o conceito da onda cinemática em que a equação da quantidade de movimento das equações de Saint Venant se simplifica para a forma:

$$Q = ah^m \quad (6)$$

Em que, Q é a descarga por unidade de largura (m^2/s) e h é o volume de água armazenado por unidade da área (m). Os parâmetros a e m são dados por: $a = S^{1/2}/n$ e $m = 5/3$, onde S é a declividade e n é o coeficiente de rugosidade de Manning.

A Eq. (6) é utilizada juntamente com a equação da continuidade:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x, t) \quad (7)$$

onde t é o tempo (s), x é a distância ao longo do sentido da declividade, e $q(x, t)$ é o excesso de precipitação (m/s).

Substituindo, a Eq. (6) para Q na Eq. (7), se obtém:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + amh^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q(x, t) \quad (8)$$

As equações de onda cinemática são resolvidas no modelo **Kineros2 (1990)** usando um esquema implícito de diferenças finitas definido em quatro pontos, em relação à distância e ao tempo.

3.2.3 Condições de Fronteira

A profundidade de fluxo na fronteira a montante dos elementos deve ser especificada para solucionar a Eq. (8). Se essa fronteira fizer parte do divisor de águas da bacia, a condição de fronteira será:

$$h(0, t) = 0 \quad (9)$$

Se um plano estiver contribuindo a montante para outro plano, a condição de fronteira será:

$$h(0, t) = \left[\frac{a_u h_u(L, t)^{m_u} W_u}{a W} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (10)$$

onde $h_u(L, t)$ é a profundidade na fronteira inferior do plano contribuinte no tempo t , L é o comprimento e W_u é a largura do plano contribuinte, a_u é o parâmetro declividade/rugosidade do plano contribuinte, m_u é um expoente referente ao plano contribuinte, e a , m e W são referentes ao plano de jusante.

3.2.4 Recessão e Microtopografia

Segundo Paiva (2008), a microtopografia do relevo pode ter grande importância na forma do hidrograma. O efeito é mais pronunciado durante a recessão, quando a parte do solo coberta pelo fluxo de água determina a oportunidade para a perda de água por infiltração. O modelo trata este relevo supondo que na sua geometria existe uma elevação máxima, e que a área coberta por água varia linearmente com a diferença entre este valor e o nível de água. A geometria da microtopografia é determinada especificando dois parâmetros que representam o espaçamento médio (parâmetro *spacing*) entre os picos e o valor médio (parâmetro *relief*) desses picos nessa microtopografia.

3.2.5 Fluxo nos Canais de Escoamento

A equação da continuidade para um canal de escoamento com entrada lateral de fluxo é:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x, t) \quad (11)$$

onde A é a área da seção transversal (m^2), Q é a vazão no canal (m^3/s), e o $q(x,t)$ é o fluxo lateral por unidade de comprimento do canal (m^2/s). A relação entre a vazão no canal e a área de sua seção após a simplificação da onda cinemática é dada por:

$$Q = a R^{m-1} A \quad (12)$$

onde R é o raio hidráulico (m), $a = S^{1/2}/n$ e $m = 5/3$, onde S é a declividade e n é o coeficiente de rugosidade de Manning.

As equações de fluxo para os canais são resolvidas por uma técnica implícita definida em quatro pontos similar àquela para o fluxo nos planos, com a diferença que a incógnita agora é a área A e não a profundidade do fluxo h , e que as mudanças geométricas devido à variação da profundidade devem ser consideradas.

3.2.6 Modelagem da Erosão nos Planos e Canais de escoamento

A equação geral que descreve a dinâmica dos sedimentos dentro do fluxo é a equação de balanço de massa, similar àquela para o fluxo de água (Bennett, 1974):

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x,t) = q_s(x,t) \quad (13)$$

onde C_s é a concentração de sedimento no fluxo (m^3/m^3), Q é a vazão líquida (m^3/s), A é área da seção transversal do plano ou canal (m^2), e é a taxa de erosão do solo (m^2/s) e q_s é taxa de entrada lateral de sedimento no fluxo nos canais ($m^3/s/m$).

Nos planos de escoamento, a erosão é modelada como sendo composta por dois componentes principais:

- a erosão provocada pelo impacto das gotas de chuva no solo, e

- erosão (ou deposição) hidráulica, resultado da interação entre a força de cisalhamento do fluxo e a tendência das partículas de solo no fluxo se depositarem sob efeito da força da gravidade.

A erosão resultante é o somatório da taxa da erosão provocada pelo impacto das gotas de chuva e_s e da erosão hidráulica e_h :

$$e = e_s + e_h \quad (14)$$

A erosão por impacto das gotas de chuva é estimada pela seguinte expressão (Meyer e Wischmeier, 1969):

$$e_s = c_f e^{-c_h h} i^2 \quad (15)$$

na qual i é a intensidade da precipitação (m/s), o c_f é um coeficiente a ser determinado experimentalmente ou por calibração, que está relacionado às propriedades do solo e da superfície, e $e^{-c_h h}$ é um fator que representa a redução na erosão por impacto das gotas de chuva devido ao aumento da lâmina d'água. O parâmetro c_h representa a efetividade do amortecimento da superfície da água. A erosão hidráulica (e_h) é estimada como sendo linearmente dependente da diferença entre a capacidade de transporte do fluxo (concentração de equilíbrio) e a concentração real de sedimento, e é dada pela equação:

$$e_h = c_g (C_m - C_s) A \quad (16)$$

onde C_m é a concentração de equilíbrio na capacidade de transporte, $C_s = C_s(x,t)$ é a concentração real de sedimentos no fluxo, e c_g é um coeficiente da taxa de transferência de sedimentos (s^{-1}), e é calculado por:

$$c_g = c_o \frac{v_s}{h} \text{ se } C_s \leq C_m \text{ (erosão) ou } c_g = c_o \frac{v_s}{h} \text{ se } C_s > C_m \text{ (deposição)} \quad (17)$$

onde c_o é um coeficiente que reflete à coesão do solo e v_s é a velocidade de queda da partícula (m/s).

O modelo **Kineros2 (1990)** utiliza a fórmula de capacidade de transporte de Engelund e Hansen (Engelund e Hansen, 1967), com a inclusão de um limite crítico do valor da potência unitária da corrente $\Omega = uS$ (*Unit Stream Power*) igual a 0,004 m/s, onde u é a velocidade do fluxo (m/s) e S é a declividade, para estender a sua aplicabilidade a fluxos rasos. A equação para o cálculo da concentração de sedimentos na capacidade de transporte é a seguinte (Engelund e Hansen, 1967):

$$C_m = \frac{0,05}{d(S_s - 1)^2} \sqrt{\frac{Sh}{g}} (\Omega - 0,004) \quad (18)$$

onde g é a aceleração da gravidade (m/s^2), S_s é a densidade relativa do sedimento, igual a 2,65, d é o diâmetro do sedimento (m), h é a profundidade do fluxo (m) e as outras variáveis já foram definidas anteriormente.

A velocidade de queda da partícula é calculada pela seguinte equação:

$$v_s^2 = \frac{4}{3} \frac{g(S_s - 1)d}{C_d} \quad (19)$$

onde C_D é o coeficiente de arrasto da partícula, que é uma função do número de Reynolds, e é calculado pela seguinte expressão:

$$C_D = \frac{24}{R_n} + \frac{3}{\sqrt{R_r}} + 0,34 \quad (20)$$

onde R_n é o número de Reynolds, calculado como $R_n = v_s d / \nu$, onde ν é a viscosidade cinemática da água. A velocidade de queda da partícula é encontrada resolvendo simultaneamente as equações (17) e (18).

A simulação do transporte de sedimentos para os canais de escoamento é realizada de maneira semelhante à simulação do transporte de sedimentos nos planos de escoamento. A principal diferença nas equações é que a erosão por impacto das gotas de chuva é desprezada, e o termo q_s torna-se importante na representação da entrada de fluxo lateral.

3.3 Dados de Entrada do Modelo *Kineros2 (1990)*

O modelo *Kineros2 (1990)* necessita de algumas informações de entrada para o arquivo de precipitação, como mostrado abaixo e na Figura 1:

- a) Intensidade da precipitação em mm/h ou altura de chuva – *Depth*;
- b) Tempo da precipitação em minutos – *Time*; e
- c) Quantidade de eventos de chuva – *N*.


```

BEGIN RG01

  N = 100
  TIME          DEPTH
  ! (min)      (mm)
    0           3.16
   10          3.46
   20          4.15
   30          12.5
   40          17.96
   50          19.31
   60          20.02
   70          21.43
   80          22.66
   90          23.86
  100          25.39

END

```

FIGURA 1 – Exemplo de um arquivo de entrada de chuva do modelo ***Kineros2 (1990)***.

3.4 Parâmetros do Modelo ***Kineros2 (1990)***

Segundo Silva appud Galvão (2005), os modelos hidrológicos possuem uma estrutura definida e alguns parâmetros que controlam sua operação. Os parâmetros são definidos para cada bacia, com o objetivo de particularizar o modelo na bacia em estudo, para que possa reproduzir de forma satisfatória o comportamento hidrológico da mesma.

Os parâmetros no modelo ***Kineros2 (1990)*** se dividem em dois tipos:

- Globais, que se referem às características físicas da bacia como um todo, ou seja, são homogêneos para toda a bacia,
- Parâmetros distribuídos nos planos e nos canais.

3.4.1 Parâmetros globais do modelo ***Kineros2 (1990)***

Os parâmetros globais (Figura 2) do modelo ***Kineros2 (1990)*** são:

Units - sistema de unidades utilizado para todos os parâmetros (sistema métrico decimal ou inglês);

Clen - comprimento característico;

Temperature - temperatura em graus *Celsius* ou *Fahrenheit*;

Diameters - diâmetros representativos das partículas de solo, em milímetros ou polegadas. O limite máximo é de cinco faixas de diâmetro..

Densities - valores das massas específicas dos diâmetros das classes determinadas no parâmetro *Diameters*

```

BEGIN GLOBAL

  CLEN = 532.92,  UNITS = METRIC
  DIAMS = 0.5 ! mm
  DENSITY = 2.65 ! g/cc
  TEMP = 20 ! deg C
  Ne1e = 22

END GLOBAL
!-----
BEGIN PLANE

  ID = 1, PR = 1, LEN = 342.99, WID = 532.10, SL = 0.028
  MANNING = 0.8, RELIEF = 29, SPACING = 3.3
  Interception = 0.3 !(mm)
  Ca = 0.41
  SAT = 0.52, CV = 0.69, ks = 4.12!(mm/h)
  G = 41, Distribution = 0.01, Porosity = 0.261
  Rock = 0.00
  Pave = 0.0
  Splash = 1000 ! cf
  Cohesion = 0.01! Co
  FRACT=1
  PLOT H

END PLANE
!-----

```

FIGURA 2 – Exemplo de um arquivo de entrada dos parâmetros do modelo *Kineros2 (1990)*.

3.4.2 Parâmetros dos Planos e Canais de Escoamento do Modelo *Kineros2 (1990)*

Os parâmetros de calibragem dos planos e canais do modelo *Kineros2 (1990)* estão listados abaixo:

Identifier - número de identificação do plano;

Upstream - número de identificação do plano a montante (se houver);

Length - comprimento, em metros ou pés;

Width - largura, em metros ou pés;

Slope - declividade do plano;

Manning - coeficiente de rugosidade de *Manning*;

Chezy - coeficiente de *Chézy*;

Relief - altura média dos picos da microtopografia, em milímetros ou polegadas;

Spacing - distância média entre os picos da microtopografia, em metros ou pés;

Interception - interceptação vegetal, em milímetros ou polegadas;

Canopy cover - fração da superfície ocupada por vegetação;

Saturation - saturação inicial relativa do solo, razão entre a umidade inicial e a

porosidade do solo;

C_v - coeficiente de variação da condutividade hidráulica saturada efetiva;

K_s - condutividade hidráulica saturada efetiva, medida em mm/h ou polegadas/h;

G - valor efetivo do potencial de capilaridade do solo, em mm ou polegadas;

Distribution - índice de distribuição do tamanho dos poros;

Porosity - porosidade do solo;

Rock - fração volumétrica de rochas;

Splash - parâmetro que representa a erosão causada pelo impacto das gotas de chuva no solo;

Cohesion - coeficiente de coesão do solo; e

Fractions - fração de cada classe de diâmetros representativos do solo.

Upstream - número de identificação do elemento (plano ou canal) à montante;

Lateral - número de identificação dos planos que contribuem lateralmente para o canal;

SS₁, SS₂ - declividades laterais do canal;

3.4.3 Estimativa dos parâmetros do modelo *Kineros2 (1990)*

Os parâmetros globais, dos planos e dos canais listados anteriormente podem ser agrupados em três categorias:

- i. Parâmetros obtidos através de ensaios na área de estudo ou de acordo com as características geométricas dos elementos, são eles: **Clen, Diameters, Densities, Upstream, Lenght, Width, Slope, Canopy cover, C_v, G, Porosity e Distribution.**
- ii. Parâmetros que podem ser obtidos através de literatura, com base em trabalhos efetuados na bacia em estudo ou em pesquisas similares: **Manning, Chezy, Relief e Spacing.**
- iii. Parâmetros que necessitam de calibração: **Splash, Cohesion, Saturation (S_i) e K_s** condutividade hidráulica saturada do solo.

4 ÁREA DE ESTUDO

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas duas pequenas bacias com diferentes características físicas, a fim de verificar a eficácia do modelo em condições geograficamente diferentes. As duas bacias em estudo estão embutidas na bacia do Arroio Rio Vacacaí-Mirim, um dos formadores do Rio Vacacaí-Mirim, em Santa Maria - RS.

Foram estudadas as bacias:

- Alto da Colina II (ACII) e
- Sítio do Tio Pedro (STP),

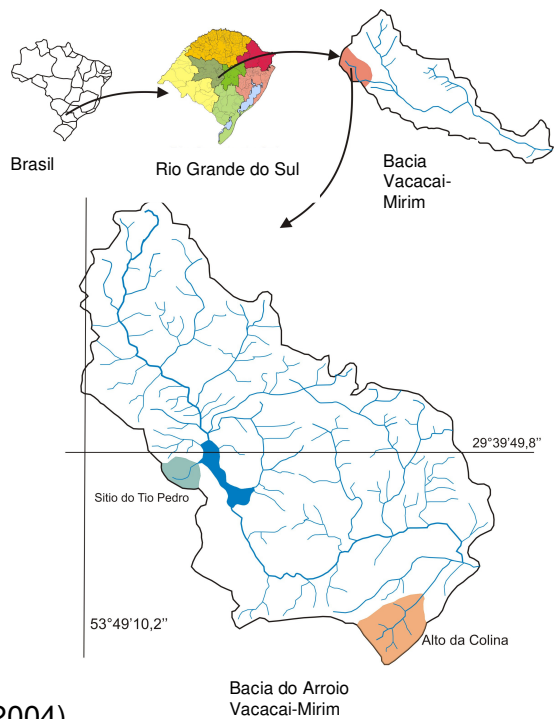
As duas bacias são suburbanas, com baixo índice de urbanização e foram monitoradas pelo **GHIDROS** (Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria).

4.1 Bacia do Rio Vacacaí-Mirim

A bacia hidrográfica do Rio Vacacaí-Mirim localiza-se na região central do estado do Rio Grande do Sul, abrangendo áreas de cinco municípios, Santa Maria, Restinga Seca, Itaara, São João do Polêsine e Silveira Martins. Está situada entre as coordenadas geográficas 53° 46' 30" a 53° 49' 29" de longitude Oeste e 29° 36' 55" a 29° 39' 50" de latitude Sul, abrangendo uma área total de 1.145,7 km².

Na figura 3, abaixo, é representada a Bacia do Rio Vacacaí-Mirim com destaque para a Bacia do Arroio Vacacaí-Mirim e sua localização no contexto regional, estadual e nacional.

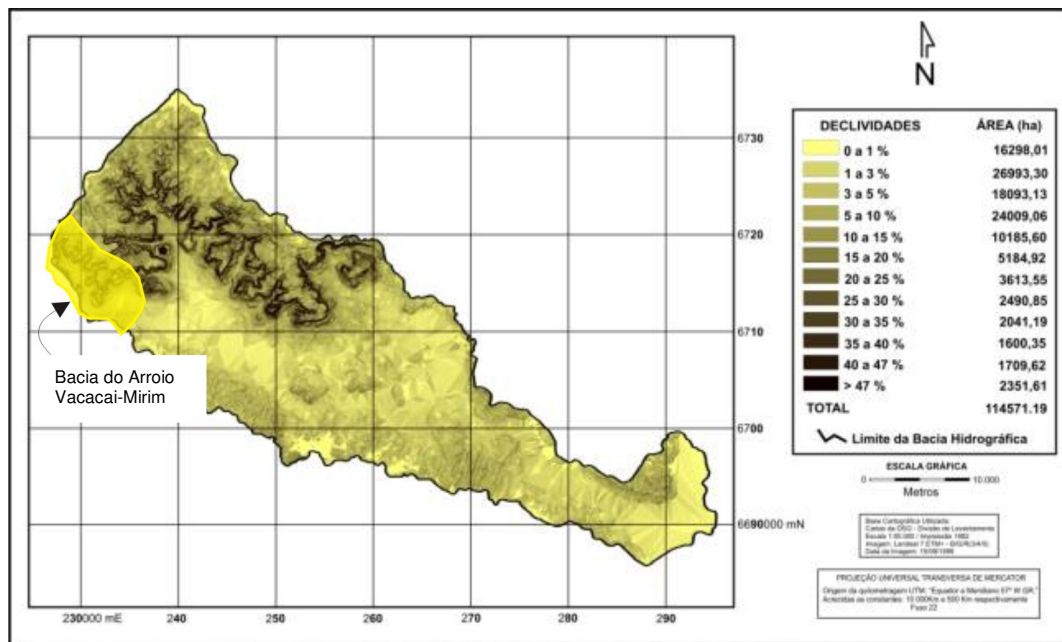
As figuras 4, 5 e 6 apresentam os mapas de declividades, usos do solo e tipos de solo, respectivamente, para a Bacia do Rio Vacacaí-Mirim com destaque para a Bacia do Arroio Vacacaí-Mirim.



Fonte: Casagrande (2004)

FIGURA 3 – Localização da Bacia do Rio Vacacaí-Mirim com destaque para a Bacia do Arroio Vacacaí-Mirim.

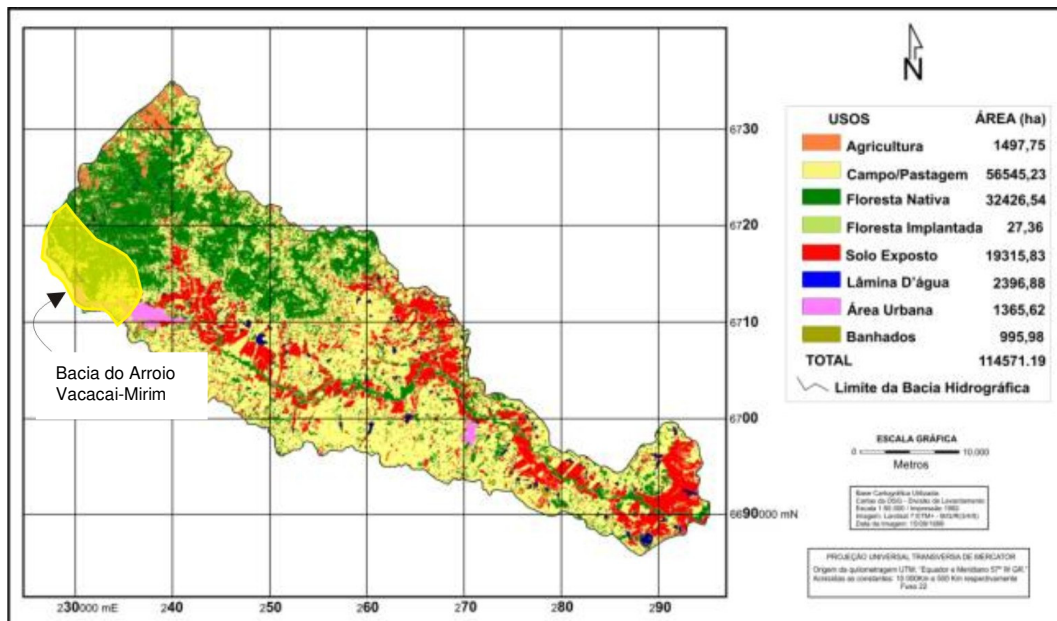
4.1.1 Declividades da Bacia do Rio Vacacaí-Mirim



Fonte: Casagrande (2004)

FIGURA 4 – Mapa de Declividades da Bacia do Rio Vacacaí-Mirim, com destaque para a Bacia do Arroio Vacacaí-Mirim.

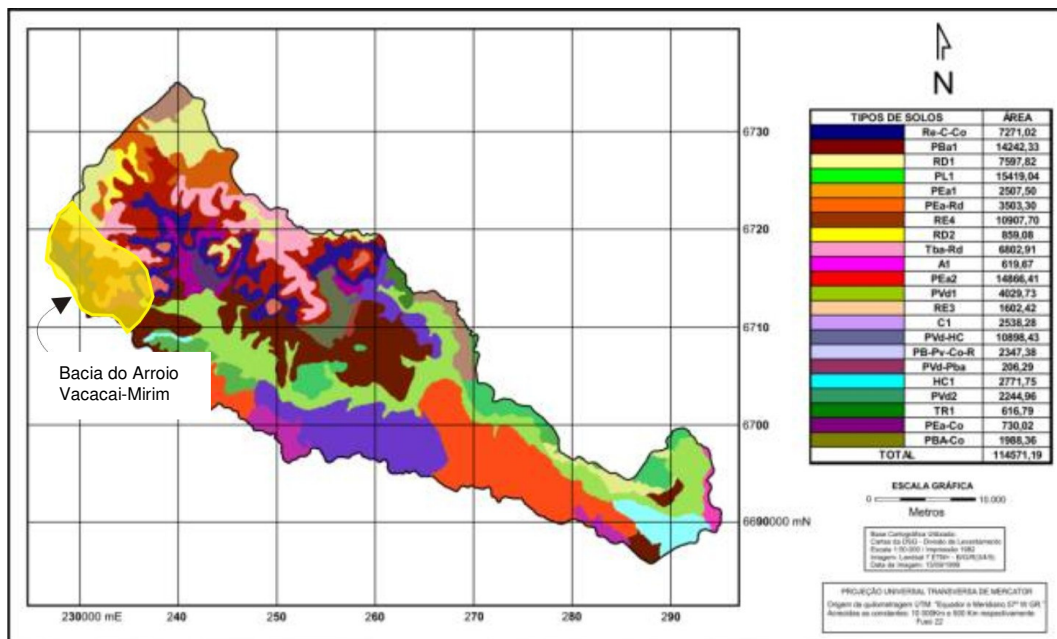
4.1.2 Uso e Ocupação do Solo da Bacia do Rio Vacacaí-Mirim



Fonte: Casagrande (2004)

FIGURA 5 – Mapa de Usos do Solo da Bacia do Rio Vacacaí-Mirim, com destaque para a Bacia do Arroio Vacacaí-Mirim.

4.1.3 Tipos de Solo da Bacia do Rio Vacacaí-Mirim



Fonte: Casagrande (2004)

FIGURA 6 – Mapa de Tipos de Solo da Bacia do Rio Vacacaí-Mirim, com destaque para a Bacia do Arroio Vacacaí-Mirim.

4.2 Bacia ALTO DA COLINA II

A Bacia Alto da Colina II, sub-bacia da Bacia do Arroio Vacacaí Mirim tem área 1,44 km², situa-se no município de Santa Maria, na localidade Alto da Colina, entre as rodovias RS 509 Km 7 e BR 287 km 3, com coordenadas 53°43'41" e 53°44'06" de longitude oeste de Greenwich e 29°38'47" e 29°39'10" de latitude sul.

A figura 7 mostra a localização da Bacia Alto da Colina II em relação à Bacia do Arroio Vacacaí-Mirim.

Como pode ser observado na figura 8, a Bacia Alto da Colina II tem baixo percentual de urbanização

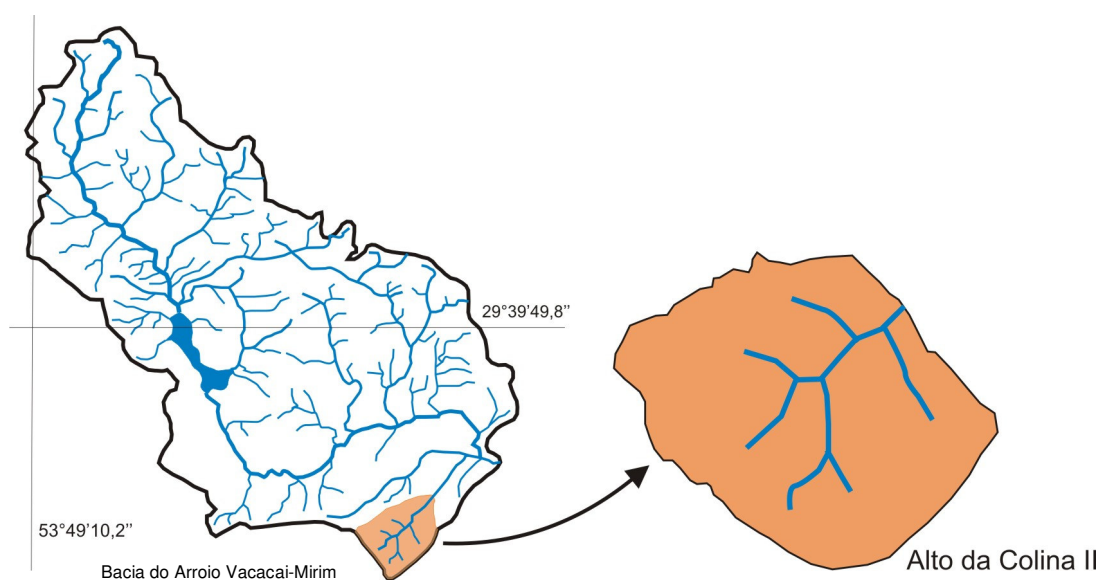
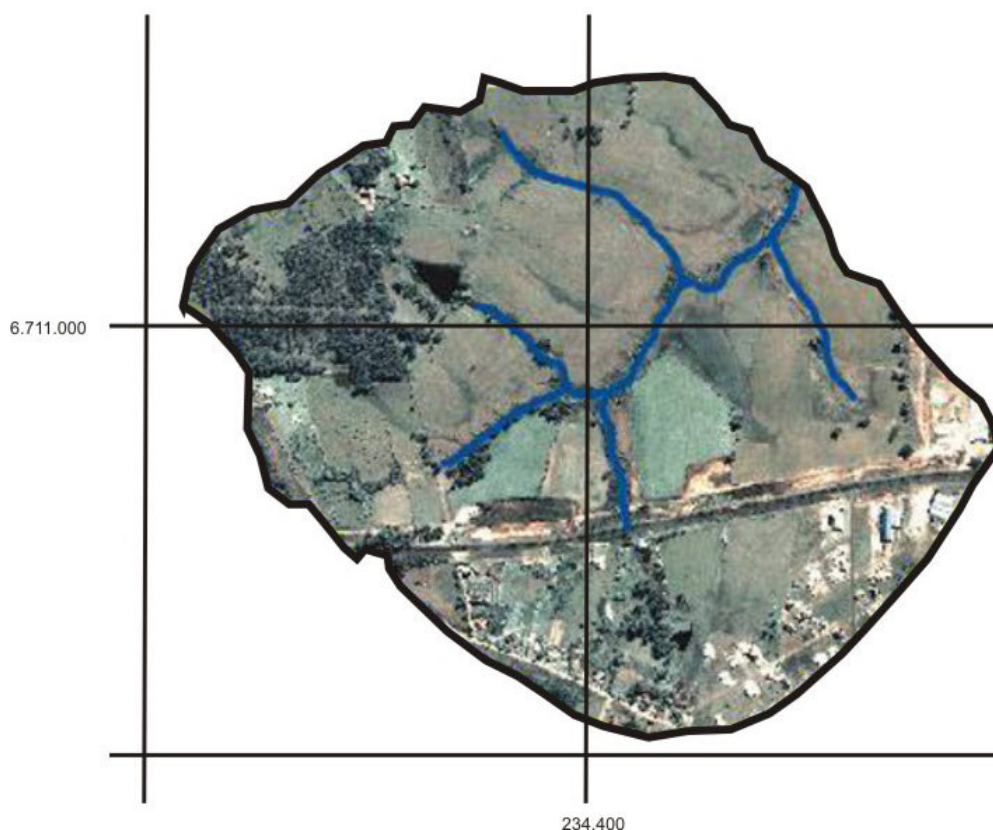


FIGURA 7 – Localização da Bacia Alto da Colina II.



FONTE: Bastos – 2007

FIGURA 8 – Foto aérea da Bacia Alto da Colina II.

4.2.1 Características Físicas da Bacia Alto da Colina II (ACII).

Rampelotto et al.(2000), efetuou um levantamento planialtimétrico avaliando a área e drenagem, a forma da bacia, o sistema de drenagem e as características de relevo, tais dados foram usados neste trabalho.

Foram usados dados de levantamentos topográficos detalhados da bacia, com levantamento do uso do solo realizados por Bastos (2005) além de detalhamento da rede de drenagem fornecido pela Prefeitura Municipal de Santa Maria.

As principais características das áreas drenadas pela bacia ACII são apresentadas na tabela abaixo:

TABELA 1 – Características Físicas da Bacia Alto da Colina II.

Parâmetro	Dimensão	
Área	1,44	Km ²
Talvegue	1.14	km
Comp. do Rio Princ.	1035,0	m
Declividade	5,80	%
Declividade Rio princ.	0,0127	m/m
Declividade média	0,06	m/m
Situação	Rural	

4.2.2 Clima e Solos (ACII)

Na classificação proposta por Köopen, Santa Maria se enquadra no clima Subtropical Úmido tipo Cfa, onde C: temperatura media 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 media do mês mais quente superior a 22 C°.

Azolin e Mutti (1988 apud MELLER, 2004), apresentaram um mapa na escala 1:100.000 (figura 9) representando os tipo de solo para a Bacia do Rio Vacacaí-Mirim. Segundo o mapa o solo predominante na Bacia do Alto da Colina II, pela atual classificação da Embrapa (2003), é do tipo Argilossolo Hipocrômico Argilúvico Abrúptico

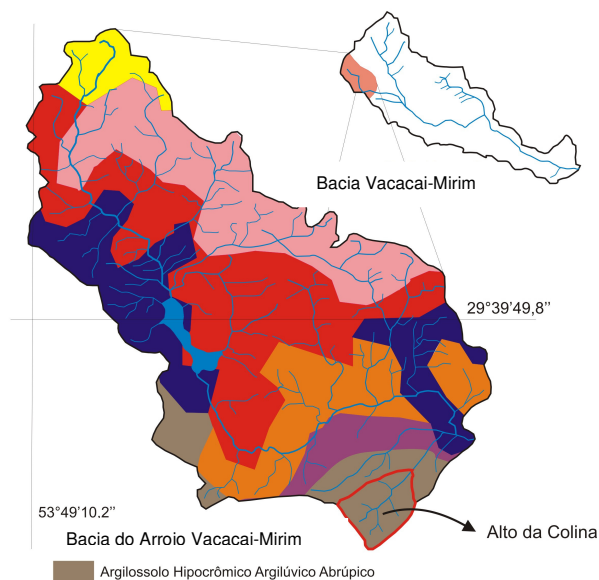


FIGURA 9 – Tipos de Solo da Bacia Alto da Colina II.

4.2.3 Uso e Ocupação do Solo (ACII)

É de fundamental importância para o entendimento dos processos que ocorrem na drenagem pluvial nas bacias hidrográficas a determinação do uso e ocupação do solo.

A Bacia Alto da Colina II é uma bacia periurbana, com baixo índice de urbanização e uma porcentagem significativa da área usada para agricultura. Para determinação das características de uso e ocupação do solo foram utilizadas imagens do satélite *IKONOS* visando obter dados mais precisos das porcentagens de áreas impermeáveis.

Foi utilizada uma imagem do satélite *IKONOS* do dia 21 de dezembro de 2004 com as seguintes propriedades:

- Imagem pancromática com resolução no terreno de 1 metro.
- Resolução radiométrica de 11 bits (possibilita distinguir objetos de 1m).

Foram utilizados dados de Bastos (2007), os quais foram tratados conforme segue:

- Georeferenciamento da porção da imagem selecionada com o software *SPRING*
- Utilização de cartas topográficas na escala 1:25.000 referenciadas pelo DATUM UTM\SAD-69 e DATUM vertical IMBITUBA.
- Obtidos 21 pontos de controle retirados de uma imagem de satélite mais antiga.
- Classificação da composição do uso do solo com o software *ARCVIEW GIS 3.1*, onde foram determinadas 7 classes agrupadas em áreas permeáveis e impermeáveis.
 - i. Impermeáveis: ruas, telhados e calçadas
 - ii. Permeáveis: espelho d'água, campo, solo exposto, terrenos, jardins, e vegetação arbórea.

Para chegar-se ao objetivo deste estudo foi necessário determinar a porcentagem de áreas permeáveis e impermeáveis. Optou-se por agrupar todas áreas agrícolas em uma única classe, considerada rural, conforme observa-se na figura abaixo.

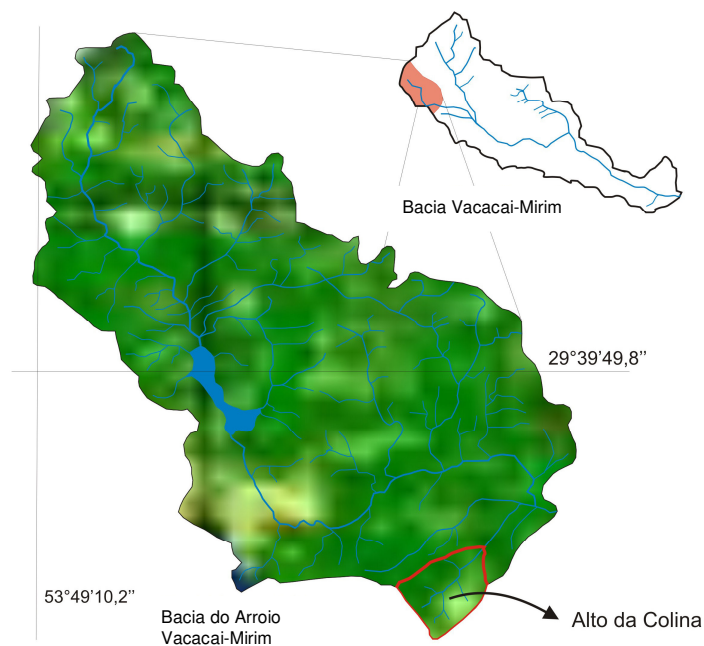
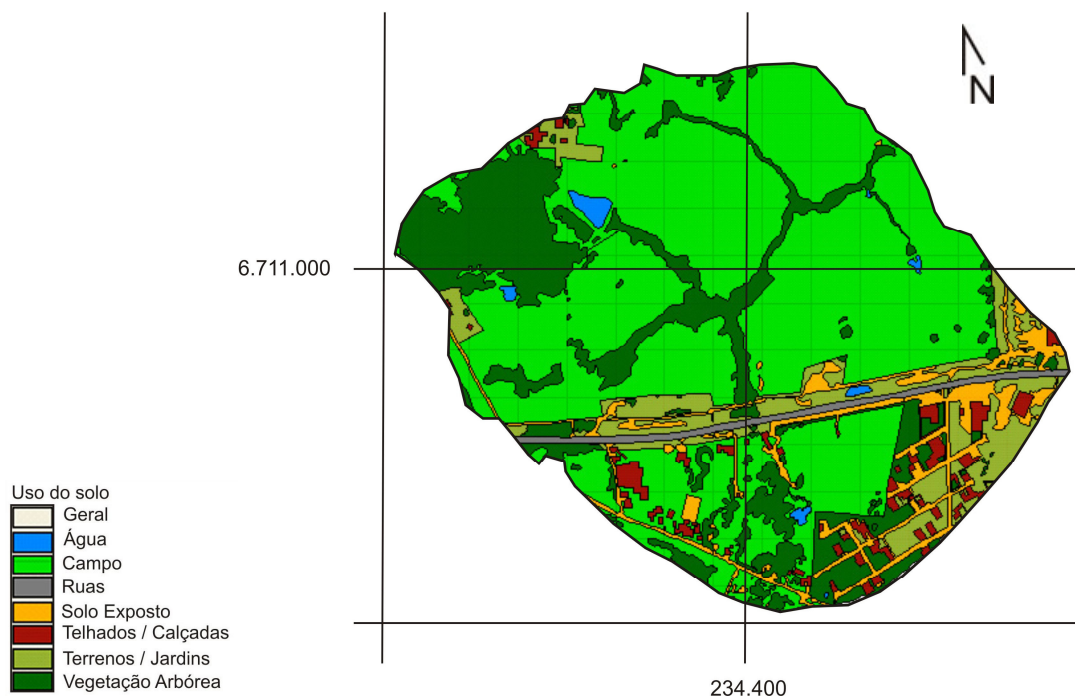


FIGURA 10 – Uso e Ocupação do Solo da Bacia Alto da Colina II.

A figura 11 apresenta uma imagem georeferenciada da Bacia Alto da Colina II, onde percebe-se a predominância de campos e vegetação arbórea. Na tabela 2 são apresentados os dados de uso do solo.



(FONTE: Bastos – 2007)

FIGURA 11 – Uso e Ocupação do solo da Bacia Alto da Colina II.

TABELA 2 – Uso do Solo da Bacia Alto da Colina II.

Uso do Solo	Área (ha)	(%)
Espelho d'água	0,83	0,57
Campos	86,29	59,74
Ruas	1,88	1,30
Solo Exposto	8,64	5,98
Telhados/Calçadas	3,64	2,52
Terrenos/Jardins	13,25	9,18
Vegetação Arbórea	29,92	20,72
Total Impermeável	5,52	3,82
Total Permeável	138,93	96,18

4.2.4 Características de Relevo do Solo (ACII)

Segundo Villela & Mattos (1975) apud Carvalho (2003), as características do relevo são importantes devido a grande influência sobre os fatores meteorológicos (temperatura, precipitação, evaporação, etc, que são função da altitude) e hidrológicos (a velocidade do escoamento superficial é função da declividade do terreno).

Nas figuras 12 e 13, são apresentados os mapas planialtimétrico e de declividades da Bacia Alto da Colina II.

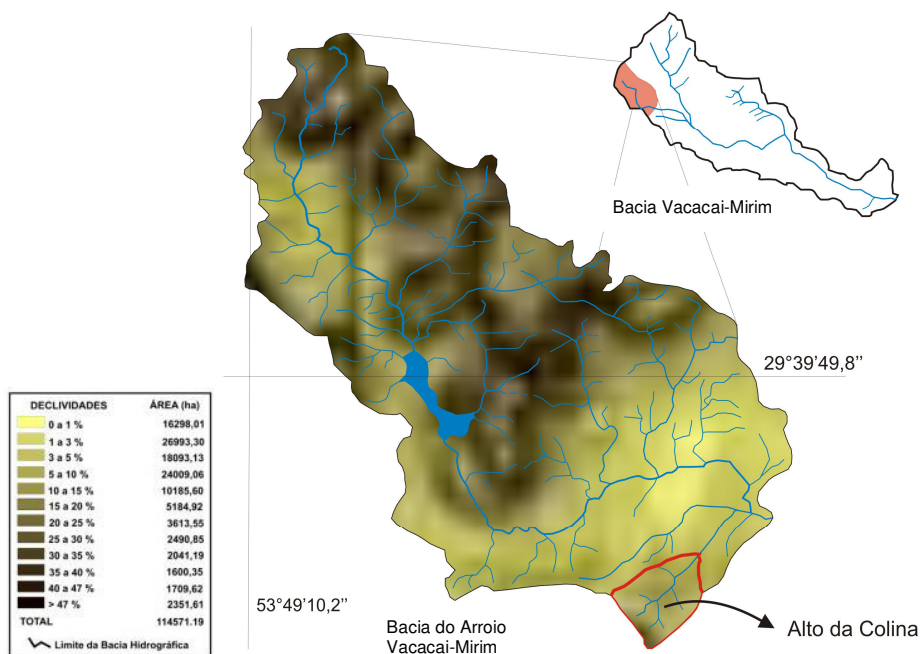
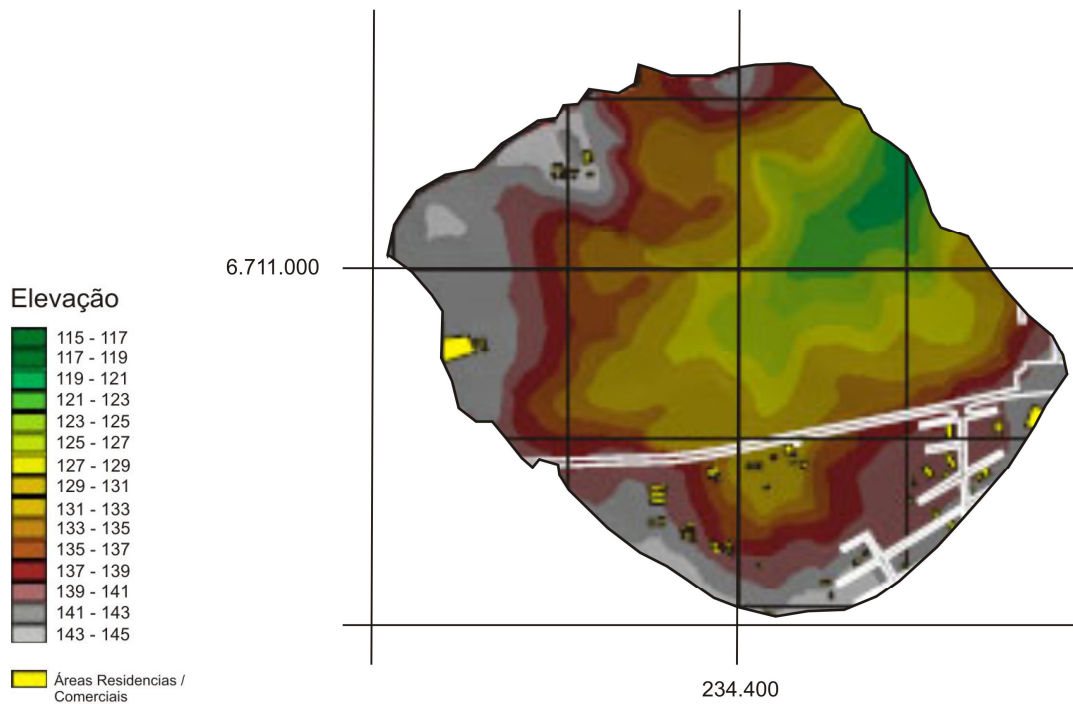


FIGURA 12 – Declividades da Bacia Alto da Colina II.



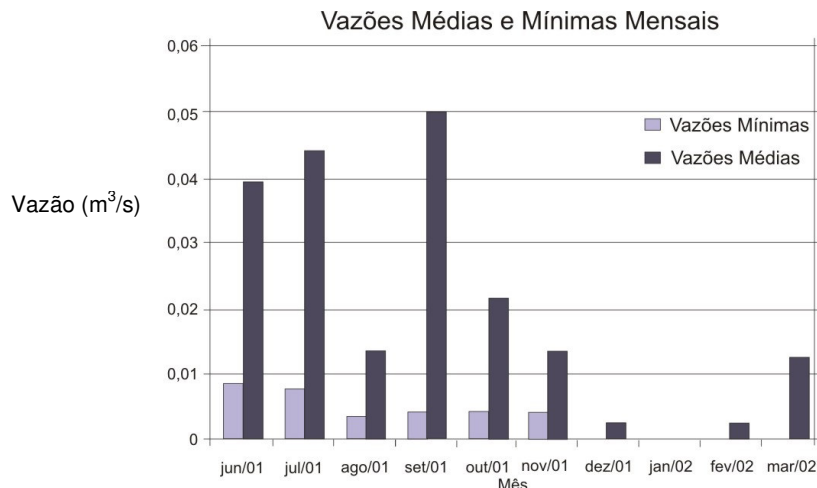
(FONTE: Bastos – 2007)

FIGURA 13 – Mapa Planialtimétrico da Bacia Alto da Colina II.

4.2.5 Dados Fluviográficos Disponíveis (ACII)

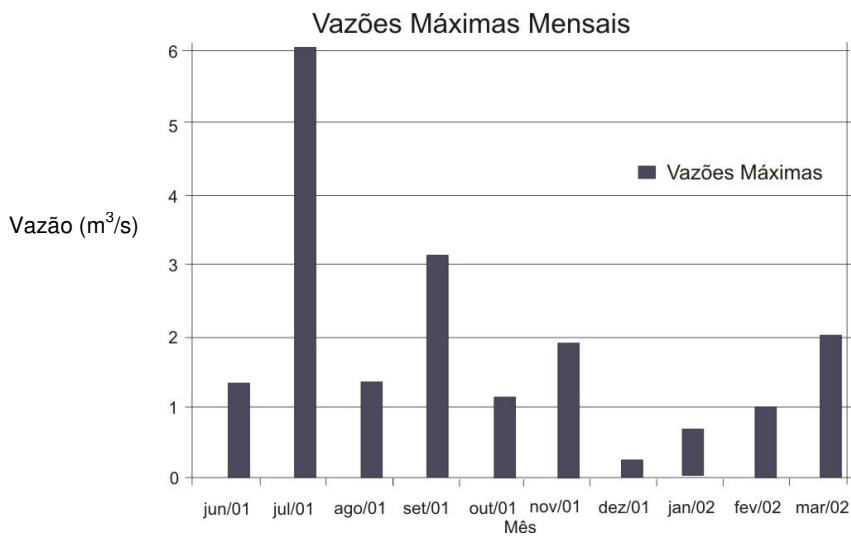
Para a realização deste estudo foram utilizados dados fluviográficos coletados por Carvalho (2003) durante o período de junho de 2001 e março de 2002.

O gráfico 1, mostra as vazões mínimas absolutas e médias mensais no período de junho de 2001 a março de 2002 para a Bacia Alto da Colina II, o gráfico 2 mostra as vazões máximas absolutas mensais no mesmo período para a mesma Bacia.



(FONTE: Carvalho – 2003)

GRÁFICO 1 – Vazões Médias e Mínimas (jun/01 – mar/02) para a Bacia Alto da Colina II.



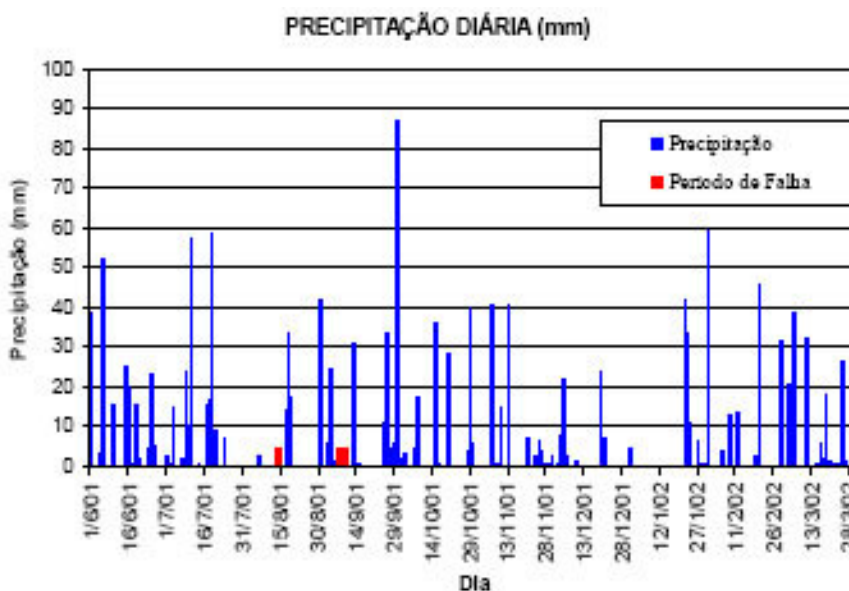
(FONTE: Carvalho – 2003)

GRÁFICO 2 – Vazões Máximas (jun/01 – mar/02) para a Bacia Alto da Colina II.

4.2.6 Dados Pluviográficos Disponíveis (ACII)

Para a realização deste estudo foram utilizados dados pluviográficos usados por Bastos (2007), provenientes da estação pluviográfica Vila Maria. Foram selecionados 5 eventos entre os anos de 2001 e 2002, usados 5 eventos para calibração e os mesmos 5 eventos para validação do modelo em um processo iterativo.

O gráfico 3 representa os dados disponíveis no período.



(FONTE: Bastos – 2007)

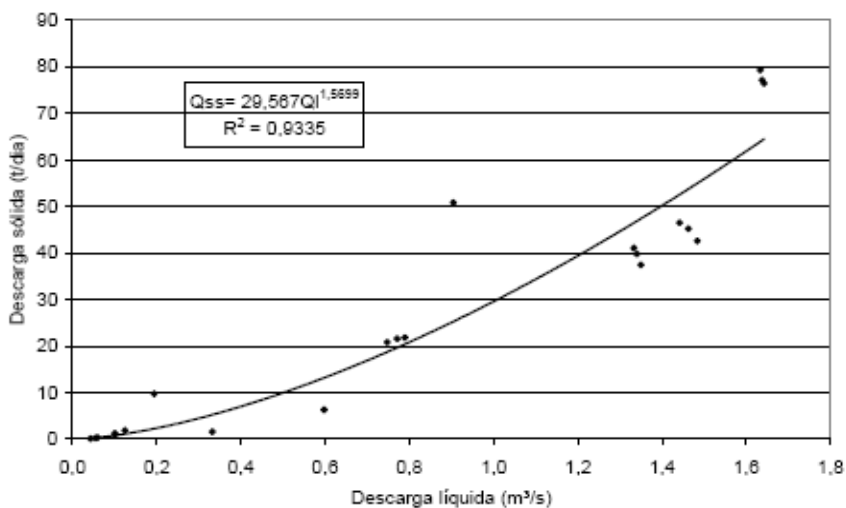
GRÁFICO 3 – Dados Pluviográficos da Bacia Alto da Colina II.

4.2.7 Dados de Sedimentos Disponíveis (ACII)

Os dados de sedimentos foram retirados do trabalho realizado por Carvalho (2003), onde foram coletadas amostras pelo AMS-1 (amostrador de sedimentos em suspensão), usando uma curva-chave para subida da onda de cheia e outra para descida da onda de cheia, conforme os gráficos 4 e 5, apresentados a seguir.

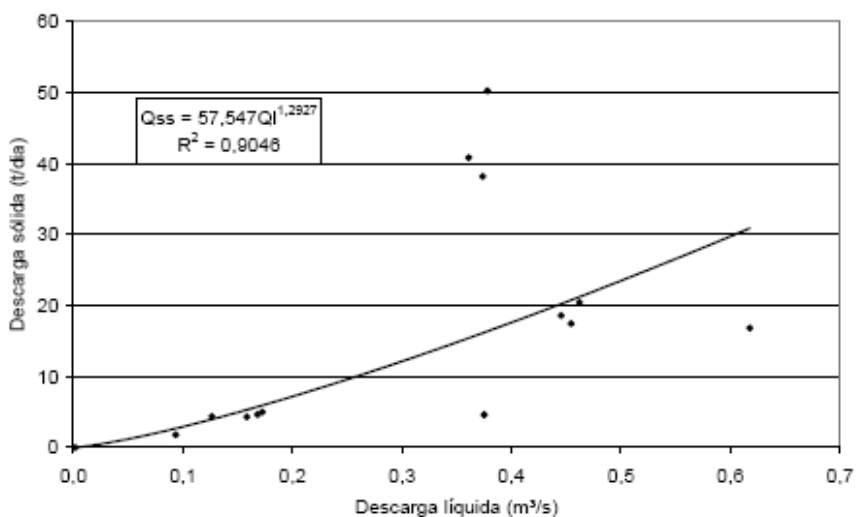
O gráfico 4, apresenta a curva-chave de sedimento em suspensão para a descida da onda de cheia, para o Amostrador AMS-1, da bacia hidrográfica Alto da Colina II, Santa Maria RS.

O gráfico 5, mostra a curva-chave de sedimento em suspensão para a subida da onda de cheia, para Amostrador AMS-1, da bacia hidrográfica Alto da Colina II, Santa Maria RS.



(FONTE: Carvalho – 2003)

GRÁFICO 4 – Curva-chave de sedimento em suspensão para a descida da onda de cheia, para o Amostrador AMS-1, da bacia hidrográfica Alto da Colina II, Santa Maria RS.



(FONTE: Carvalho – 2003)

GRÁFICO 5 – Curva-chave de sedimento em suspensão para a subida da onda de cheia, para Amostrador AMS-1, da bacia hidrográfica Alto da Colina II, Santa Maria RS.

4.3 Bacia SÍTIO DO TIO PEDRO

A bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro tem área de 0,39 Km², localiza-se no município de Santa Maria, RS, na localidade de Campestre do Menino Deus, na região nordeste do município, às margens do reservatório do Vacacaí-Mirim, entre as coordenadas 53°47'05" e 53°48'00" de longitude oeste e 29°40'20" e 29°40'40" de latitude sul.

A figura 14 apresenta o mapa de localização da Bacia Sítio do Tio Pedro no contexto regional e a figura 15 mostra uma foto área da mesma bacia.

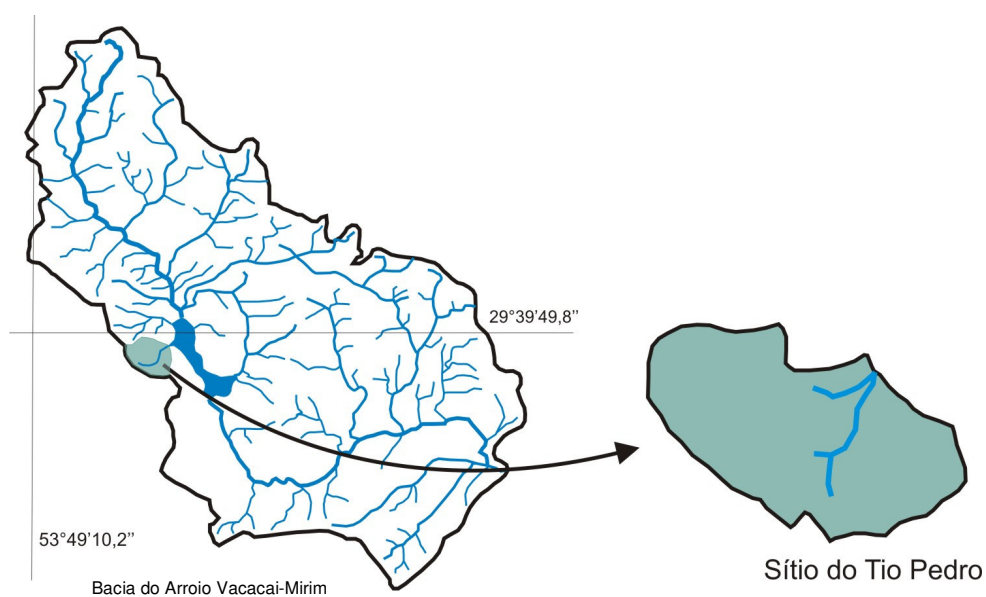


FIGURA 14 – Localização da Bacia Sítio do Tio Pedro.



(FONTE: Bastos – 2007)

FIGURA 15 – Foto aérea da Bacia Sítio do Tio Pedro.

4.3.1 Características Físicas da Bacia Sítio do Tio Pedro (STP)

As características físicas representam fatores essenciais no comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica, portanto é de fundamental importância precisá-los numericamente para facilitar a sua compreensão e seu estudo.

Para compor este trabalho foram utilizados os dados das características físicas da bacia hidrográfica elaborados por Bellinaso (2002) e Bastos (2007).

Para auxiliar na determinação das características físicas da bacia, foram utilizadas cartas topográficas na escala 1: 25000, que foram convertidas para o formato digital e georreferenciadas.

A tabela 3, apresenta as características físicas da Bacia Sítio do Tio Pedro.

TABELA 3 – Características Físicas da Bacia Sítio do Tio Pedro.

Parâmetro	Dimensão	
Área	0,39	Km ²
Comp. do Rio Princ.	463,85	m
Declividade Rio princ.	0,10	m/m
Declividade média	0,26	m/m
Situação	Semi-Urbanizada	

4.3.2 Clima e Solos (STP)

Conforme foi exposto anteriormente, na classificação proposta por Köopen, Santa Maria se enquadra no clima Subtropical Úmido tipo Cfa,

Onde:

C: temperatura media 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 media do mês mais quente superior a 22 C°.

Quanto à classificação dos solos, foi utilizada novamente a classificação feita por Azolin e Mutti (1998 apud MELLER 2004), e posteriormente descrito por Belinaso (2002) e Bastos (2007). Abaixo segue a classificação usada:

- 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 e 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.

Nas figuras 16 e 17 são apresentados os mapas de tipos de solo para a Bacia Sítio do Tio Pedro.

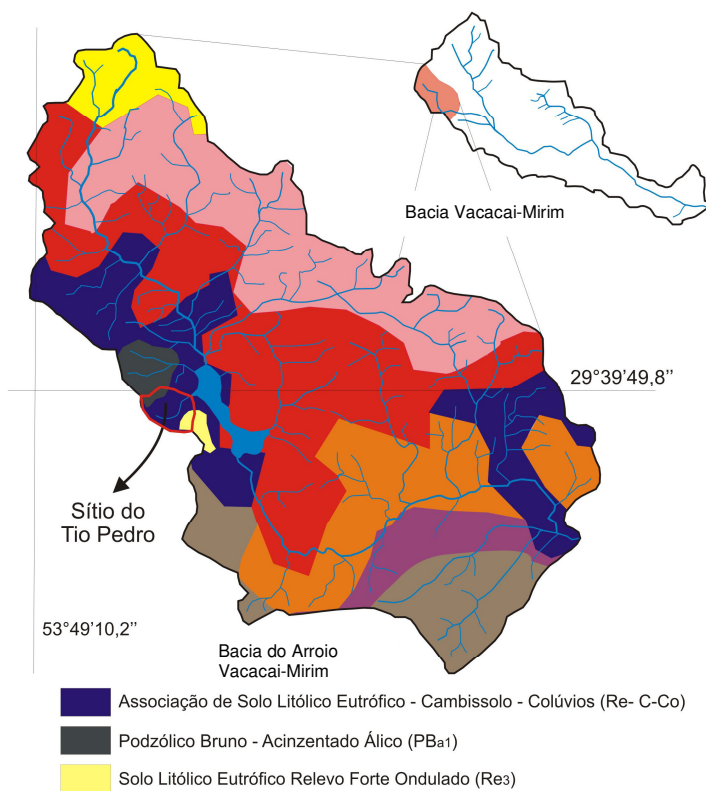
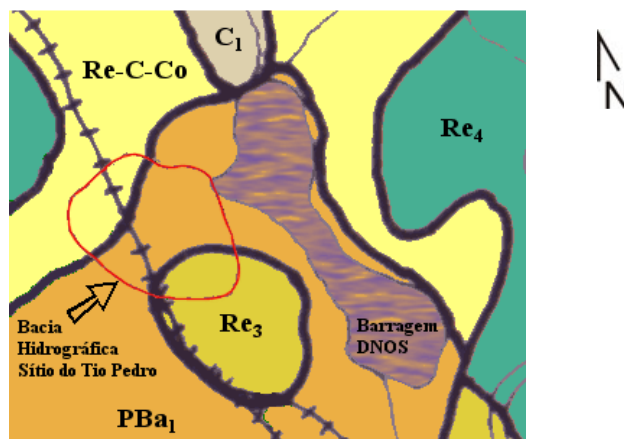


FIGURA 16 – Tipos de Solo da Bacia Sítio do Tio Pedro.



(FONTE: Belló – 2004)

FIGURA 17 – Tipos de Solo da Bacia Sítio do Tio Pedro.

4.3.3 Uso e Ocupação do Solo (STP)

A bacia em estudo é uma bacia de encosta semi-urbanizada, com uso do solo bastante diversificado, contendo cobertura vegetal com matas nativas e ciliares, até as condições artificiais oferecidas e provocadas pela urbanização.

Segundos Bastos (2007), em se tratando do critério da cobertura vegetal, 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.

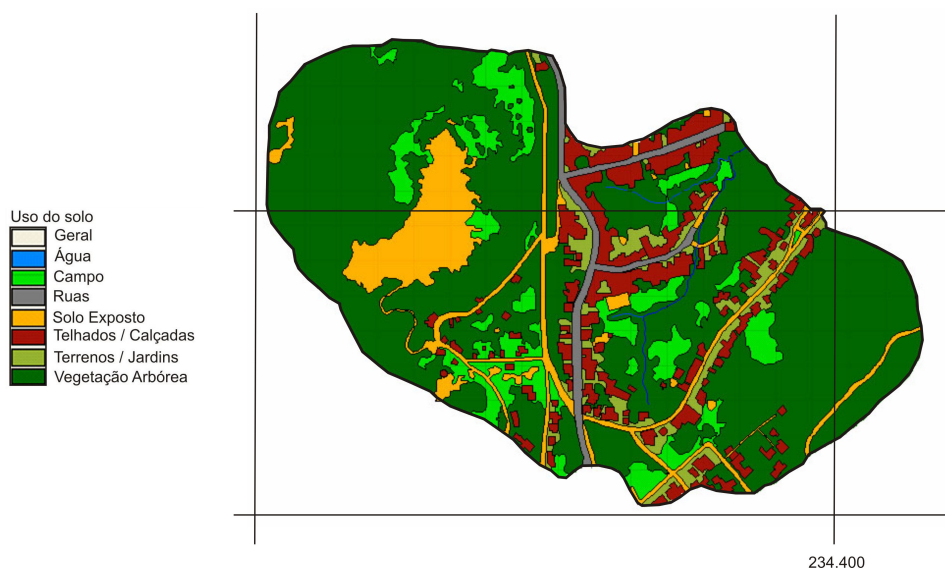
Da mesma maneira que foi feito para a Bacia Alto da Colina II (ACII), foi utilizada uma imagem do satélite *IKONOS*., Para a bacia em questão a imagem foi do dia 24 de maio de 2004 com as seguintes propriedades:

- Imagem pacromática com resolução no terreno de 1 metro.
- Resolução radiométrica de 11 bits (possibilita distinguir objetos de 1m).
- Foram utilizados dados usados por Bastos (2007), os quais foram tratados conforme segue:
 - Georeferenciamento da porção da imagem selecionada com o software *SPRING*
 - Utilização de cartas topográficas na escala 1:25.000 referenciadas pelo DATUM UTM/SAD-69 e DATUM vertical IMBITUBA.
 - Obtidos 15 pontos de controle retirados de uma imagem de satélite mais antiga.
 - Classificação da composição do uso do solo com o software *ARCVIEW GIS 3.1*, onde foram determinadas 7 classes agrupadas em áreas permeáveis e impermeáveis.
- iii. Impermeáveis: ruas, telhados e calçadas
- iv. Permeáveis: espelho d'água, campo, solo exposto, terrenos, jardins e vegetação arbórea.

Através dos mapas de uso e ocupação do solo georeferenciado (figura 18 e 19) pôde-se gerar a tabela 4, que apresenta os dados de uso do solo para a Bacia Sítio do Tio Pedro.

TABELA 4 – Uso do Solo da Bacia Sítio do Tio Pedro.

Uso do Solo	Área (ha)	(%)
Espelho d'água	0,00	0,00
Campos	4,09	10,43
Ruas	1,04	2,65
Solo Exposto	4,27	10,89
Telhados/Calçadas	4,09	10,44
Terrenos/Jardins	1,86	4,75
Vegetação Arbórea	23,87	60,84
Total Impermeável	5,13	13,09
Total Permeável	34,09	86,91



(FONTE: Bastos – 2007)

FIGURA 18 – Uso e Ocupação do solo da Bacia Sítio do Tio Pedro.

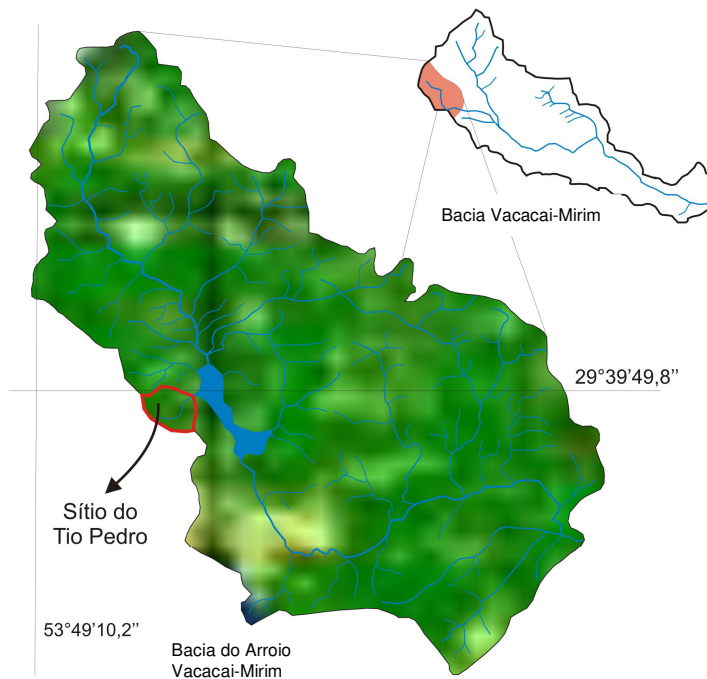


FIGURA 19 – Localização da Bacia Sítio do Tio Pedro na bacia do Arroio Vacacai-Mirim, com ênfase no uso solo.

4.3.4 Características de Relevo do Solo (STP)

Conforme foi especificado para a Bacia Alto da Colina II, as características do relevo são importantes devido a grande influência sobre os fatores meteorológicos (temperatura, precipitação, evaporação, etc, que são função da altitude) e hidrológicos (a velocidade do escoamento superficial é função da declividade do terreno).

A figura 20 apresenta o mapa de declividades.

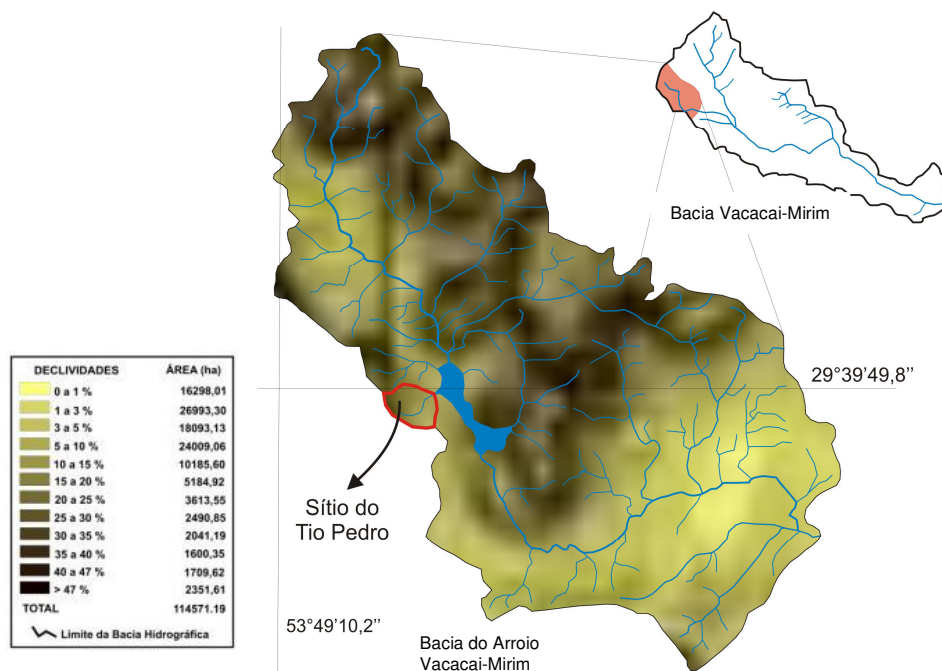
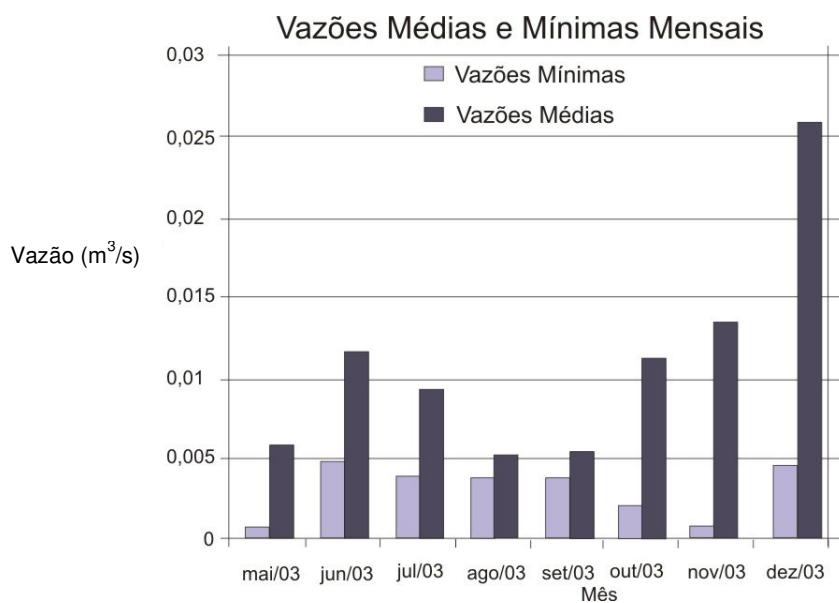


FIGURA 20 – Declividades da Bacia Sítio do Tio Pedro.

4.3.5 Dados Fluviográficos Disponíveis (STP)

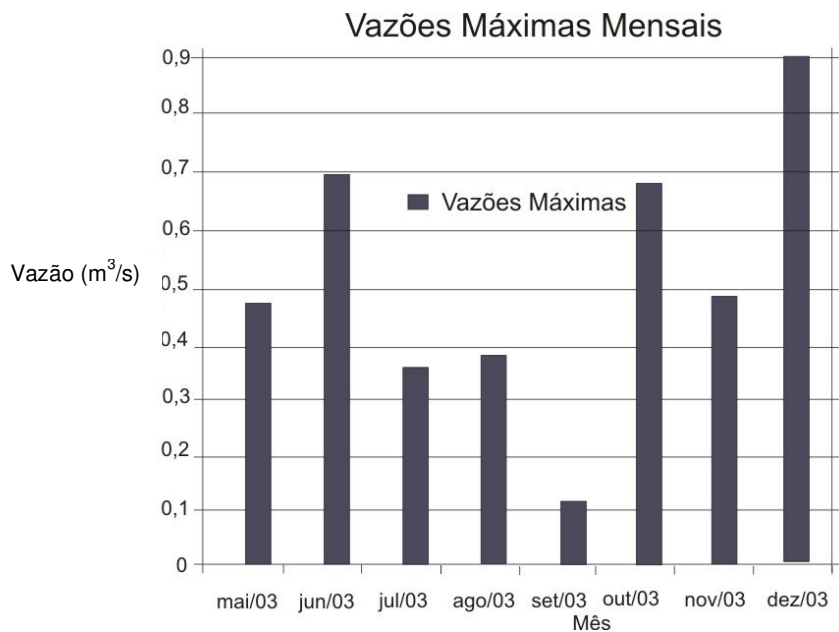
Para a realização deste estudo foram utilizados dados fluviográficos usados por Bastos (2007), coletados por Bellinaso (2002) durante o período de junho de 2000 e Novembro de 2003 e por Belló (2004) durante o período de março de 2003 a dezembro de 2003.

O gráfico 6, mostra as vazões mínimas absolutas e médias mensais no período de junho de 2001 a março de 2002 para a Bacia Sítio do Tio Pedro. O gráfico 7 mostra as vazões máximas absolutas mensais no mesmo período para a Bacia Sítio do Tio Pedro.



(FONTE: Bellinaso – 2003)

GRÁFICO 6 – Vazões Médias e Mínimas (mar/03 – dez/03) para a Bacia Sítio do Tio Pedro.



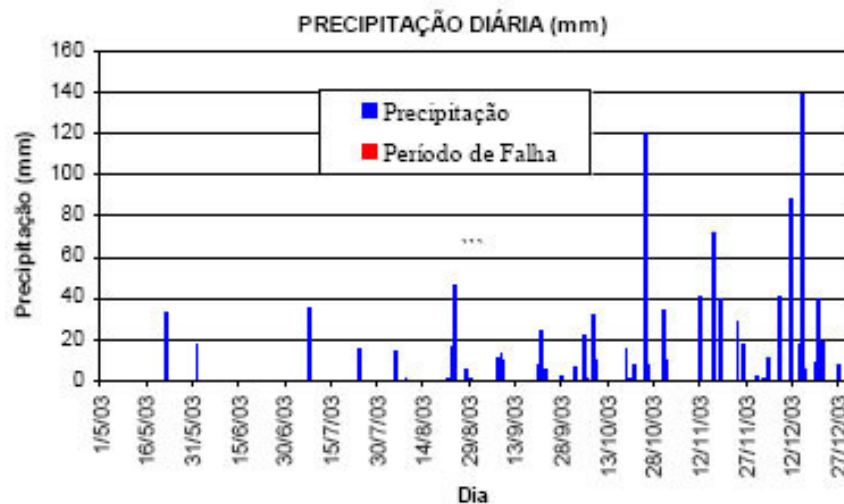
(FONTE: Bellinaso – 2003)

GRÁFICO 7 – Vazões Máximas (mar/03 – dez/03) para a Bacia Sítio do Tio Pedro.

4.3.6 Dados Pluviográficos Disponíveis (STP)

Para a realização deste estudo foram utilizados dados pluviográficos usados por Bastos (2007), provenientes da estação pluviográfica Sítio do Tio Pedro. Foram selecionados 5 eventos entre maio e dezembro de 2003, usados 5 eventos para calibração e os mesmos 5 eventos para validação do modelo em um processo iterativo.

O gráfico 8 representa os dados disponíveis no período.

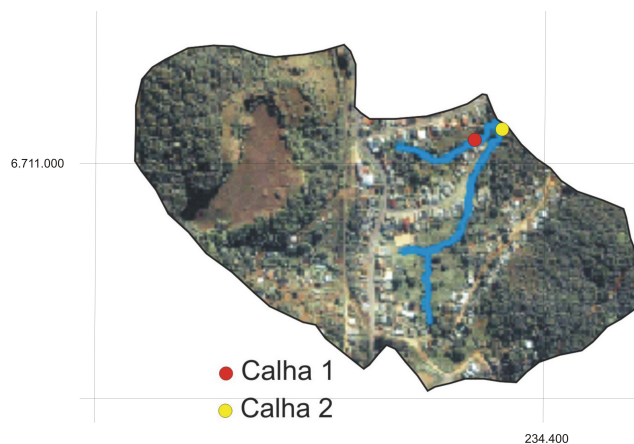


(FONTE: Bastos – 2007)

GRÁFICO 8 – Dados Pluviográficos da Bacia Sítio do Tio Pedro.

4.3.7 Dados de Sedimentos Disponíveis (STP)

Os dados de sedimentos foram retirados do trabalho realizado por Belló (2004), onde foram coletadas amostras em duas calhas situadas em diferentes pontos da bacia, conforme a figura 21.



(FONTE: Belló – 2004)

FIGURA 21 – Calhas de medição de sedimentos (STP).

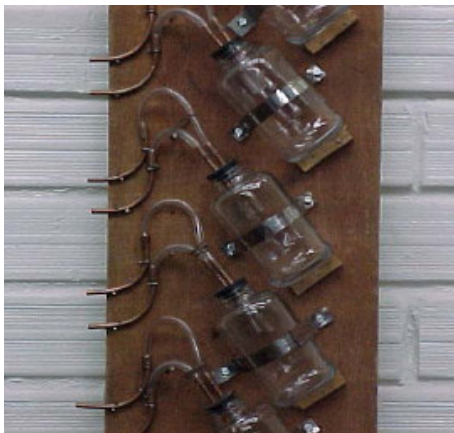
Conforme demonstra a figura 21, a Calha 1 controla a parte urbana e a Calha 2 controla toda a saída da bacia, devido a este fato foram usados dados referentes a Calha 2. A figura 22 apresenta a calha 2.



(FONTE: Belló – 2004)

FIGURA 22 – Calha 2 de medição de sedimentos (STP).

Para determinação dos sedimentos, Belló (2004), usou o amostrador de fluxo ascendente (US-U-59), figura 23.



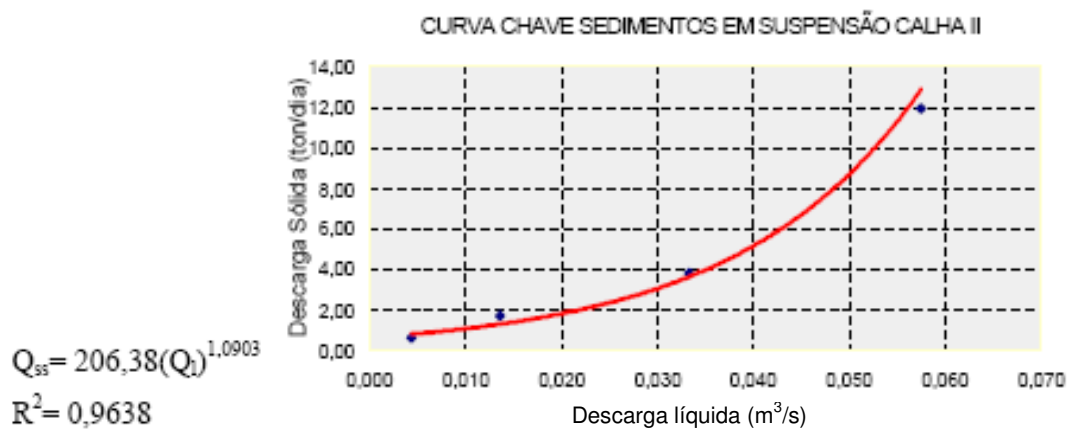
(FONTE: Belló – 2004)

FIGURA 23 – Amostrador US-U-59 (ANA).

De acordo com Carvalho (1993), este amostrador consiste em uma garrafa com tubos em sifão, um para admissão da amostra e outro para saída do ar. São usados em cheias rápidas e em cursos d'água intermitentes, especialmente em locais remotos ou de difícil acesso. O amostrador é instalado em nível pré-determinado, num suporte vertical, de preferência numa posição perto ou no centro do curso d'água. As aberturas dos tubos deverão ficar orientadas contra a corrente, sendo que um ou mais amostradores podem ser montados, um acima outro numa mesma vertical, para coleta em diversos níveis selecionados.

A forma de sifão da tubulação e o posicionamento dos locais de saída de ar em sentido contra-corrente a 3 cm acima do sifão de tomada da amostra, são adotados com o objetivo de evitar a recirculação da mistura água e sedimento, através da garrafa, quando o equipamento estiver submerso, Umezawa (1979).

O gráfico 9 apresenta a curva-chave de sedimentos obtida por Belló (2004), utilizada como base para este trabalho.



(FONTE: Belló – 2004).

GRÁFICO 9 – Curva-chave de sedimento em suspensão, para o Amostrador U-US-59 (ANA), da bacia hidrográfica Sítio do Tio Pedro, Santa Maria RS.

5 RESULTADOS

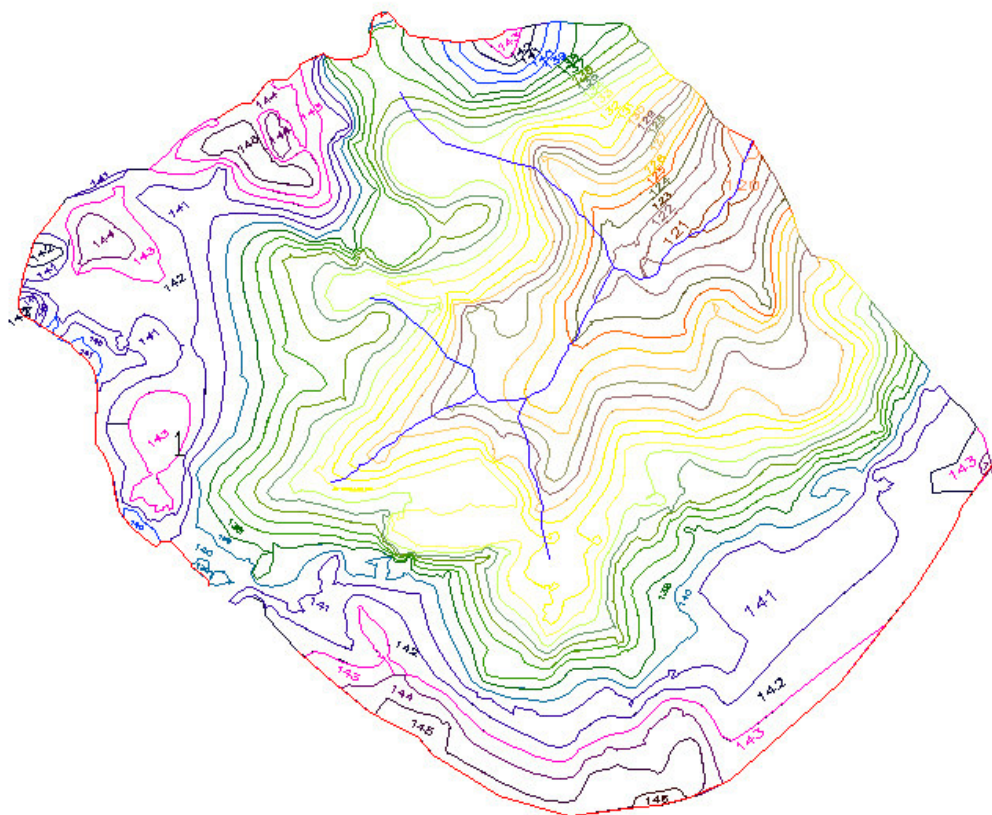
Neste capítulo serão apresentados os resultados da aplicação do modelo *Kineros2 (1990)* às Bacias Alto da Colina II e Sítio do Tio Pedro.

5.1 Bacia Alto da Colina II

5.1.1 Discretização da Bacia Alto da Colina II

A Bacia Alto da Colina II foi discretizada em 22 elementos, dos quais 15 são planos e 7 são canais. Cada elemento denominado “plano”, compreende uma área de escoamento e foi definido levando-se em consideração a homogeneidade das características do solo, a declividade média, e as linhas de fluxo, segundo a identificação de áreas homogêneas a partir da superposição de mapas físicos da bacia, como o de topografia, vegetação e linhas de fluxo.

A figura 24 apresenta o mapa de curvas de nível para a Bacia Alto da Colina II.



Fonte: GHIDROS.

FIGURA 24 – Curvas de Nível da Bacia Alto da Colina II.

A figura 25 apresenta o mapa de discretização e a figura 26 apresenta a representação esquemática da Bacia Alto da Colina II.

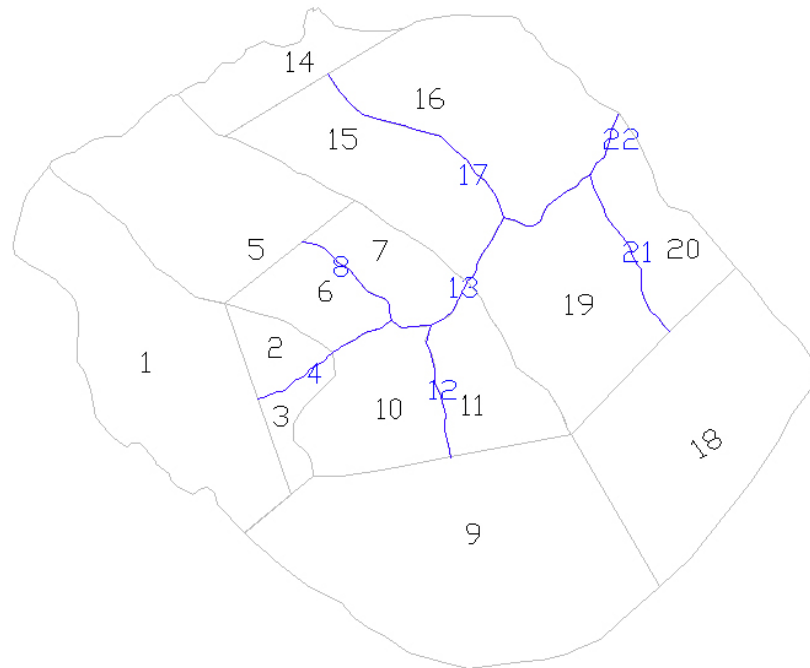


FIGURA 25 – Discretização da Bacia Alto da Colina II.

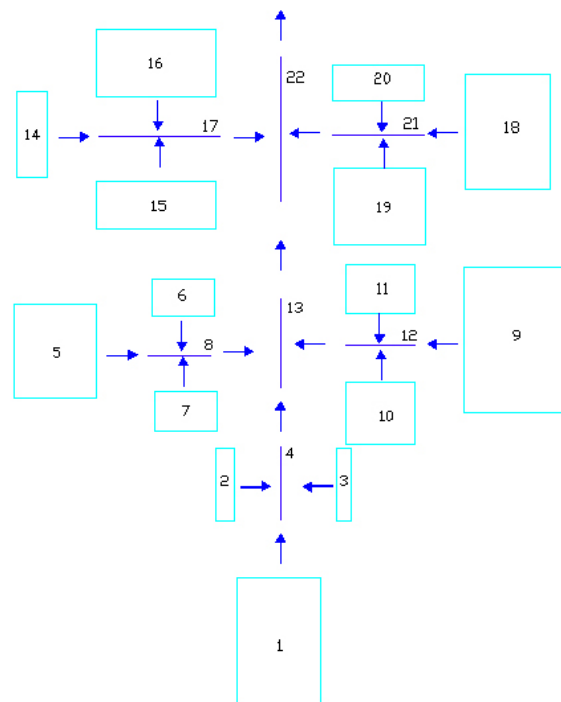


FIGURA 26 – Representação Esquemática da Discretização da Bacia Alto da Colina II.

5.1.2 Determinação dos Parâmetros do Modelo *Kineros2 (1990)*

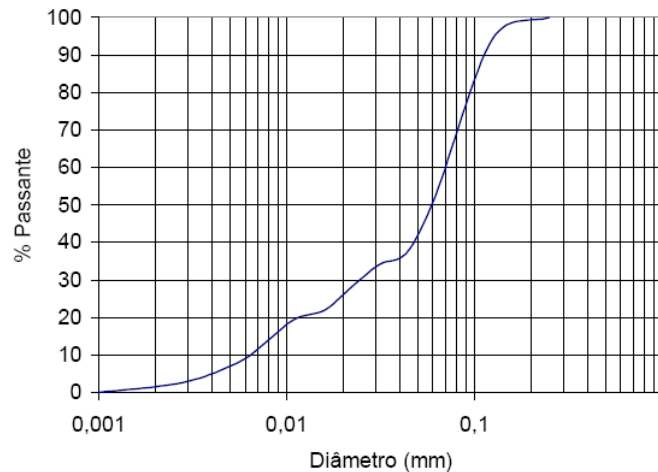
Os parâmetros do modelo foram estabelecidos de acordo com as características de cada parcela, ou seja, de acordo com o tipo de solo, cobertura vegetal, declividade, etc. A seguir são apresentados todos os parâmetros utilizados para modelar o escoamento superficial e erosão do solo nas parcelas da Bacia Alto da Colina II.

O modelo *Kineros2 (1990)* utiliza um conjunto de parâmetros de entrada que podem ser agrupados em três grandes grupos:

- (a) parâmetros que podem ser determinados com base nas informações disponíveis na literatura;
- (b) parâmetros cujos valores podem ser medidos experimentalmente em campo ou no laboratório;
- (c) parâmetros cujos valores devem ser determinados pela calibração do modelo.

Nesta pesquisa, os parâmetros do modelo *Kineros2 (1990)* utilizados para a modelagem nas parcelas foram:

- i) Tamanho característico dos sedimentos (d):** Existem vários critérios para a escolha do diâmetro representativo de misturas de sedimentos. O d_{50} consiste no diâmetro do sedimento tal que 50 % da amostra tem diâmetro inferior. O valor desse parâmetro foi determinado da curva granulométrica apresentada na figura 27. com base na distribuição granulométrica de algumas amostras coletadas em campo por Carvalho (2003).



Fonte: (Carvalho – 2003)

FIGURA 27 – Granulometria do Material em Suspensão da Bacia Alto da Colina II.

- ii) **Densidade relativa dos sedimentos (S_s):** assumido como sendo igual a 2,65, o que corresponde à densidade relativa do grão de quartzo.
- iii) **Temperatura da água:** considerada como sendo igual a 20°C, temperatura média normalmente encontrada na Bacia Alto da Colina II.
- iv) **Coeficiente de rugosidade de Manning (n):** o coeficiente de Manning foi adotado de acordo com as características da Bacia, sendo um parâmetro de calibração do modelo.
- v) **Condutividade hidráulica saturada efetiva (K_s):** de acordo com os estudos de Bouwer (1966), Whisler e Bouwer (1970), Rawls et al. (1983), o valor efetivo da condutividade hidráulica saturada que deve ser utilizado em modelos de infiltração como o de Green e Ampt (1911) e Smith e Parlange (1978), deve ser a metade do valor da condutividade hidráulica saturada, devido ao ar aprisionado nos vazios do solo, fenômeno que normalmente ocorre em situações reais em campo. Devido ao fato do K_s ser um parâmetro de calibração do modelo e após feitas algumas simulações, o valor de que melhor ajustou a lâmina escoada foi 4,12 mm/h.
- vi) **Declividade média das parcelas ($Slope$):** foram determinadas a partir de levantamentos topográficos e estão apresentadas na Tabela 5.

Na tabela 5 pode-se verificar as características físicas dos planos e canais discretizados para a Bacia Alto da Colina II. Tais dados foram obtidos através de estudos do mapa de curvas de nível da Bacia.

TABELA 5 – Áreas e Declividades da Bacia Alto da Colina II.

Elemento	Tipo	Area (m ²)	Perimetro (m)	Comprim. (m)	Largura (m)	Desnível (m)	Declividade
1	plano	182508,27	2055,00	342,99	532,10	9,50	0,028
2	plano	22132,90	643,55	187,91	117,79	4,00	0,021
3	plano	16807,11	757,45	187,91	89,44	4,00	0,021
4	canal			187,91		4,00	0,021
5	plano	131386,81	1562,11	340,62	385,73	8,00	0,023
6	plano	39605,60	854,11	262,64	150,80	6,50	0,025
7	plano	41801,87	899,69	262,64	159,16	6,50	0,025
8	canal			262,64		6,50	0,025
9	plano	264692,51	2952,31	438,39	603,79	14,50	0,033
10	plano	72402,27	1101,73	283,05	255,80	5,00	0,018
11	plano	56376,48	2047,63	283,05	199,17	5,00	0,018
12	canal			283,05		5,00	0,018
13	canal			346,55		4,50	0,013
14	plano	43259,59	1150,77	122,16	354,12	1,50	0,012
15	plano	97717,66	1738,54	494,96	197,43	13,50	0,027
16	plano	139103,51	1759,35	494,96	281,04	13,50	0,027
17	canal			494,96		13,50	0,027
18	plano	167467,32	1672,76	353,04	474,36	12,50	0,035
19	plano	116342,44	1438,85	373,82	311,22	9,50	0,025
20	plano	54410,71	1121,23	373,82	145,55	9,50	0,025
21	canal			373,82		9,50	0,025
22	canal			523,92		5,50	0,010
Total		1446015,03	(m ²)				
Total		1,45	(km ²)				

vii) **Parâmetros relacionados à microtopografia (*relief e spacing*):** Após várias tentativas o parâmetro *relief* foi assumido como sendo igual a 29 mm e o parâmetro *spacing* como sendo 3,3 m para todas os planos. Esses valores foram os que forneceram os melhores resultados na simulação do hidrograma.

vii) **Valor efetivo do potencial de capilaridade (G), porosidade (Φ) e índice de distribuição dos tamanhos dos poros (Di_{σ}):** Estes parâmetros variam de acordo com o tipo de solo, e foram determinados a partir de estudos realizados na área. O valor inicial para os parâmetros (G) e (Φ) foi obtido baseado na tabela 6 citada por Silva (2005). Como o solo das parcelas é Argissolo Bruno-Acinzentado, e se enquadra na classe argilo-arenoso, tem-se os seguintes valores: $G = 41$, $\Phi = 0,261$ e $Di_{\sigma} = 0,01$.

TABELA 6 – Estimativa para Propriedades Hidráulicas do Solo.

Classes do Solo	Porosidade (Φ)	Capilaridade Média do Solo (G)
<i>Arenoso</i>	0,437 - 0,063	5,0
<i>Areia Franca</i>	0,047 - 0,069	7,0
<i>Franco Arenoso</i>	0,453 - 0,102	13,0
<i>Franco</i>	0,463 - 0,088	11,0
<i>Franco Siltoso</i>	0,501 - 0,081	20,0
<i>Franco Argiloso Arenoso</i>	0,398 - 0,066	26,0
<i>Franco Argiloso</i>	0,464 - 0,055	26,0
<i>Franco Argiloso Siltoso</i>	0,471 - 0,053	35,0
<i>Argilo Arenoso</i>	0,430 - 0,060	30,0
<i>Argilo Siltoso</i>	0,479 - 0,054	38,0
<i>Argila</i>	0,475 - 0,048	41,0

Fonte: (Silva – 2005)

ix) Parâmetro relacionado à coesão do solo (Co): parâmetro que influencia no cálculo da erosão por arrasto devido ao fluxo superficial. Foi feita uma análise de sensibilidade deste parâmetro, e a produção de sedimentos mostrou-se praticamente insensível à sua variação. Dessa forma, o parâmetro Co pode ser assumido como qualquer valor entre 0 e 1, sendo adotado neste trabalho Co igual a 0,0005.

Estando definidos todos esses parâmetros, ainda falta determinar a saturação inicial relativa do solo Si , cujo valor é dado em função de Φ e θ_i , onde θ_i é a umidade inicial relativa do solo, e Φ é a porosidade. O valor deste parâmetro varia de evento para evento e foi determinado por calibração, ajustando-o até que o volume escoado calculado se igualasse ao volume escoado observado. Da mesma forma, foi determinado o parâmetro cf , o qual é relativo ao cálculo da erosão por impacto das gotas de chuva. Esse parâmetro foi calibrado para cada evento, até que o valor da produção de sedimentos calculada se igualasse à produção de sedimentos observada. A sua influência na variação da erosão é pequena.

5.1.3 Resultados dos parâmetros para a Bacia Alto da Colina II

Na tabela 7 pode-se observar os valores finais obtidos para os parâmetros para os 5 eventos utilizados na calibração, além da media dos mesmos.

TABELA 7 – Valores finais para os parâmetros para a Bacia Alto da Colina II.

EVENTO	Manning	Relief (mm)	Spacing (m)	Interception (mm)	SAT	CV	Ks (mm/h)	G (mm)	Distribution	Porosity	Splash	Co
05/06/01	0,8	29	3,3	0,3	0,52	0,69	4,12	41	0,01	0,261	4000	0,0005
13/11/01	0,8	29	3,3	0,3	0,52	0,69	4,12	41	0,01	0,261	4000	0,0005
15/11/01	0,8	29	3,3	0,3	0,52	0,69	5,12	41	0,01	0,261	4000	0,0005
19/07/01	0,8	29	3,3	0,3	0,52	0,69	10,12	41	0,01	0,261	4000	0,0005
25/03/02	0,6	29	3,3	0,3	0,52	0,69	7,12	41	0,01	0,261	4000	0,0005
média	0,76	29	3,3	0,3	0,52	0,69	6,12	41	0,01	0,261	4000	0,0005

5.1.4 Simulação do Escoamento Superficial e Erosão do Solo

Para simular os processos de escoamento superficial e produção de sedimentos em bacias hidrográficas através do modelo **Kineros2 (1990)**, deve-se inicialmente realizar a discretização das bacias em elementos planos e canais de escoamento. Segundo Lane e Woolhiser (1977), a simplificação de bacias hidrográficas em elementos planos e canais pode trazer distorções ao resultado do escoamento superficial (hidrograma observado) e, por conseqüência, ao resultado da produção de sedimentos.

As discretizações foram realizadas da seguinte maneira:

- traçado do sistema de canais;
- delimitação das áreas que contribuam para cada canal sempre cruzando as curva de nível perpendicularmente. Quando havia qualquer mudança de declividade, a área era dividida em mais elementos, até que cada elemento plano ou canal fosse o mais homogêneo possível, seja em tipo de solo, vegetação ou declividade.
- traçado das linhas de fluxo, acompanhando a declividade dos planos. O comprimento dessa linha de fluxo define o comprimento do plano. A largura do plano é determinada como sendo a área do elemento

dividida pelo comprimento do plano. O comprimento de cada canal é o mesmo medido no mapa, conservando assim, o comprimento de drenagem da bacia. A declividade de cada elemento plano ou canal é determinada como sendo a diferença de cota ao longo de seu comprimento dividido por esse comprimento.

5.1.5 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 determinação e também levando em conta o erro médio no volume escoado e na vazão de pico.

Nas figuras numeradas de 28 a 32 são apresentados os hidrogramas de calibração para os dias 05/06/2001, 13/11/2001, 15/11/2001, 25/03/2002 e 19/07/2001.

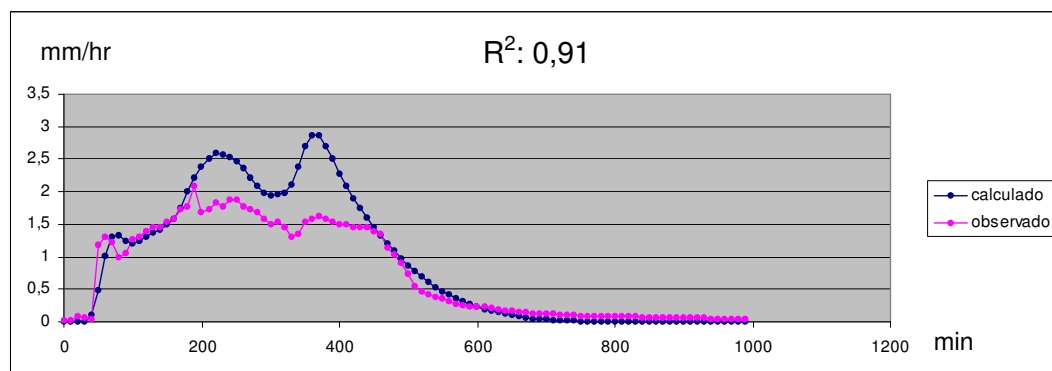


FIGURA 28 – Calibração da Vazão para o Evento 05/06/2001 da Bacia Alto da Colina II.

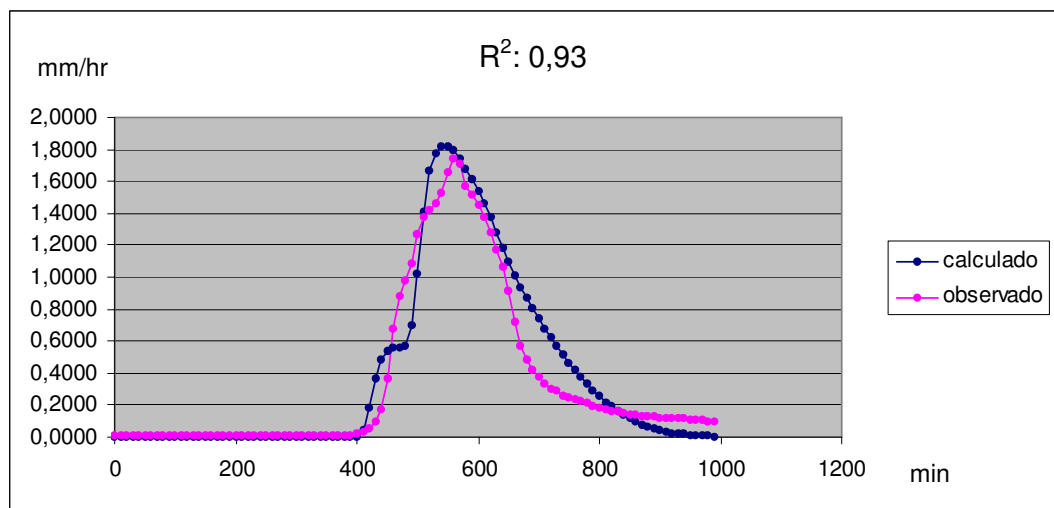


FIGURA 29 – Calibração da Vazão para o Evento 13/11/2001 da Bacia Alto da Colina II.

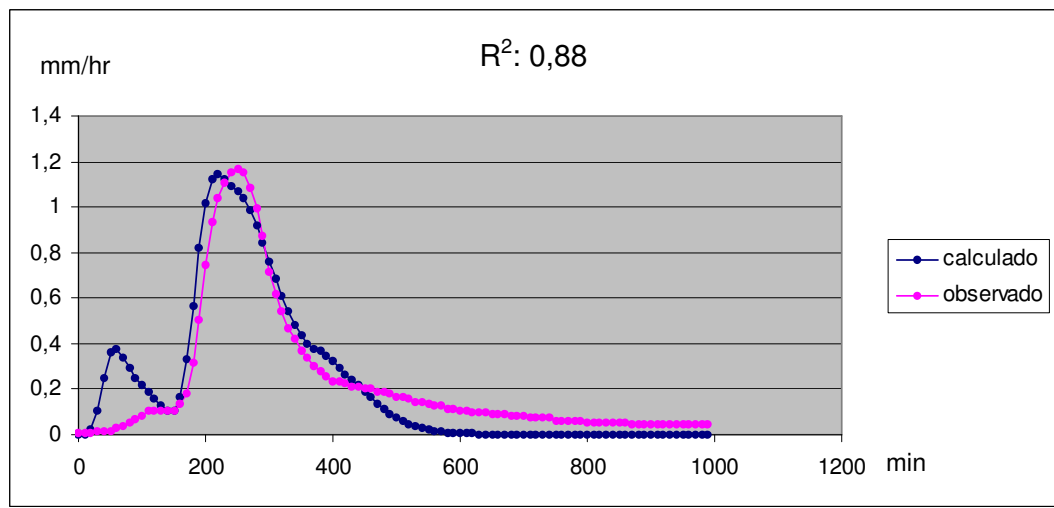


FIGURA 30 – Calibração da Vazão para o Evento 15/11/2001 da Bacia Alto da Colina II.

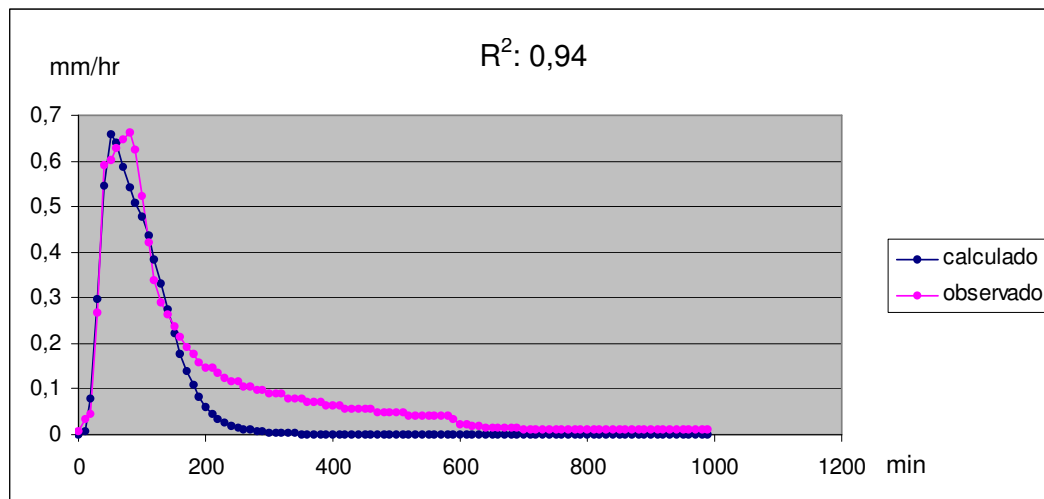


FIGURA 31 – Calibração da Vazão para o Evento 25/03/2002 da Bacia Alto da Colina II.

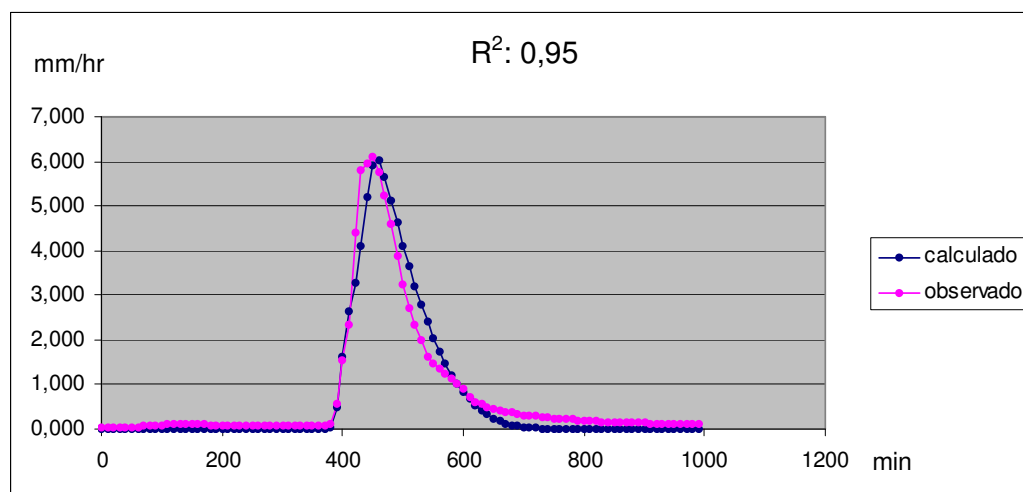


FIGURA 32 – Calibração da Vazão para o Evento 19/07/2001 da Bacia Alto da Colina II.

5.1.6 Simulação de vazão para a Bacia Alto da Colina II com os valores médios dos parâmetros

Para verificar a qualidade dos ajustes do modelo, para o conjunto dos eventos calibrados, foram usados valores médios dos parâmetros obtidos durante a calibração, para simular os resultados de cada evento individual.

Nas figuras numeradas de 33 a 37 são apresentados os gráficos contendo o

resultado da simulação da vazão do modelo *Kineros2 (1990)* para a Bacia Alto da Colina II, utilizando os valores médios dos parâmetros.

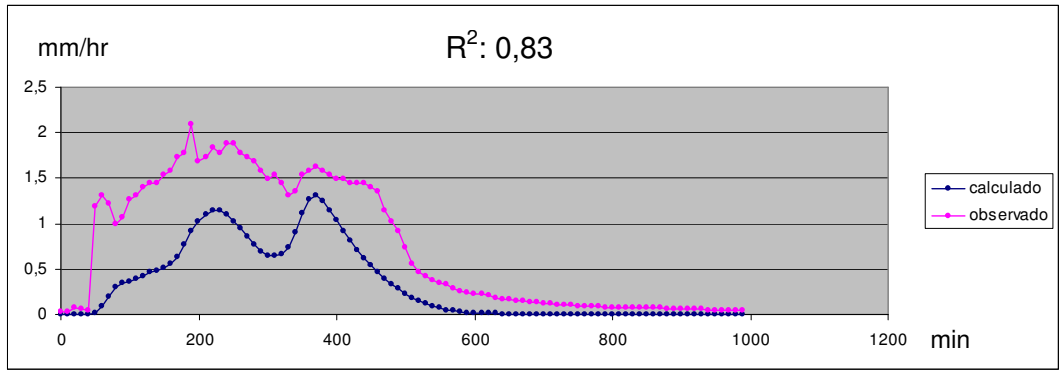


FIGURA 33 – Simulação da Vazão para o Evento 05/06/2001 da Bacia Alto da Colina II, utilizando os valores médios dos parâmetros.

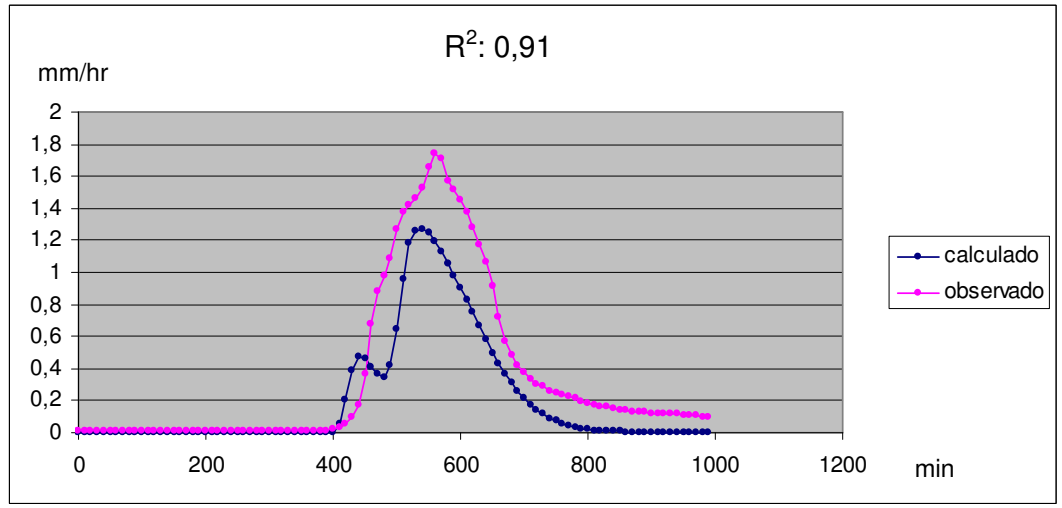


FIGURA 34 – Simulação da Vazão para o Evento 13/11/2001 da Bacia Alto da Colina II, utilizando os valores médios dos parâmetros.

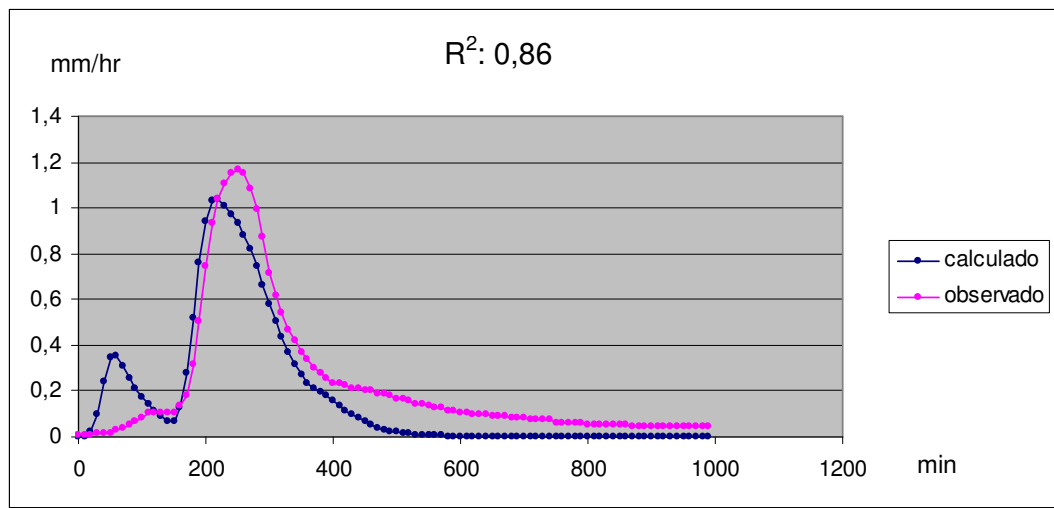


FIGURA 35 – Simulação da Vazão para o Evento 15/11/2001 da Bacia Alto da Colina II,utilizando os valores médios dos parâmetros.

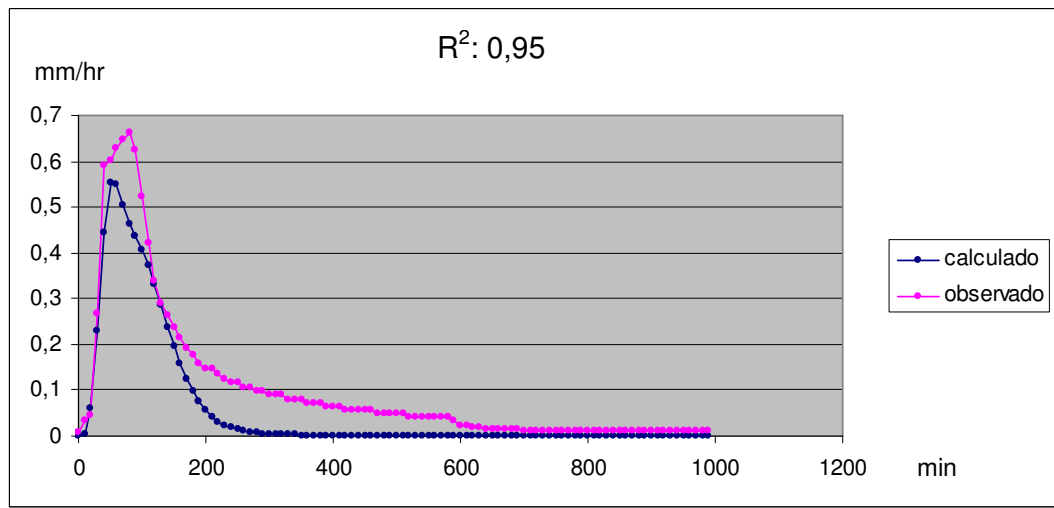


FIGURA 36 – Simulação da Vazão para o Evento 25/03/2002 da Bacia Alto da Colina II,utilizando os valores médios dos parâmetros.

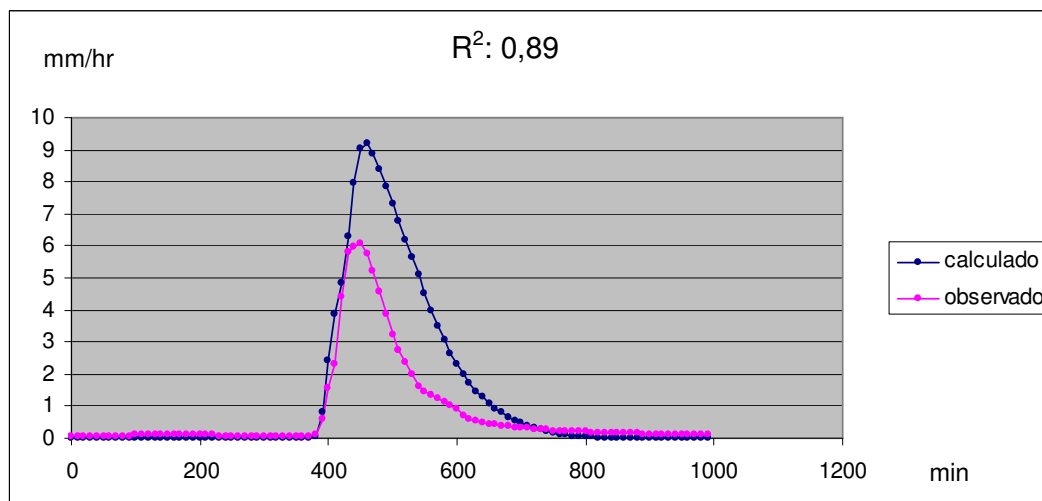


FIGURA 37 – Simulação da Vazão para o Evento 19/07/2001 da Bacia Alto da Colina II, utilizando os valores médios dos parâmetros.

Observa-se que em geral houve uma redução no coeficiente de determinação para todos os eventos, no entanto, sem invalidar a qualidade do ajuste, conforme pode ser visto na tabela 8.

TABELA 8 – Valores do coeficiente de determinação obtidos na calibração dos eventos individuais e na simulação com os parâmetros médios.

Evento	R ² (calibração)	R ² (Verificação da Qualidade do Ajuste)
05/06/2001	0,91	0,83
13/11/2001	0,93	0,91
15/11/2001	0,88	0,86
25/03/2002	0,94	0,95
19/07/2001	0,95	0,89

5.1.7 Resultado da calibração da Produção de Sedimentos para a Bacia Alto da Colina II

A produção de sedimentos também foi simulada utilizando o modelo **Kineros2 (1990)**. De acordo com a literatura (Walling, 1983; Julien e Frenette, 1986), a produção de sedimentos acumulada anual média diminui com o aumento

da área da bacia, para as mesmas características de solo e cobertura vegetal. Os parâmetros adicionais referentes à produção de sedimentos utilizada no modelo **Kineros2 (1990)** foram:

- i) **Diâmetro característico dos sedimentos (d):** Foi adotado o diâmetro d_{50} cujo valor obtido da curva granulométrica apresentada na figura 27, página 82, foi igual a 0,50 mm;
- ii) **Densidade relativa dos sedimentos (S_s):** assumido como sendo igual a 2,65, o que corresponde à densidade relativa do grão de quartzo.
- iii) **Parâmetro relacionado à coesão do solo (co):** parâmetro que influencia no cálculo da erosão por arrasto do fluxo superficial. Como a produção de sedimentos nas parcelas mostrou-se praticamente insensível à sua variação, foi considerado o mesmo valor utilizado para as escalas menores. Sendo assim, o valor do parâmetro foi assumido como sendo igual a 0,0005.

Os valores da produção de sedimentos obtidos com o modelo **Kineros2 (1990)** estão mostrados nas figuras numeradas de 38 a 42:

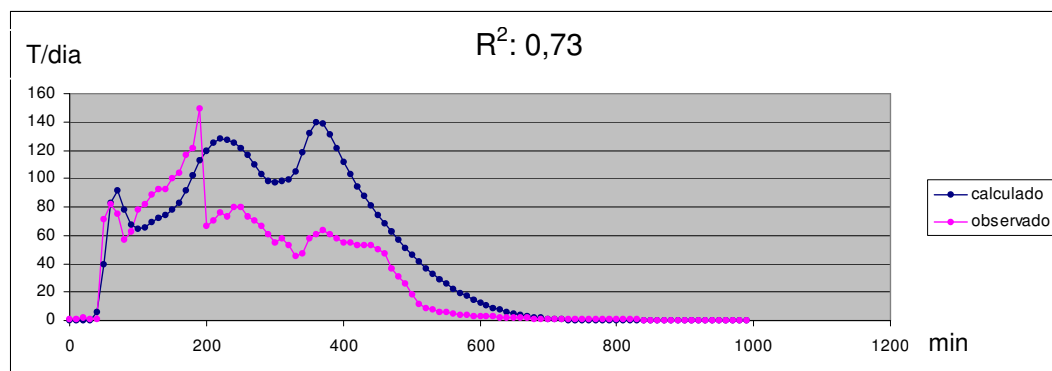


FIGURA 38 – Calibração da Produção de Sedimentos para o Evento 05/06/2001 da Bacia Alto da Colina II.

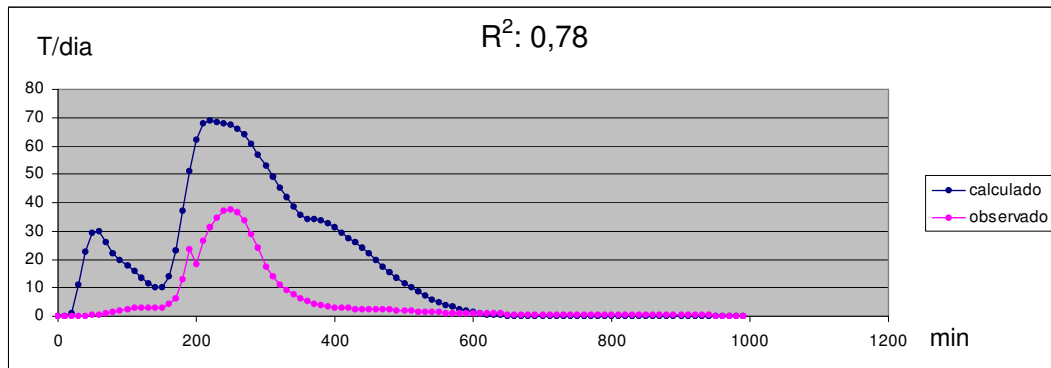


FIGURA 39 – Calibração da Produção de Sedimentos para o Evento 13/11/2001 da Bacia Alto da Colina II.

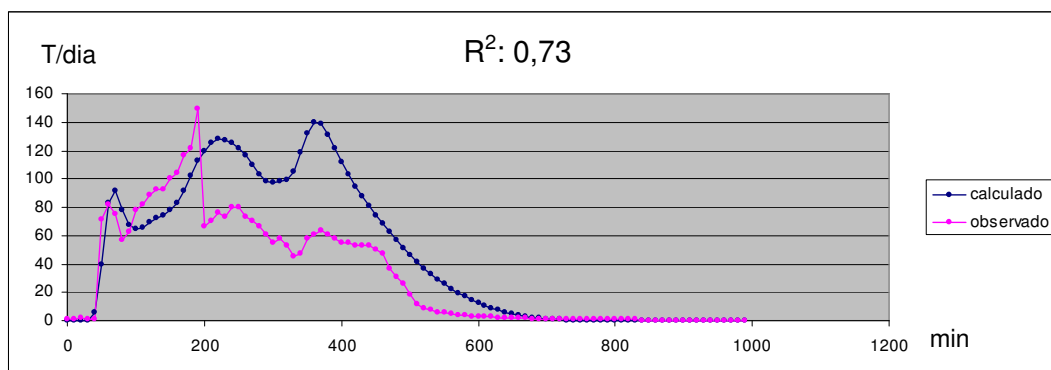


FIGURA 40 – Calibração da Produção de Sedimentos para o Evento 15/11/2001 da Bacia Alto da Colina II.

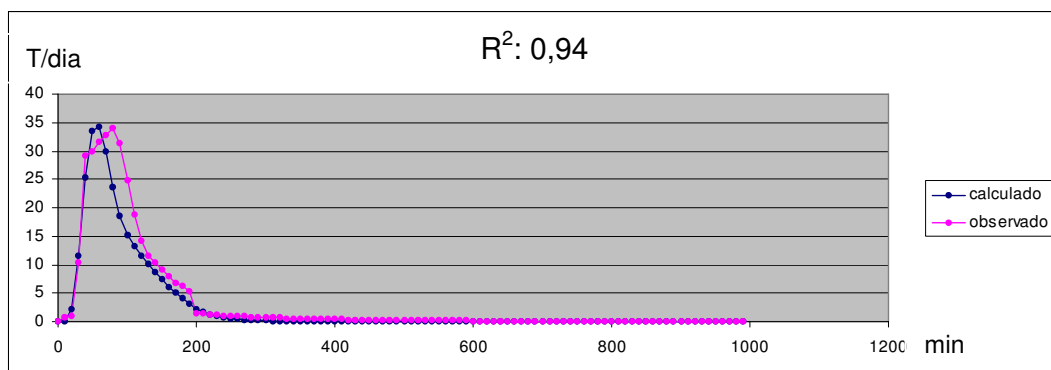


FIGURA 41 – Calibração da Produção de Sedimentos para o Evento 25/03/2002 da Bacia Alto da Colina II.

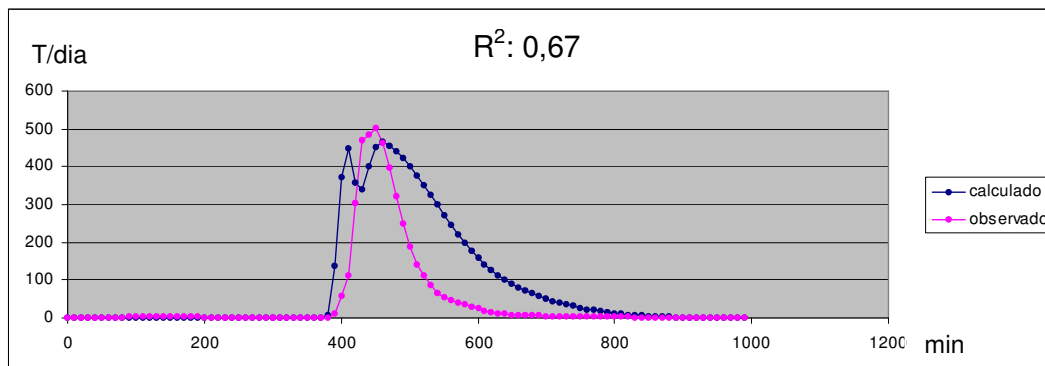


FIGURA 42 – Calibração da Produção de Sedimentos para o Evento 19/07/2001 da Bacia Alto da Colina II.

Observa-se que os coeficientes de determinação variaram de 0,67 a 0,94, com média de 0,77, o que do ponto de vista de sedimentos pode ser considerado um resultado satisfatório, quando comparado com outros trabalhos da literatura. Por exemplo Kalin et all (2003) em 2 bacias experimentais em Cincinnati, num total de 40 eventos obteve para o coeficiente de determinação de Nash-Sutcliffe valores variando 0,38 a 0,54, considerados por eles como satisfatórios.

A tabela 9 apresenta os valores da calibração da produção de sedimentos para a Bacia Alto da Colina II.

TABELA 9 – Resultados da calibração da produção de sedimentos para a Bacia Alto da Colina II.

EVENTO:	05/06/01	13/11/01	15/11/01	25/03/02	19/07/01
Sedimentos Totais Observados (kg/ha):	24,56	25,00	153,08	16,00	208,00
Sedimentos Totais Calculados (kg/ha):	80,90	81,90	224,00	13,00	400,00
Erro (%):	46,97	223,60	46,35	-18,75	92,31

5.1.8 Simulação da Produção de Sedimentos para a Bacia Alto da Colina II com os valores médios dos parâmetros

Para verificar a qualidade dos ajustes do modelo para o cálculo da produção de sedimentos, para o conjunto dos eventos calibrados, foram usados valores médios dos parâmetros obtidos durante a calibração, para simular os resultados de cada evento individual. Nas figuras numeradas de 43 a 47 são apresentados os gráficos contendo o resultado dessa simulação.

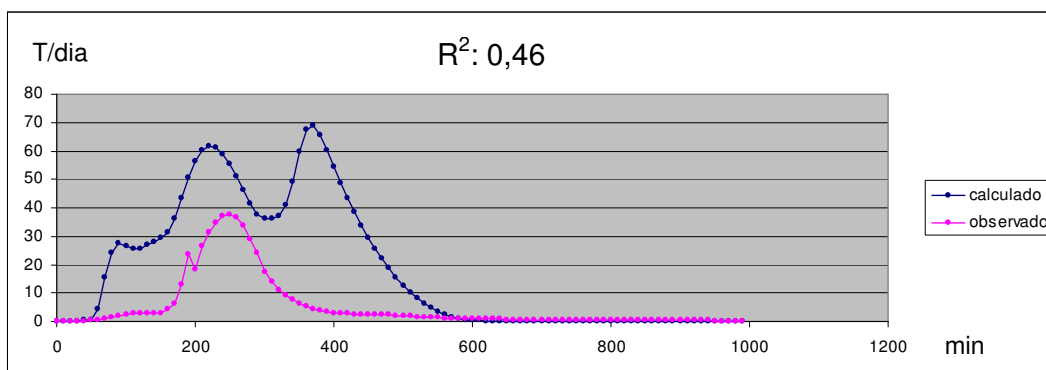


FIGURA 43 – Simulação da produção de sedimentos para o Evento 05/06/2001 da Bacia Alto da Colina II, utilizando os valores médios dos parâmetros.

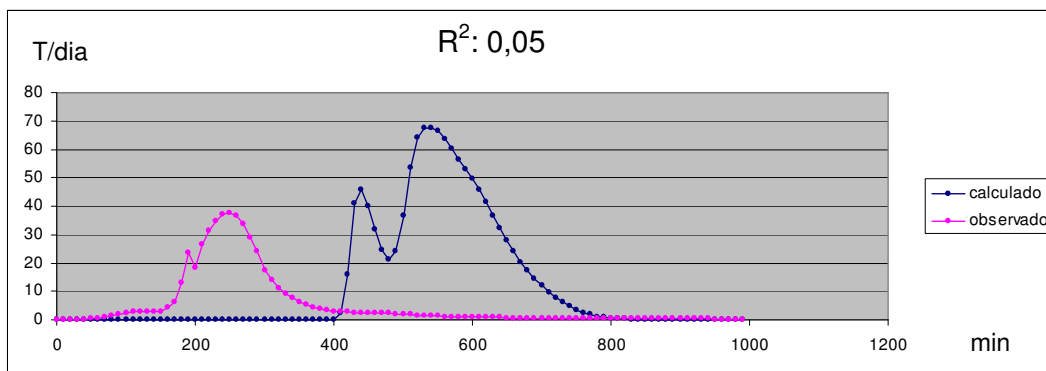


FIGURA 44 – Simulação da produção de sedimentos para o Evento 13/11/2001 da Bacia Alto da Colina II, utilizando os valores médios dos parâmetros.

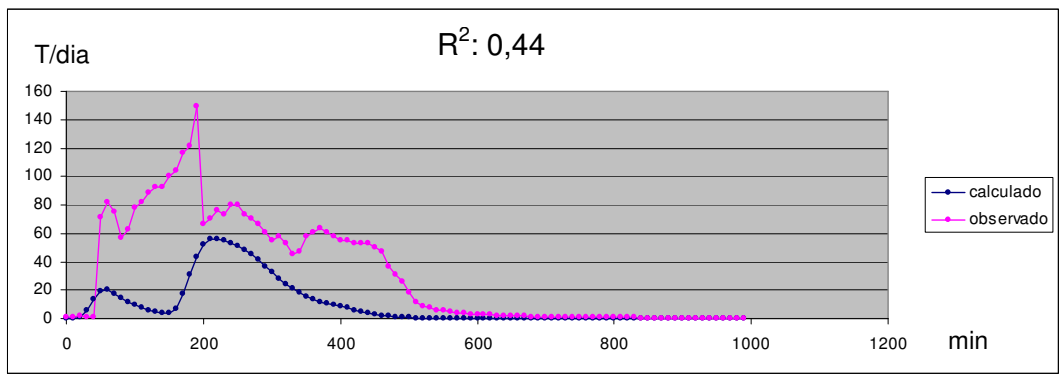


FIGURA 45 – Simulação da produção de sedimentos para o Evento 15/11/2001 da Bacia Alto da Colina II, utilizando os valores médios dos parâmetros.

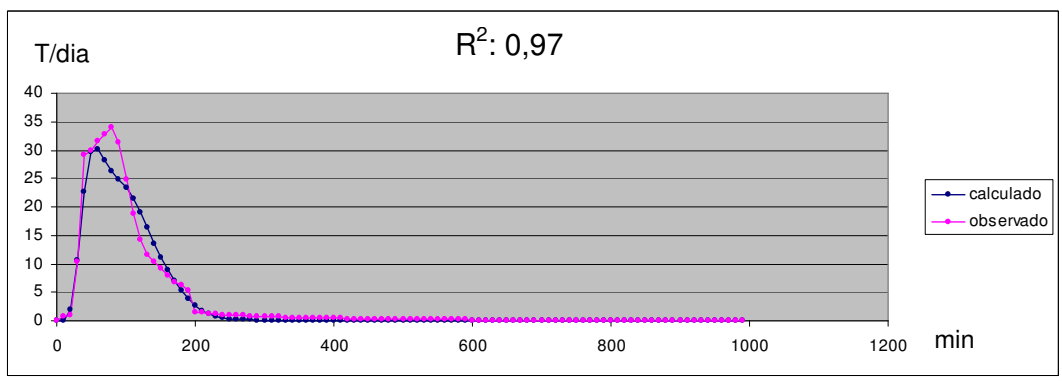


FIGURA 46 – Simulação da produção de sedimentos para o Evento 25/03/2002 da Bacia Alto da Colina II, utilizando os valores médios dos parâmetros.

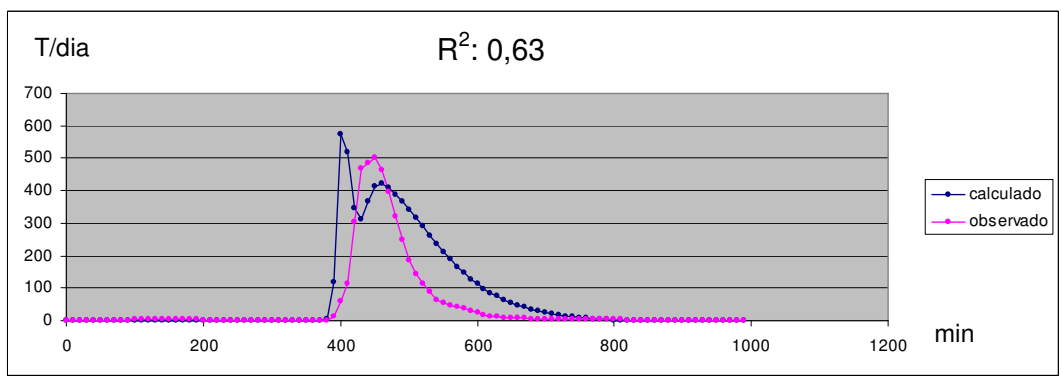


FIGURA 47 – Simulação da produção de sedimentos para o Evento 19/07/2001 da Bacia Alto da Colina II, utilizando os valores médios dos parâmetros.

TABELA 10 – Valores do coeficiente de determinação obtidos na calibração dos eventos individuais e na simulação com os parâmetros médios.

Evento	R ² (calibração)	R ² (Verificação da Qualidade do Ajuste)
05/06/2001	0,73	0,46
13/11/2001	0,78	0,05
15/11/2001	0,73	0,44
25/03/2002	0,94	0,97
19/07/2001	0,67	0,63

A análise da tabela 10, mostra que houve uma redução significativa nos coeficientes de determinação obtidos com os parâmetros médios. Com exceção do evento do dia 25/03/02, em que houve um aumento. Já no evento do dia 13/11/01, houve uma grande diminuição, tal fato se justifica pelo deslocamento do sedimentograma calculado em relação ao sedimentograma observado. No entanto, a forma do sedimentograma permaneceu inalterada e o erro na produção total de sedimentos diminuiu.

A tabela 11 apresenta os valores do cálculo da produção de sedimentos para a Bacia Alto da Colina II, com os parâmetros médios

TABELA 11 – Resultados da simulação da produção de sedimentos para a Bacia Alto da Colina II utilizando os valores médios dos parâmetros.

EVENTO:	05/06/01	13/11/01	15/11/01	25/03/02	19/07/01
Sedimentos Totais Observados (kg/ha):	24,56	25,00	153,08	16,00	208,00
Sedimentos Totais Calculados (kg/ha):	86,82	56,77	45,38	14,81	345,85
Erro (%):	253,50	127,08	-70,35	-7,43	66,27

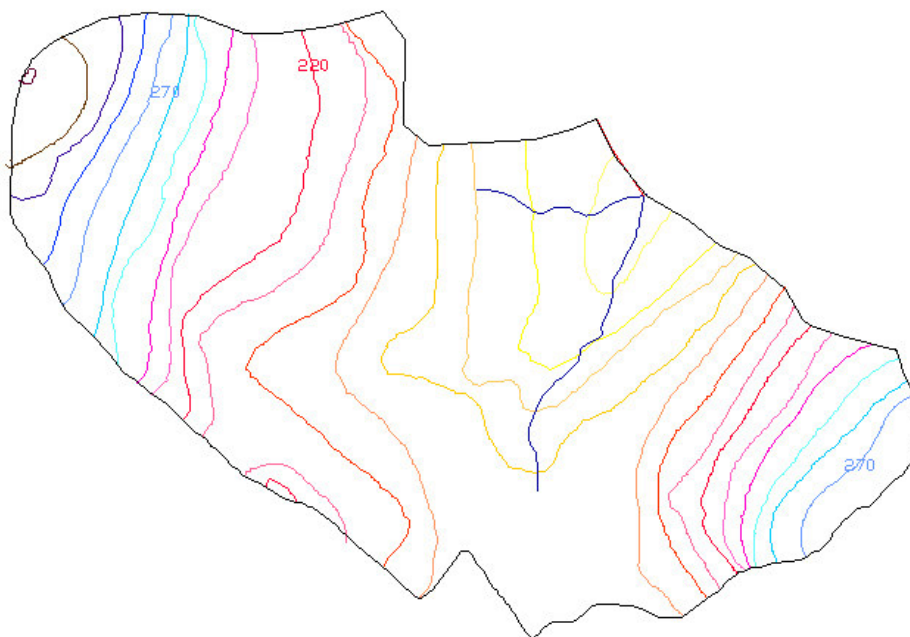
A tabela 11 apresenta os resultados da simulação da produção de sedimentos com os parâmetros médios. O erro na produção variou em termos absolutos de 7,43% a 253,5%. Esses erros embora muito grandes, são compatíveis com as estimativas de sedimentos, seja em rios utilizando fórmulas para sedimentos fluviais ou em bacias hidrográficas utilizando modelos baseados na equação universal de perda de solos modificada (EUPSM). Tal fato pode ser justificado pela dificuldade da medição precisa da produção de sedimentos, em especial em pequenas bacias hidrográficas, devido a velocidade das respostas aos eventos naturais de chuva x vazão x sedimentos.

5.2 Bacia Sítio do Tio Pedro

5.2.1 Discretização da Bacia Sítio do Tio Pedro

A Bacia Sítio do Tio Pedro foi discretizada em 10 elementos, dos quais 7 são planos e 3 são canais. Cada elemento plano, que define uma área de escoamento, foi definido levando-se em consideração a homogeneidade das características do solo, a declividade média, e as linhas de fluxo, segundo a identificação de áreas homogêneas a partir da superposição de mapas físicos da bacia, como o de topografia, vegetação e das linhas de fluxo.

A figura 48 apresenta o mapa de curvas de nível para a Bacia Sítio do Tio Pedro.



Fonte: GHIDROS.

FIGURA 48 – Curvas de Nível da Bacia Sítio do Tio Pedro.

A figura 49 apresenta o mapa de discretização e a figura 50 apresenta a representação esquemática da Bacia Sítio do Tio Pedro.

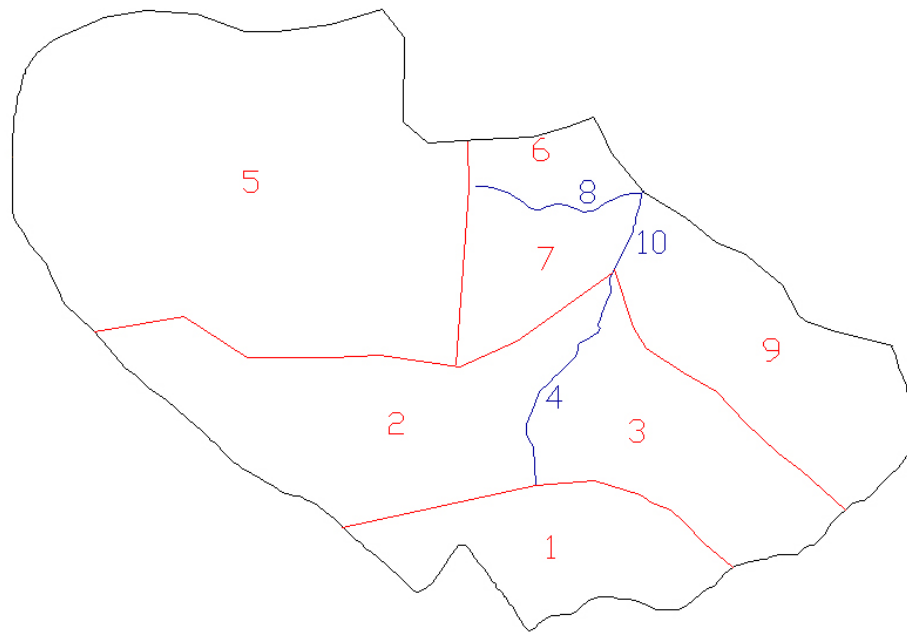


FIGURA 49 – Discretização da Bacia Sítio do Tio Pedro.

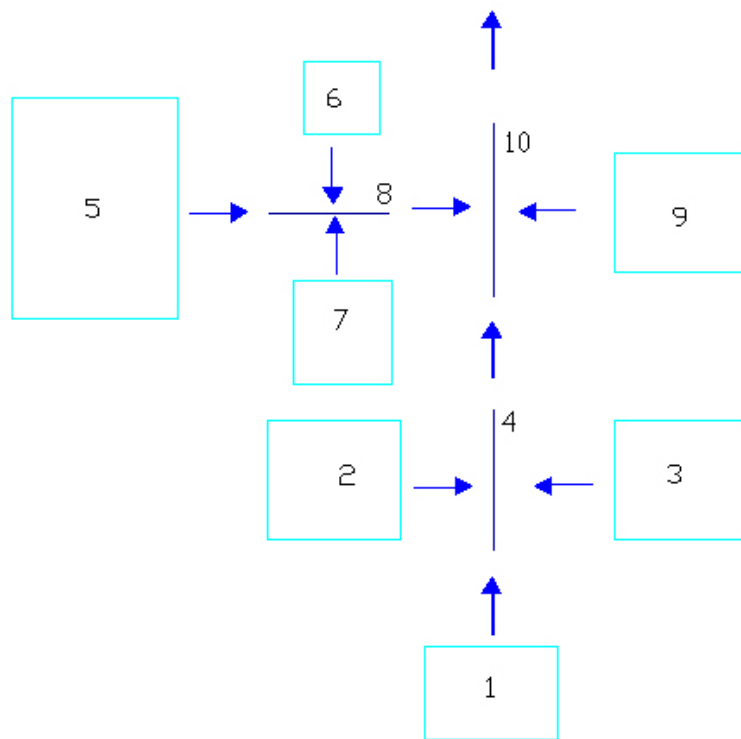


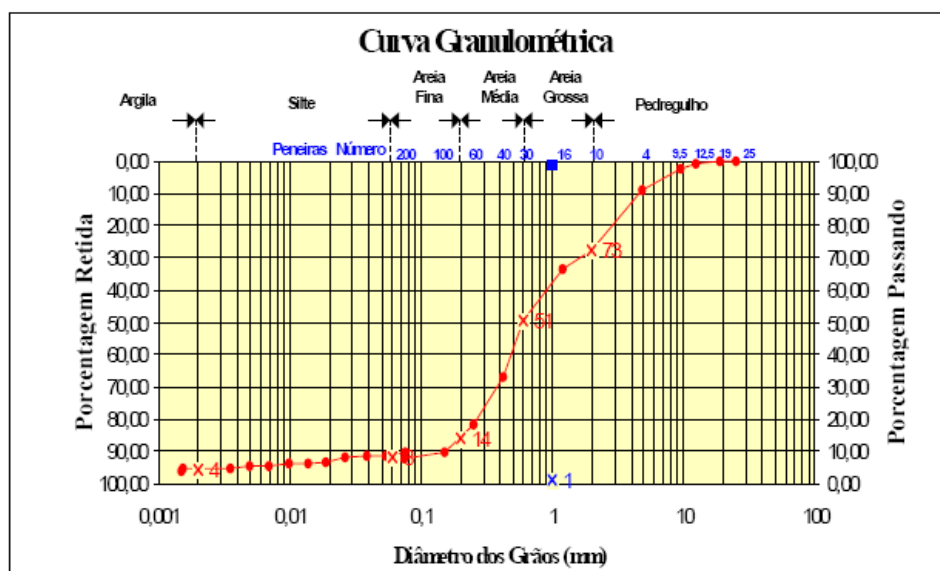
FIGURA 50 – Representação Esquemática da Discretização da Bacia Sítio do Tio Pedro.

5.2.2 Determinação dos Parâmetros do Modelo *Kineros2* (1990)

Os parâmetros do modelo, da mesma maneira que foi feito na Bacia Alto da Colina II, foram estabelecidos de acordo com o tipo de solo, cobertura vegetal, declividade de cada parcela. A seguir, são apresentados todos parâmetros utilizados para simular o escoamento superficial e erosão do solo nas parcelas da Bacia Sítio do Tio Pedro.

i) Tamanho característico dos sedimentos (d):

A figura 51 apresenta o gráfico com a curva granulométrica para a Bacia Sítio do Tio Pedro.



Fonte: BELLO (2004)

FIGURA 51– Granulometria do Material em Suspensão da Bacia Sítio do Tio Pedro.

- ii) **Densidade relativa dos sedimentos (S_s):** assumido como sendo igual a 2,65, o que corresponde à densidade relativa do grão de quartzo.
- iii) **Temperatura da água:** considerada como sendo igual a 20°C, temperatura média normalmente encontrada na Bacia Sítio do Tio Pedro.
- iv) **Coefficiente de rugosidade de Manning (n):** o coeficiente de Manning foi adotado de acordo com as características da Bacia, variando durante a calibração do modelo.
- v) **Condutividade hidráulica saturada efetiva (K_s):** O valor de K_s que melhor

ajustou a lâmina escoada foi 4,12 mm/h.

vi) **Declividade média das parcelas (*Slope*):** foram determinadas a partir de levantamentos topográficos e estão apresentadas na Tabela 12.

TABELA 12 – Áreas e Declividades da Bacia Sítio do Tio Pedro.

Elemento	Tipo	Area (m ²)	Perimetro (m)	Comprim. (m)	Largura (m)	Desnível (m)	Declividade
1	plano	35195,14	976,81	137,91	255,21	1,00	0,007
2	plano	73131,24	1385,99	187,91	389,19	3,50	0,019
3	plano	16807,11	757,45	187,91	89,44	4,00	0,021
4	canal			187,91		4,00	0,021
5	plano	155051,07	1535,67	484,83	319,81	14,00	0,029
6	plano	11368,50	459,24	189,41	60,02	3,00	0,016
7	plano	30897,91	657,16	189,41	163,13	3,00	0,016
8	canal			189,41		3,00	0,016
9	plano	5648,18	973,46	374,37	127,27	13,50	0,036
10	canal			283,05		5,00	0,018
Total		380099,14	(m ²)				
Total		0,38	(km ²)				

vii) **Parâmetros relacionados à microtopografia (*relief e spacing*):** O parâmetro *relief* foi assumido como sendo igual a 29 mm e o parâmetro *spacing* como sendo 3,3 m para todas as parcelas. Esses valores foram os que forneceram os melhores resultados na simulação do hidrograma.

vii) **Valor efetivo do potencial de capilaridade (*G*), porosidade (Φ) e índice de distribuição dos tamanhos dos poros (*Dist*).**

O valor inicial para os parâmetros (*G*) e (Φ) foi obtido baseado na tabela 13 citada por Silva (2005). O solo das parcelas é Podzólico Bruno - Acinzentado Álico (PBa1), e se enquadra na classe argilo-arenoso admitindo os seguintes valores: $G = 40$, $\Phi = 0,362$ e $Dist = 0,01$.

TABELA 13 – Estimativa para Propriedades Hidráulicas do Solo.

Classes do Solo	Porosidade (Φ)	Capilaridade Média do Solo (G)
<i>Arenoso</i>	0,437 - 0,063	5,0
<i>Areia Franca</i>	0,047 - 0,069	7,0
<i>Franco Arenoso</i>	0,453 - 0,102	13,0
<i>Franco</i>	0,463 - 0,088	11,0
<i>Franco Siltoso</i>	0,501 - 0,081	20,0
<i>Franco Argiloso Arenoso</i>	0,398 - 0,066	26,0
<i>Franco Argiloso</i>	0,464 - 0,055	26,0
<i>Franco Argiloso Siltoso</i>	0,471 - 0,053	35,0
<i>Argilo Arenoso</i>	0,430 - 0,060	30,0
<i>Argilo Siltoso</i>	0,479 - 0,054	38,0
<i>Argila</i>	0,475 - 0,048	41,0

Fonte: (Silva – 2005)

ix) Parâmetro relacionado à coesão do solo (C_0): Foi adotado neste trabalho C_0 igual a 0,0005. A saturação inicial relativa do solo varia de evento para evento e foi determinada por calibração, ajustando-o até que o volume escoado calculado se igualasse ao volume escoado observado. Da mesma forma, foi determinado o parâmetro cf , o qual é relativo ao cálculo da erosão por impacto das gotas de chuva. Esse parâmetro foi calibrado para cada evento, até que o valor da produção de sedimentos calculada se igualasse à produção de sedimentos observada.

5.2.3 Resultados dos parâmetros para a Bacia Sítio do Tio Pedro

Na tabela 14 pode-se verificar o valores finais dos parâmetros para os 5 eventos utilizados na calibração, além da media dos mesmos.

TABELA 14 – Resultados dos parâmetros para a Bacia Sítio do Tio Pedro.

EVENTO	Manning	Relief (mm)	Spacing (m)	Interception (mm)	SAT	CV	Ks (mm/h)	G (mm)	Distribution	Porosity	Splash	Co
22/03/03	0,98	29	3,3	0,85	0,61	1,37	13,7	37	0,01	0,362	4000	0,0005
24/07/03	0,95	29	3,3	0,35	0,61	0,87	7,2	37	0,01	0,362	4000	0,0005
12/11/03	0,98	29	3,3	0,35	0,61	0,87	12,4	37	0,01	0,362	4000	0,0005
16/11/03	0,99	29	3,3	0,55	0,51	1,17	10,8	37	0,01	0,362	4000	0,0005
08/12/03	0,90	29	3,3	0,35	0,61	0,87	11,2	37	0,01	0,362	4000	0,0005
média	0,96	29	3,3	0,49	0,59	1,03	11,06	37	0,01	0,362	4000	0,0005

5.2.4 Simulação do Escoamento Superficial e Erosão do Solo.

A Bacia Sítio do Tio Pedro foi discretizada em 10 elementos, sendo destes 7 planos e 3 canais, todo o processo de discretização foi feito seguindo os mesmos moldes usados para a Bacia Alto da Colina II.

5.2.5 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 a Bacia Sítio do Tio Pedro, apresentaram ajustes satisfatórios, representados pelo coeficiente de determinação e também levando em conta o erro médio no volume escoado e na vazão de pico.

Nas figuras 52 a 56 são apresentados os hidrogramas de calibração do modelo **Kineros2 (1990)** para a Bacia Sítio do Tio Pedro para os eventos dos dias 22/05/2003, 24/07/2003, 12/11/2003, 16/11/2003 e 08/12/2003, respectivamente.

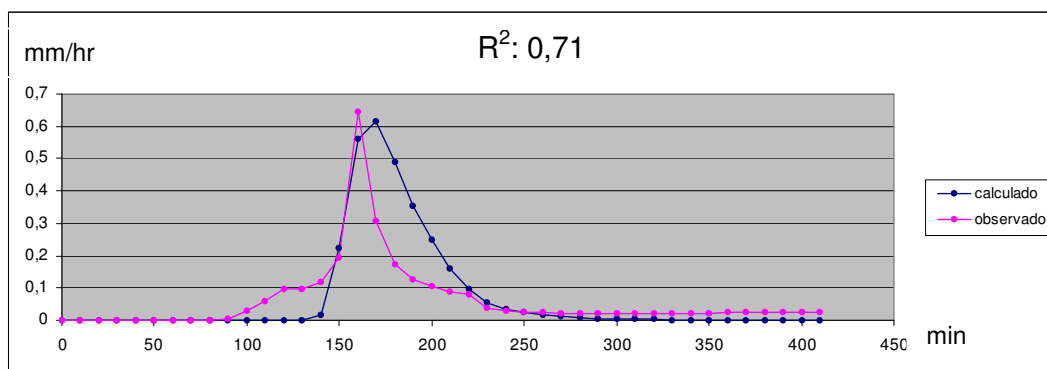


FIGURA 52 – Calibração da Vazão para o Evento 22/05/2003 da Bacia Sítio do Tio Pedro.

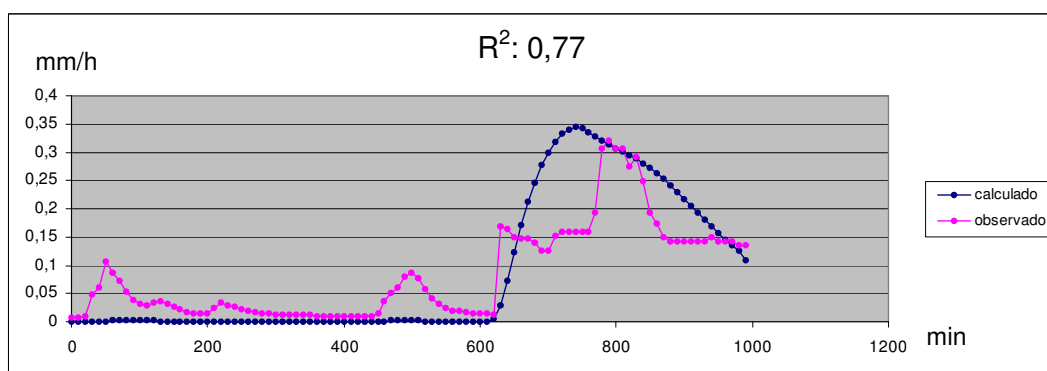


FIGURA 53 – Calibração da Vazão para o Evento 24/07/2003 da Bacia Sítio do Tio Pedro.

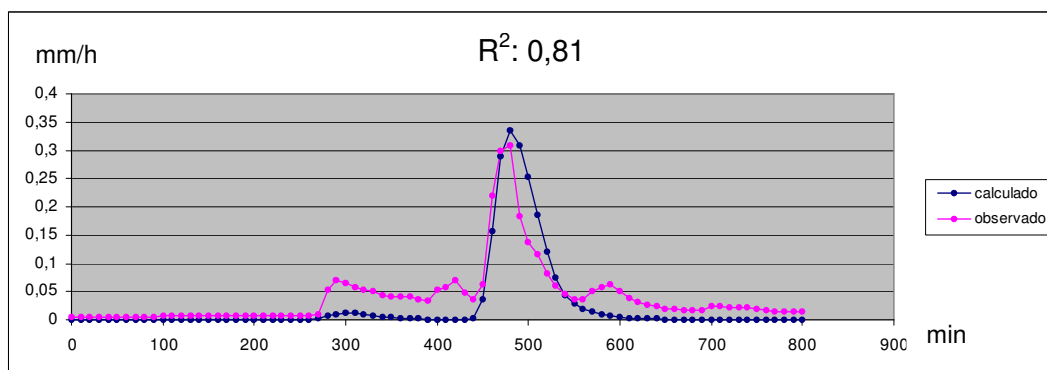


FIGURA 54 – Calibração da Vazão para o Evento 12/11/2003 Bacia Sítio do Tio Pedro.

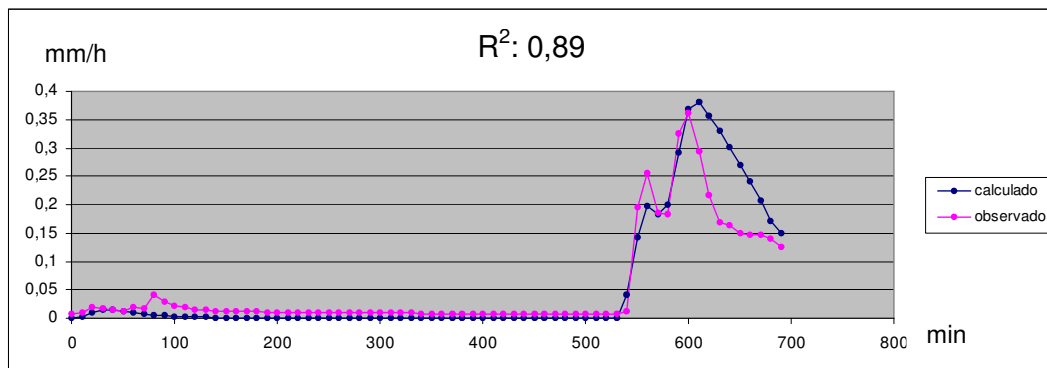


FIGURA 55 – Calibração da Vazão para o Evento 16/11/2003 Bacia Sítio do Tio Pedro.

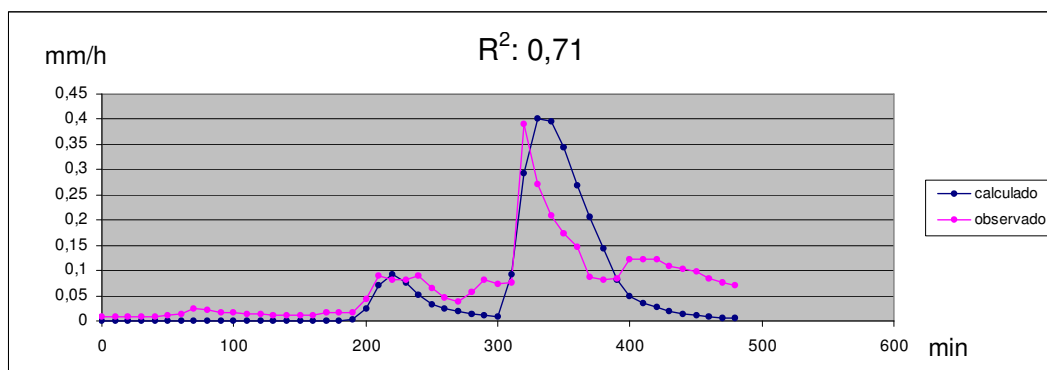


FIGURA 56 – Calibração da Vazão para o Evento 08/12/2003 da Bacia Sítio do Tio Pedro.

5.2.6 Simulação de vazão para a Bacia Sítio do Tio Pedro com os valores médios dos parâmetros.

Para verificar a qualidade dos ajustes do modelo *Kineros2 (1990)*, foram usados valores médios dos parâmetros obtidos durante a calibração, para simular os resultados de cada evento individual.

Nas figuras 57 a 60 são apresentados os gráficos contendo o resultado da simulação da vazão do modelo *Kineros2 (1990)* para a Bacia Sítio do Tio Pedro, utilizando os valores médios dos parâmetros.

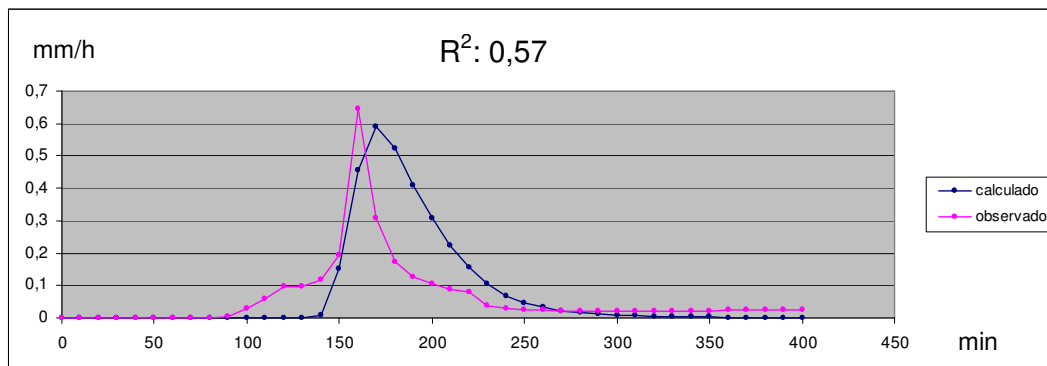


FIGURA 57 – Simulação da Vazão para o Evento 22/05/2003 da Bacia Sítio do Tio Pedro, utilizando os valores médios de parâmetros.

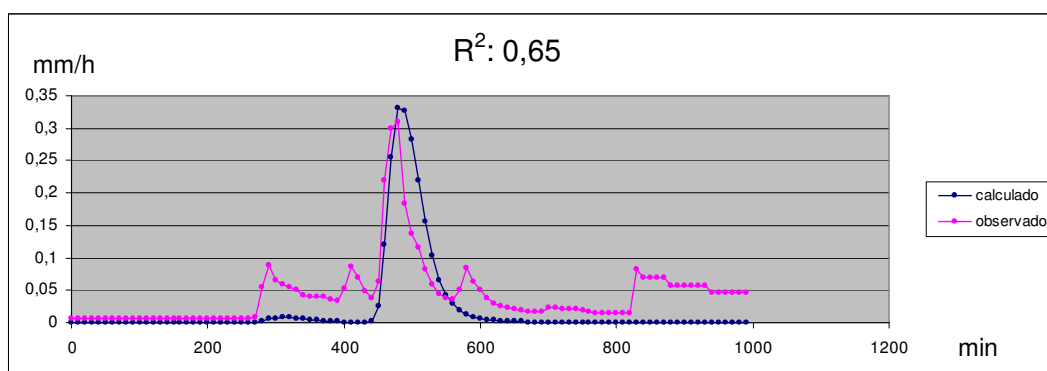


FIGURA 58 – Simulação da Vazão para o Evento 12/11/2003 da Bacia Sítio do Tio Pedro, utilizando os valores médios de parâmetros.

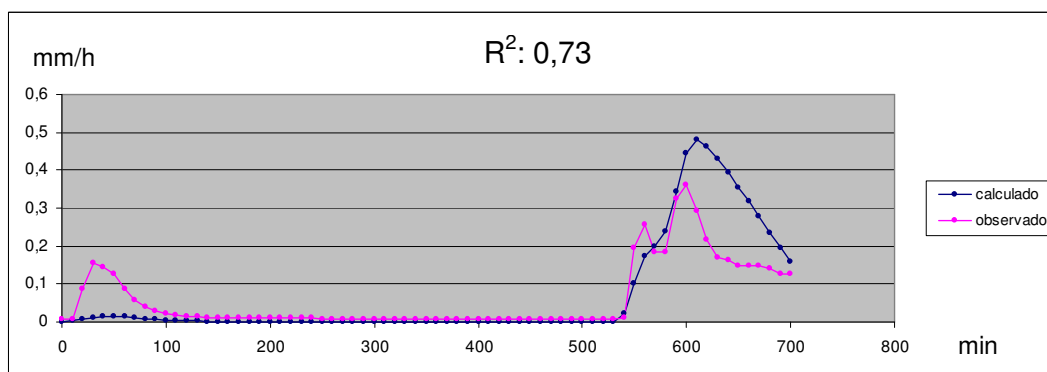


FIGURA 59 – Simulação da Vazão para o Evento 16/11/2003 da Bacia Sítio do Tio Pedro, utilizando os valores médios de parâmetros.

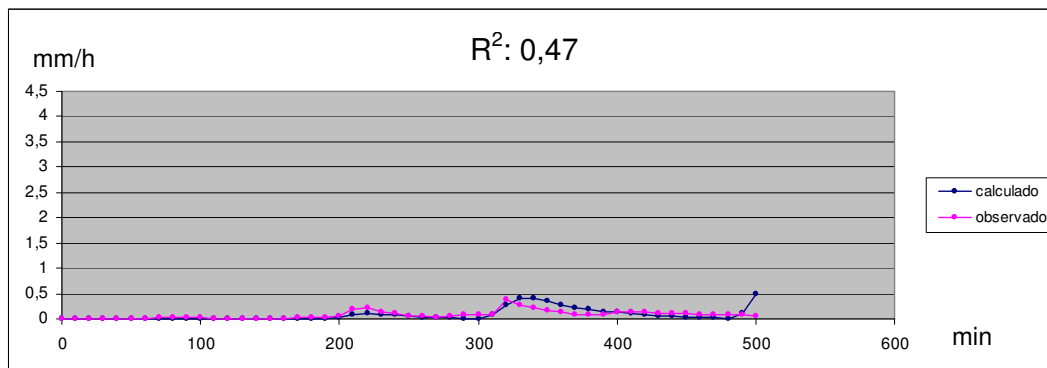


FIGURA 60 – Simulação da Vazão para o Evento 08/12/2003 da Bacia Sítio do Tio Pedro, utilizando os valores médios de parâmetros.

Da mesma forma como ocorreu na Bacia Alto da Colina II, observa-se que houve uma redução no coeficiente de determinação para todos os eventos, sem invalidar a qualidade do ajuste, conforme pode ser visto na tabela 15.

Para o evento do dia 24/07/2003, não foi possível estabelecer o índice de determinação devido ao fato de não ser possível fazer o ajuste.

TABELA 15 – Valores do coeficiente de determinação obtidos na calibração dos eventos individuais e na simulação com os parâmetros médios.

Evento	R ² (calibração)	R ² (Verificação da Qualidade do Ajuste)
24/07/2003	0,77	xxx
22/05/2003	0,71	0,57
12/11/2003	0,81	0,65
16/11/2003	0,89	0,73
08/12/2003	0,71	0,47

5.2.7 Resultado da calibração da Produção de Sedimentos para a Bacia Sítio do Tio Pedro.

A produção de sedimentos também foi simulada utilizando do modelo **Kineros2 (1990)**. Os parâmetros adicionais referentes à produção de sedimentos utilizados foram:

- i) **Tamanho característico dos sedimentos (*d*):** O diâmetro mediano foi

considerado como sendo d_{50} igual a 0,50 mm;

- ii) **Densidade relativa dos sedimentos (S_s):** assumido como sendo igual a 2,65, o que corresponde à densidade relativa do grão de quartzo.
- iii) **Parâmetro relacionado à coesão do solo (C_o):** parâmetro que influencia no cálculo da erosão por arrasto do fluxo superficial. Como a produção de sedimentos nas parcelas mostrou-se praticamente insensível à sua variação, foi considerado o mesmo valor utilizado para as escalas menores. Sendo assim, o valor do parâmetro foi assumido como sendo igual a 0,0005.

Os valores da produção de sedimento para a Bacia Sítio do Tio Pedro, calculados com o modelo ***Kineros2 (1990)*** serão comparados apenas com os valores finais devido ao fato das pequenas dimensões da bacia resultarem em distorções significativas no que se trata de dados Tempo-a-Tempo de sedimentos.

A tabela 16 apresenta os valores obtidos na calibração da produção de sedimentos na Bacia Sítio do Tio Pedro.

TABELA 16 – Resultados dos parâmetros para a Bacia Sítio do Tio Pedro.

EVENTO:	22/05/03	24/07/03	12/11/03	16/11/03	08/12/03
Sedimentos Totais Observados (kg/ha):	4,88	4,14	11,89	4,30	4,20
Sedimentos Totais Calculados (kg/ha):	9,87	7,44	2,12	5,73	5,43
Erro (%):	102,3	79,71	-82,16	33,25	29,29

5.2.8 Simulação da Produção de Sedimentos para a Bacia Sítio do Tio Pedro com os valores médios dos parâmetros.

A simulação da produção de sedimentos do modelo ***Kineros2 (1990)*** para a produção de sedimentos foi feita usando valores médios dos parâmetros obtidos durante a calibração, tais valores foram usados no mesmos 5 eventos usados na calibração com o objetivo de verificar a eficácia do modelo em eventos diferentes.

A tabela 17 apresenta os valores resultantes da simulação da produção de

sedimentos para a Bacia Sítio do Tio Pedro utilizando os valores médios dos parâmetros.

Obs.: Para o evento do dia 24/07/2003 o modelo **Kineros2 (1990)** resultou valores que não podem ser usados como parâmetro de eficácia do modelo, portanto não estão inclusos na tabela a seguir.

TABELA 17 – Resultados da produção de sedimentos para a Bacia Sítio do Tio Pedro, utilizando os valores médios dos parâmetros.

EVENTO:	22/05/2003	12/11/2003	16/11/2003	08/12/2003
Sedimentos Totais Observados (kg/ha):	4,88	11,89	4,30	4,20
Sedimentos Totais Calculados (kg/ha):	8,33	2,21	5,36	5,80
Erro (%):	70,69	-81,41	24,65	38,09

A tabela 17 apresenta os resultados da simulação da produção de sedimentos com os parâmetros médios. Conforme observado nos resultados da Bacia Alto da Colina II, página 97, o erro na produção resultou valores muito grandes os quais são compatíveis com as estimativas de sedimentos em geral. Tal fato justifica-se pela dificuldade da medição precisa da produção de sedimentos, em especial em pequenas bacias hidrográficas, devido e velocidade das respostas aos eventos naturais de chuva x vazão x sedimentos.

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Inicialmente o modelo **Kineros2 (1990)** foi aplicado à Bacia Alto da Colina II, sujeita a várias condições de uso do solo, com o objetivo de verificar a variação dos principais parâmetros relativos ao escoamento superficial e erosão do solo. Em seguida, o modelo foi aplicado à Bacia Sítio do Tio Pedro onde também foram obtidos intervalos de variação dos parâmetros calibráveis do modelo. No caso da modelagem, foi necessário fazer a discretização das bacias para a aplicação do modelo.

Para a vazão, Silva (2005) encontrou que as correlações (R), as quais medem o nível de eficiência da calibração, variaram entre 0,84 e 0,88, o que corresponde a (R^2) variando entre 0,71 a 0,77, enquanto que neste trabalho o coeficiente de determinação (R^2) variou entre 0,88 e 0,95 para a Bacia Alto da Colina II e 0,71 e 0,89 para a Bacia Sítio do Tio Pedro, podendo-se admitir que os resultados encontrados neste trabalho podem ser considerados satisfatórios devido ao fato das dimensões das bacias em estudo serem bastante diminutas.

Em relação à produção de sedimentos, o modelo **Kineros2 (1990)** conseguiu ajustar todos os eventos individualmente com correlação satisfatória. Para a Bacia do Alto da Colina II, o coeficiente de determinação variou de 0,67 a 0,94 para os eventos individuais, na fase de calibração. Na fase de verificação houve uma redução significativa nos coeficientes de determinação obtidos com a aplicação do modelo **Kineros2 (1990)** com os parâmetros médios. Com exceção do evento do dia 25/03, em que houve um aumento. Já no evento do dia 13/11, houve uma grande diminuição, tal fato se justifica pelo deslocamento do sedimentograma calculado em relação ao sedimentograma observado. No entanto, a forma do sedimentograma permaneceu inalterada e o erro na produção total de sedimentos diminuiu.

Na Bacia do Sítio do Tio Pedro os resultados foram semelhantes, havendo uma diminuição no coeficiente de determinação (R^2) para todos os eventos. Na fase de calibração o (R^2) variou de 0,70 a 0,89 enquanto na verificação variou de 0,47 a 0,73.

Observa-se que os coeficiente de determinação, considerando as duas bacias, variou de 0,67 a 0,94, com média de 0,773, na fase de calibração e de 0,05 a 0,97, na fase de verificação, com média de 0,55, o que do ponto de vista de

sedimentos pode ser considerado um resultado satisfatório, quando se compara com outros trabalhos da literatura. Por exemplo Kalin et al (2003) em 2 bacias experimentais em Cincinnati, num total de 40 eventos obteve para o coeficiente de determinação de Nash-Sutcliffe valores variando 0,38 a 0,54, considerados por eles como satisfatórios.

Quando se analisa os erros obtidos na estimativa da produção total de sedimentos, com a aplicação do modelo **Kineros2 (1990)** com os parâmetros médios obtidos na fase de calibração, observa-se que na Bacia do Alto da Colina II o erro na produção variou em termos absolutos de 7,43% a 253,5% e na Bacia do Sítio do Tio Pedro variou de 24,75% a 81,41%. Esses erros embora muito grandes, são compatíveis com as estimativas de sedimentos, seja em rios, utilizando fórmulas para sedimentos fluviais, seja em bacias hidrográficas utilizando modelos baseados na equação universal de perda de solos modificada (EUPSM). Tal fato pode ser justificado pela dificuldade da medição precisa da produção de sedimentos, em especial em pequenas bacias hidrográficas, devido a velocidade das respostas aos eventos naturais de chuva x vazão x sedimentos.

A análise dos resultados da aplicação do Modelo **Kineros2 (1990)**, nas Bacias Alto da Colina II e Sítio do Tio Pedro, mostra que do ponto de vista da estimativa dos hidrogramas o modelo teve um bom desempenho. Do ponto de vista da estimativa da produção de sedimentos, embora os resultados possam ser considerados satisfatórios à luz do estado da arte da previsão de sedimentos, eles não são bons e reforçam a necessidade do desenvolvimento de pesquisas de campo que forneçam os dados sob diferentes condições de clima, relevo, tipo e uso do solo para permitir o desenvolvimento e avaliação de modelos de estimativa da produção de sedimentos.

Não foi possível comparar os resultados da aplicação do modelo **Kineros2 (1990)**, nas Bacias Alto da Colina II e Sítio do Tio Pedro, com os trabalhos realizados no território nacional, citados neste trabalho uma vez que seus autores informam que não possuíam dados de campo para verificar o desempenho do modelo.

7 CONCLUSÕES FINAIS

Os resultados da modelagem da vazão calculada para a Bacia Alto da colina II, mostraram-se bons quando comparados com as vazões observadas, apresentando coeficiente de determinação entre 0,88 e 0,95.

Para a Bacia Sítio do Tio Pedro os resultados foram considerados satisfatórios considerando se tratar de uma bacia de área muito pequena. O coeficiente de determinação para a Bacia STP oscilou entre 0,71 e 0,89.

Na simulação da produção de sedimentos o modelo ***Kineros2 (1990)*** apresentou resultados razoáveis. Para a Bacia Alto da Colina II, o erro variou entre -18,75% e 223,60%, já para a Bacia Sítio do Tio Pedro, o erro oscilou entre 102,30% e -82,16%.

As principais conclusões advindas deste trabalho são:

- a) Sobre os valores dos parâmetros do modelo ***Kineros2 (1990)***, como primeira tentativa de modelagem da vazão e da erosão, o coeficiente de Manning (n), que ofereceu bons resultados apresentou valores muito acima do recomendado na literatura. Variou entre 0,6 e 0,8 para os planos para que os valores calculados dos maiores picos se ajustassem aos observados. Os valores dos parâmetros adotados acabaram influenciando na forma dos hidrogramas apresentados ao longo do trabalho, onde se pode notar um achatamento na forma do hidrograma calculado, ou seja, um maior retardamento do escoamento.
- b) O trabalho chama a atenção para a importância de futuras pesquisas direcionadas para a identificação e controle de áreas susceptíveis ao processo de erosão na bacia. Pode-se concluir que a aplicação do modelo ***Kineros2 (1990)*** é viável e pode ser usado principalmente em estudos de modelagem de vazão.
- c) O modelo ***Kineros2 (1990)*** se mostrou eficaz na conversão de chuva em vazão e pode ser considerado uma ferramenta útil na ajuda do processo de tomada de decisão dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, C. V., NEIBLING, W. H. e FOSTER, G. R. **Estimating Sediment Transport Capacity in Watershed Modeling**. Trans. Am. Soc. Agric. Engrs., 24(5), 1211-1220, 1226. 1981.

AZOLIN, M.A. D. e MUTTI, L. S. M. Relatório Técnico: **Solos da bacia hidrográfica do Vacacaí-Mirim**. Porto Alegre: Acordo DNOS-UFSM, 1987-1988, p. 1-20.

BASTOS, G.A.P. **Análise dos Parâmetros do Modelo SWMM para Avaliação do Escoamento em Duas Bacias Periurbanas em Santa Maria - RS**. Santa Maria: rs, 2007. (Dissertação de Mestrado, PPGEC/CT/UFSM).

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. **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.

BENNETT, J. P. **Concepts of mathematical modeling of sediment yield**. **Water Resources Research**, (1974): 485-492.

BROOKS, R. H. e COREY, A. T. **Hydraulic Properties of Porous Media**. Hydrol. Paper no 3, Colorado State Univ., Fort Collins. 1964.

CARVALHO, N. O., CATHARINO, M. G. **Avaliação do assoreamento de reservatório da UHE Itaipu**. Anais... X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul. Gramado-RS, 1993.

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.

CASAGRANDE, L. **Avaliação do Parâmetro de Propagação de Sedimentos do Modelo Williams (1975) na Bacia do Rio Vacacaí-Mirim com o Auxílio de Técnicas de Geoprocessamento**. 2004. 226f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R. e MAYS, L. W. **Applied Hydrology. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering**, Singapore, 572p. (1988).

CORRADINI, C., MELONE, F. e SMITH, R. E. **Modeling infiltration during complex rainfall sequences**. Water Resources Research, 1994.

CRUZ JÚNIOR, D. C.; STRAUCH, J. C. M.; OLIVEIRA, L. C. **Uma abordagem da engenharia de sistemas sobre sistemas de informações geográficas**. 1999.

ENGELUND, F. & HANSEN, E. **A monograph on sediment transport in alluvial streams**. Teknisk Forlag. Copenhagen, 1967.

GALVÃO, C. O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão do solo em microbacias**. Campina Grande. (Dissertação de Mestrado/PPGEC/CCT/ UFPB). 1990.

GOLDENFUM, J.A. **Simulação hidrossedimentológica em pequenas bacias rurais**. (Dissertação de Mestrado, IPH/UFRGS. 113p.) 1991.

GREEN R.M., ERICKSON L.E., KALITA P., e PIERZYNSKI G., **Utilization of the kinematic runoff and erosion model in predicting the effects of vegetation on heavy metal containment in southeast Kansas**. Proceedings of the 1999 Conference on Hazardous Waste Research. 1999.

GUERRA, A. J. T., SILVA, A. S. e BOTELHO, R. G. M. **Erosão e Conservação dos Solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 1999.

JAIN, S. K. & DOLEZAL, F. **Modeling soil erosion using EPIC supported by GIS, Bohemia, Czech Republic**. Journal of Environmental Hydrology, vol. 8. 2000.

JULIEN, P. Y. e FRENETTE, M. **Scale Effects in Predicting Soil Erosion**. IAHS, Publ.,159, pp. 253-259. 1986.

KALIN, L.; GOVINDARAJU, R. S.; HANTUSH, M. M. **Effect of geomorphologic resolution on modeling of runoff hydrograph and sedimentograph over small watersheds**. Journal of Hydrology, 276. pp. 89-111. 2003.

LACROIX, M. P.; MARTZ, L. W.; KITE, G. W. & GARBRECHT, J. **Using digital terrain analysis modeling techniques for the parameterization of a hydrologic model**. Environmental Modelling & Software, n. 17, pp.127-136. 2002.

LANE, L. J. e WOOLHISER, D. A. **Simplifications of Watershed Geometry Affecting in Simulating of Surface Runoff**. Journal of Hydrology 1977.

LLANO,F.L.C.; BARO,A.P.S. **Metodologia Integrada para La Evaluacion de Cuencas. Seminario sobre erosion y sedimentacion em cuencas de montaña**. CIHRSA, Villa Carlos Paz, Republica Argentina, 1983.

LOPES, W. T. A. **Efeitos de escala na modelagem hidrossedimentológica na região semiárida da Paraíba**. Campina Grande: s.e., 2003. (Dissertação de Mestrado/PPGEC/CCT/UFCG).

MAIDMENT, D. R. **Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS**. In: DOVAR, K.; NATCHNEBEL, H. P. (eds.). **Application of geographic information systems in hydrology and water resources**, Proceedings of the Vienna Conference, Vienna: Int. Assoc. of Hydrological Sci., pp. 181-192. 1993.

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.

MEYER, L. D. e WISCHMEIER, W. H. **Mathematical Simulation of the Process of Soil Erosion by Water**. Trans. of the ASAE. 1969.

MUTCHLER, C. K. e YOUNG, R. A. **Soil erosion by raindrops**. In: Sediment Yield Workshop. Oxford, 1975 p.113.

NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V., **River flow forecasting through conceptual models, I-A discussion of principles**. Journal of Hydrology 10. 1970.

PAIVA, E. M. C.; PAIVA, J. B. D. **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas**. ABRH. Porto Alegre, RS, Brasil, 2003.

PAIVA, F. M. L. **Estudo comparativo entre três modelos de base física na modelagem hidrossedimentológica em microbacias na região semi-árida Paraibana**. Campina Grande. PB. (Dissertação de Mestrado, UFCG / CTRN). 2008.

PULLAR, D. & SPRINGER, D. **Towards integrating GIS and catchment models**. Journal of Hydrology. vol. 15, issue 5, July, pp. 451-459. 2000.

RAMIREZ, M. R. **Sistemas gerenciadores de banco de dados para Geoprocessamento**. Rio de Janeiro. (Dissertação de Mestrado/COPPE/UERJ). 1994.

ROVEY, E. W.; WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E. **A distributed kinematic model of upland watershed**. Hydrology Paper 93, Colorado State University, Fort Collins, 1977.

RUFINO, I. A. A.; GALVÃO, C. O.; SRINIVASAN, V. S. **Representação espacial de processos decisórios na gestão dos recursos hídricos em áreas urbanas**. Anais... XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba-PR, 2003.

SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K.; LOPES, W. T. A. **Sediment yield in Ishite watershed using a runoff-erosion kinematic model**. XXIX IAHR Congress, Beijing, China, p. 146-151, 2001.

SAGHAFIAN, B.; VAN LIESHOUT A. M & RAJAEIL, H. M. **Distributed catchment simulation using a raster GIS**. Environmental Modelling and Software, vol. 2, issue 3-4, July. pp. 199-203. 2000.

SEMMENS, D. J., MILLER, S. N.; HERNANDEZ, M.; BURNS, I. S.; MILLER, W. P.; GOODRICH, D. C. **Automated geospatial watershed assessment (AGWA) – a GIS-based hydrologic modeling tool: documentation and user manual**. USDA-ARS. Tucson, Arizona, 2000.

SHRIMALI, S. S.; AGGARWALZ, S. P. & SAMRA, J. S. **Prioritizing erosion-prone áreas in hills using remote sensing and GIS - a case study of the Sukhna Lake catchment, Northern India**. *JAG*, vol. 3, issue 1, 2001.

SILVA, L. P. **Modelagem e Geoprocessamento na Identificação de Áreas com risco de inundação e Erosão na Bacia do Rio Cuia**. João Pessoa: pb, (Dissertação de Mestrado/PPGEC/CCT/UFCG). 2007.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; NITÃO, I. A. **Modelagem hidrossedimentológica na barragem Pirapama em Pernambuco**. Anais... XI SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Natal-RN, 2004.

SILVA, R.M. **Previsão Hidrossedimentologica numa bacia periurbana através do acoplamento de modelos climáticos e hidrológicos**. João Pessoa: pb, (Dissertação de Mestrado, PPGEU/CT/UFPB). 2005.

SIMONS, D. B. e SENTÜRK, F. **Sediment transport technology**. Fort Collins, Water Resources Publications, 807p. 1992.

SMITH, R. E.; CORRADINI, C.; MELONE, F. **Modeling infiltration for multistorm runoff events**. *Water Resources Research*, 29 (1). pp. 133-144. 1993.

SMITH, R. E. e PARLANGE, J. Y. **A Parameter-Efficient Hydrologic Infiltration Model**. *Water Res. Res.*, 14(3): 533-538. 1978.

TODINI, E. **Rainfall-runoff modeling, past, present and future**. *Journal of Hydrology*. Amsterdam, n. 100, 1988.

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

TUCCI,C.E.M.; SANCHEZ,J.; SIMÕES LOPES,M. **Modelo Matemático Precipitação-Vazão IPH-II**. Recursos Hídricos Publicação 3.Publicação aperiódica do Instituto de Pesquisas Hidráulicas. IPH-UFRGS. 1983.

UMEZAWA, P. K., **Previsão de deplúvio (Washload) em rios de áreas elevadas**. 232f. Dissertação (Mestrado em Hidrologia Aplicada) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1979.

VILLELA, S. M. e MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo : McGraw-Hill, 1975.

WALLING, D. E. **The Sediment Delivery Problem**. *Journal of Hydrol.*, 65: 209-237. 1983.

WILLIAMS,J.R. **Sediment routing for agricultural watersheds**. *Water Resources Bulletin*. V.11, n.5, pp.965-974. 1975.

WILLIAMS,J.R.; BERNDT,H.D. **Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology**. *Transactions of the ASAE*, vol. 20, n. 6, pp;1100-1104. 1977.

WISCHMEIER,W.H.; SMITH,D.D.. **Predicting Rainfall Erosion Losses: a Guide to Conservation Planning**. *Agriculture Handbook*, no 537. Washington, U.S.D.A. Department of Agriculture, 58p. 1978.

WOOLHISER, D. A., SMITH, R. E. & GOODRICH, D.C. **Kineros, a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual.** U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 1990.