

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDOS HIDROLÓGICOS E HIDROSEDIMENTOLÓGICOS
NA BACIA DO CÓRREGO DO CAPÃO COMPRIDO, DF.**

GUSTAVO RESSURREIÇÃO LOPES

ORIENTADOR: SÉRGIO KOIDE

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

BRASÍLIA/DF: MARÇO/2010

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ESTUDOS HIDROLÓGICOS E HIDROSEDIMENTOLÓGICOS NA
BACIA DO CÓRREGO DO CAPÃO COMPRIDO, DF.**

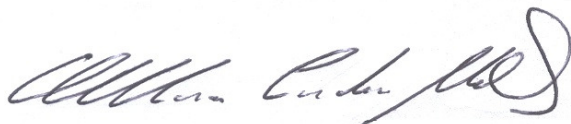
GUSTAVO RESSURREIÇÃO LOPES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU MESTRE
EM CIÊNCIA**

APROVADA POR:



**SÉRGIO KOIDE, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**



**OSCAR DE MORAES CORDEIRO NETTO, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**



**EVALDO MIRANDA COIADO, DSc (UNICAMP)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

FICHA CATALOGRÁFICA

LOPES, GUSTAVO RESSURREIÇÃO

Estudos hidrológicos e hidrossedimentológicos na bacia do córrego do Capão Comprido, DF. [Distrito Federal] 2010.

xix, 123p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2010).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Transporte de sedimentos

2. Descarga Líquida

3. Monitoramento

4. Curva-Chave

5. Modelagem Computacional

6. Correlação com Turbidez

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

LOPES, G. R. (2010). *Estudos hidrológicos e hidrossedimentológicos na bacia do córrego do Capão Comprido, DF*. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-131/2010, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 123p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Gustavo Ressurreição Lopes.

TÍTULO: Estudos hidrológicos e hidrossedimentológicos na bacia do Córrego do Capão Comprido, DF.

GRAU: Mestre

ANO: 2010

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Gustavo Ressurreição Lopes
gustavorlopes@gmail.com

*Em memória de meu avô
Warner da Ressurreição.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ronaldo e Fátima, aos meus irmãos, Marcela, Guilherme e Eduarda.

Ao professor Sérgio Koide pelas orientações e ensinamentos.

Aos companheiros Bruno Távora e Ronaldo Medeiros pela grande ajuda no campo e no dia-a-dia.

Aos colegas de curso, Bruno Goulart, Bruno Oliveira, Davi Marwell, Diego Reys, Eduardo Concesso, Licia Maria, Débora Tolentino e a todos os outros que se fizeram presentes no PTARH.

Ao Engenheiro Militar Jolival Antonio da Silva, pela ajuda com o levantamento planialtimétrico.

Aos alunos e pesquisadores que trabalharam anteriormente com a bacia do Capão Comprido e coletaram importantes dados.

Ao CNPQ pelo apoio financeiro por meio da bolsa de mestrado recebida durante o período desta pesquisa.

Ao MCT/CT-Hidro, FINEP e FINATEC, pelo financiamento do Projeto Descoberto e consequente auxílio no desenvolvimento experimental desta dissertação.

Aos professores Ariuska Amorim, Cristina Brandão, José Goes, Marco Antônio Souza, Nabil Joseph Eid, Nestor Campana e Oscar Cordeiro Netto, pelos conhecimentos transmitidos ao longo do curso.

As amigas que ficaram em Maceió e as que foram feitas na Capital Federal.

Para que fique clara a importância da ajuda dos companheiros Bruno Távora e Ronaldo Medeiros eu gostaria de citá-los novamente.

RESUMO

ESTUDOS HIDROLÓGICOS E HIDROSEDIMENTOLÓGICOS NA BACIA DO CÓRREGO DO CAPÃO COMPRIDO, DF.

Autor: Gustavo Ressurreição Lopes

Orientador: Sergio Koide

Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, Março de 2010.

Trabalhos de campo foram realizados para determinação de vazões e cargas de sedimento em suspensão, com ênfase em vazões de cheias, em um córrego que drena uma área de aproximadamente 16 km² na bacia do rio Descoberto, DF.

A curva-chave de sedimentos foi levantada com base em mais de 200 amostras coletadas no período de novembro de 2008 até abril de 2009. As curvas-chave de sedimentos ajustadas e os dados de cota fluviométrica registrados a cada 15 minutos permitiram verificar o intervalo mínimo de tempo entre leituras de cota necessárias para que se possam obter valores confiáveis de carga de sedimento no período amostrado na bacia em estudo

Foi feita uma comparação das vazões e cargas de sedimento obtidas com as curvas-chave de vazões e de carga de sedimento em suspensão encontradas neste trabalho com as curvas obtidas em trabalho anterior, na mesma bacia, em que as curvas foram estimadas com base em dados que, apesar de medidos no período chuvoso, não incluíam valores altos de vazão e carga de sedimento, essa comparação mostrou que curvas obtidas sem valores altos levaram a uma grande subestimativa (70%) de carga de sedimento em suspensão.

Um turbidímetro acoplado a um equipamento registrador com valores a cada 10 minutos foi instalado na bacia e a obtenção desses valores junto com a coleta de amostras, permitiu a obtenção de uma razoável correlação entre os valores de turbidez e a carga de sedimento. Esses resultados mostram que esses equipamentos, desde que corretamente operados, podem se constituir em uma ferramenta útil para a aferição de carga de sedimento em suspensão.

A aplicação do modelo KINEROS2 integrado à interface AGWA, utilizando como parâmetros do modelo valores encontrados em tabelas, como os apresentados por FAO/UNESCO (2003), permitiu testar a capacidade do modelo de simular, sem calibração a vazão e a carga de sedimento em suspensão. O resultado foi considerado inconclusivo, pois superestimou as vazões de pico e a descarga de sedimentos.

ABSTRACT

HYDROLOGICAL AND HYDROSEDIMENTOLOGICAL STUDY IN CAPÃO COMPRIDO BASIN, DF.

Author: Gustavo Ressurreição Lopes

Supervisor: Sergio Koide

Programa de Pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, March of 2010.

Field work were conducted to determine flow rates and loads of suspended sediment, with emphasis on flood flows in a stream that drains an area of approximately 16 km² Descoberto river basin on DF.

The relation of sediment load discharge was raised based on more than 200 samples collected from November 2008 until April 2009. The relation of sediment load discharge and the data river stage recorded every 15 minutes allowed us to verify the lower time step between river stages readings to good sediment loads at the sample period in the studied basin.

The flow and sediments discharge data from loads from the relation of stage flow and sediment load discharge in the present work were compared with data from previous works that did not presents pick flow data. The results suggest a underestimation of 70 % when only low flows are computed to the discharge sediment curves.

To obtain an continuous sediment estimation a nefelometer with data logger was installed at the basin. The data collected every 10 minutes were compared with sediments samples showing great correlation between turbidity and sediments loads. These results show that such equipment, if properly operated, can constitute a useful tool for measuring the load of suspended sediment.

The implementation of the model KINEROS2 integrated to AGWA interface, using as model parameters values found in tables, as presented in FAO / UNESCO (2003), allows to test the capability of simulating the model without calibration flow and sediment load in suspension. The result was considered unsatisfactory, because overestimated the peak flow and discharge of sediment.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	1
2 – OBJETIVOS.....	3
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1 – PROCESSOS HIDROLÓGICOS.....	4
3.1.1 – Evapotranspiração.....	5
3.1.2 – Precipitação.....	7
3.1.3 – Infiltração.....	8
3.1.4 – Escoamento superficial.....	9
3.1.5 – Escoamento subterrâneo.....	11
3.2 – LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE DADOS.....	11
3.2.1 – Levantamento Hidrossedimentométrico.....	11
3.2.1.1 – Amostragem.....	12
3.2.1.2 – Análises de Laboratório.....	14
3.2.2 – Curva-Chave de Sedimento.....	15
3.2.3 – Relação entre Turbidez e Concentração de Sedimentos.....	17
3.2.4 – Levantamento Pluviométrico.....	17
3.2.5 – Levantamento Fluviométrico.....	18
3.2.6 – Curva Chave de Descarga.....	19
3.2.6.1 – Extrapolação da Curva.....	20
3.3 – MODELOS HIDROLÓGICOS.....	21
3.3.1 – Classificação dos Modelos.....	21
3.3.2 – Escala e Incertezas.....	24
3.3.3 – Sistemas de Informações Geográficas Integrados a Modelos Hidrológicos ..	26
3.3.4 – Principais Modelos Hidrológicos e de Qualidade de Água de Domínio Público.....	27
3.3.4.1 – AGNPS (Agricultural Non-Point Source).....	28
3.3.4.2 – ANSWERS (Areal Non point Source Watershed Environment Response Simulation).....	29
3.3.4.3 – HEC-HMS (Hydrologic Modeling System).....	30
3.3.4.4 – KINEROS2 (Kinematic Runoff and Erosion Model).....	30
3.3.4.5 – SWAT (Soil and Water Assessment Tool).....	32
3.4 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	34
3.4.1 – Estudo para elaboração de Curva-Chave de Vazão para a bacia.....	37
3.4.2 – Estudo para elaboração de Curva-Chave de Sedimento para a bacia.....	38
4 – MODELO UTILIZADO NA PESQUISA.....	38

4.1 – MODELO KINEROS2.....	39
4.1.1 – Modelo Conceitual	39
4.1.2 – Representação dos processos.....	40
4.1.2.1 – Infiltração.....	40
4.1.2.2 – Chuva.....	42
4.1.2.3 – Interceptação.....	43
4.1.2.4 – Escoamento Superficial	43
4.1.2.5 – Escoamento no Canal	45
4.1.2.6 – Erosão e Produção de Sedimentos.....	46
5 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	49
5.1 – TRABALHO DE CAMPO.....	50
5.1.1 – Rede de Monitoramento	50
5.1.2 – Principais Equipamentos Utilizados.....	51
5.1.2.1 – Turbidímetro Automático SL2000-TS	52
5.1.2.2 – Amostrador Manual USDH-48.....	53
5.1.2.3 – Amostrador do Tipo Automático ISCO 6712.....	53
5.1.2.4 – Régua Linimétrica	54
5.1.2.5 – Linigráfo <i>Global Water</i> com Data Logger	55
5.1.2.6 – ADV (<i>Acoustic Doppler Velocimeter</i>)	55
5.1.2.7 – Pluviógrafo <i>Onset</i>	56
5.1.3 – Levantamento de dados	57
5.1.3.1 – Dados Hidrossedimentológicos	57
5.1.3.2 – Dados Fluviométricos.....	58
5.1.3.3 – Dados Pluviométricos.....	59
5.1.3.4 – Dados Planialtimétricos.....	59
5.2 – TRABALHO DE LABORATÓRIO	60
5.3 – ANÁLISE DOS DADOS	60
5.3.1 – Dados Fluviométricos.....	60
5.3.1.1 – Curva Cota x Descarga com extrapolação pelo método de <i>Stevens</i>	63
5.3.2 – Dados Hidrossedimentológicos	68
5.3.2.1 – Curva-Chave de Sedimentos	72
5.3.2.2 – Correlação entre Turbidez e Concentração de Sedimento em Suspensão	74
5.3.3 – Dados Pluviométricos.....	77
5.3.4 – Dados Planialtimétricos.....	80
5.4 – MODELAGEM COMPUTACIONAL UTILIZANDO KINEROS2.....	80
5.4.1 – Delineação e Discretização da Bacia Hidrográfica	81
5.4.2 – Cobertura Vegetal e Parametrização do Solo.....	82
5.4.3 – Precipitação	83
6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	84
6.1 – PLUVOMETRIA.....	84

6.2 – PLANIALTIMETRIA	86
6.3 – FLUVIOMETRIA	88
6.4 – HIDROSSEDIMENTOLOGIA.....	92
6.4.1 – Curva-Chave de Sedimentos	92
6.4.1.1 – Comparação com a Curva-Chave de Sedimento existente.....	94
6.4.1.2 – Total de Sedimento transportado.....	94
6.4.2 – Correlação entre Turbidez e Concentração de Sedimento em Suspensão.....	95
6.4.2.1 – Correlação 1 - Utilizando dados dos eventos 1, 2 e 3.....	96
6.4.2.2 – Correlação 2 - Utilizando dados do evento 2	97
6.4.2.3 – Representação do desbarrancamento.....	99
6.5 – MODELAGEM UTILIZANDO KINEROS2	100
6.5.1 – Comparativo com Estudos Anteriores.....	107
7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	108
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111
APÊNDICES	117
APÊNDICE A – VAZÃO CALCULADA <i>versus</i> TEMPO DESDE 2006 ATÉ 2008, SEPARADAS POR ANO HIDROLÓGICO.....	118
APÊNDICE B – PRECIPITAÇÃO DISTRIBUÍDA MEDIDA DESDE 2006 ATÉ 2008, SEPARADAS POR ANO HIDROLÓGICO.....	120
APÊNDICE C – PRECIPITAÇÃO DISTRIBUÍDA MEDIDA DESDE 2006 ATÉ 2008, SEPARADAS POR ANO HIDROLÓGICO.....	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Ciclo hidrológico global médio (Adaptado de Shiklomanov, 1998 e Setti <i>et al.</i> , 2000).....	4
Figura 3.2 – Amostrador Automático ISCO.....	13
Figura 3.3 – Método da Filtração em uso.....	14
Figura 3.4 – Réguas instaladas	19
Figura 3.5 – Classificação simplificada dos modelos (Adaptado de Machado, 2002).....	24
Figura 3.6 - Inserção da bacia do Capão Comprido no Distrito Federal.	35
Figura 3.7 – Caracterização do solo na bacia do Capão Comprido (Adaptado de Reatto <i>et al.</i> , 2003a).....	36
Figura 3.8 – Curva-Chave de vazão elaborada por Fragoso (2008).....	37
Figura 3.9 – Curva-Chave de sedimento elaborada por Bicalho (2006).	38
Figura 5.1 – Equipamentos fixos existentes na bacia do Capão Comprido	51
Figura 5.2 – Localização da seção de controle estudada.....	52
Figura 5.3 – Turbidímetro automático SL2000-TS instalado e transferindo dados para o computador.....	53
Figura 5.4 – Amostrador manual USDH-48.....	53
Figura 5.5 – Amostrador do tipo automático ISCO 6712.....	54
Figura 5.6 – Régua linimétrica instalada na seção de estudo com vazão baixa e alta.....	54
Figura 5.7 – Linígrafo da marca <i>Global Water</i>	55
Figura 5.8 – Medidor de velocidade baseado no efeito Doppler (ADV) e medição com equipamento.....	56
Figura 5.9 – Pluviógrafo <i>Onset</i>	56
Figura 5.10 – Realização de medição de vazão na seção, com ADV	58
Figura 5.11 – Levantamento altimétrico da seção de controle com Estação Total	59
Figura 5.12 – Manuseio de amostra para filtração, sistema de filtragem ligado a bomba de sucção e filtros após amostras passarem pelo sistema.....	60
Figura 5.13 – Seção de controle com baixo e com alto fluxo.	61
Figura 5.14 – Medições utilizadas para elaboração de curva-chave e descartadas.	61
Figura 5.15 – Mudança da tendência identificada para os dados de vazões baixas no período “1” (anterior a fevereiro de 2008) e “2” (posterior a fevereiro de 2008).....	63

Figura 5.16 – Curva Cota x Descarga com equação do tipo polinomial do terceiro grau, período anterior à 02/2008.....	64
Figura 5.17 – Curva Cota x Descarga com equação do tipo polinomial do terceiro grau, período posterior à 02/2008.....	64
Figura 5.18 – Curva Cota x Descarga com equação do tipo potencial, período anterior à 02/2008.....	65
Figura 5.19 – Curva Cota x Descarga com equação do tipo potencial, período posterior à 02/2008.....	66
Figura 5.20 – Extrapolação pelo método de <i>Stevens</i>	67
Figura 5.21 – Extrapolação dos dados por três diferentes tendências para os períodos 1 e 2.	68
Figura 5.22 – Dados de Concentração de Sólidos em Suspensão (g/L) x Hora para os eventos amostrados – a) evento em 26.11.2008, b) evento em 29.11.2008.	69
Figura 5.23 – Dados de Concentração de Sólidos em Suspensão (g/L) x Hora para os eventos amostrados – a) evento em 11.12.2008, b) evento em 08.01.2009 e c) evento em 09.01.2009.	70
Figura 5.24 – Dados de Concentração de Sólidos em Suspensão (g/L) x Hora para os eventos amostrados – a) evento em 20.01.2009, b) evento em 21.01.2009 e c) evento em 22.01.2009.	71
Figura 5.25 – Dados de Concentração de Sólidos em Suspensão (g/L) x Hora para os eventos amostrados – a) evento em 04.02.2009 e b) evento em 04.04.2009.	72
Figura 5.26 – Concentração de Sedimentos (g/L) x Vazão (m ³ /s).	73
Figura 5.27 – Comparação, por evento, entre os dados de turbidez e sólidos em suspensão no tempo.	75
Figura 5.28 – Sólidos em Suspensão (g/L) X Turbidez (NTU) para a Correlação com dados dos eventos 1, 2 e 3 – Duas Tendências	76
Figura 5.29 – Sólidos em Suspensão (g/L) X Turbidez (NTU) para a Correlação com dados do evento 2 – Duas Tendências	77
Figura 5.30 – Espacialização da precipitação dos 4 postos antigos.	79
Figura 5.31 – Espacialização da precipitação dos 4 postos antigos juntos com os 2 novos.	79
Figura 5.32 – Representação dos polígonos de <i>Thiessen</i>	80
Figura 5.33 – Planos e canais definidos pelo <i>software</i> AGWA.	82
Figura 5.34 – Classificação da Cobertura vegetal e uso do solo no Capão Comprido (Adaptado de Santos (2010)).	83

Figura 6.1 – Precipitação total mensal para o ano hidrológico 2008-2009.	85
Figura 6.2 – Precipitação média por mês para o período de 2006-2009.	85
Figura 6.3 – Perfil transversal da seção de controle	86
Figura 6.4 – Planta da área que circunda a seção de controle e pontos coletados.....	87
Figura 6.5 – Curva chave para o período “1”	88
Figura 6.6 – Curva chave para o período “2”	89
Figura 6.7 – Comparativo entre a curva-chave de vazão proposta e a de Fragoso (2008)..	90
Figura 6.8 – Vazão Calculada (m ³ /s) utilizando as cotas medidas e a curva-chave no período de setembro/2008 à agosto/2009	91
Figura 6.9 – Vazão (m ³ /s) e Precipitação (mm) versus tempo (setembro/2008 à agosto/2009)	91
Figura 6.10 – Desbarrancamento de encosta a montante da seção de controle.....	92
Figura 6.11 – Curva-Chave de Sedimentos para o Capão Comprido.....	93
Figura 6.12 – <i>Zoom</i> na “parte baixa” da Curva-Chave de Sedimentos para o Capão Comprido	93
Figura 6.13 – Comparativo entre a Curva-Chave de Sedimento proposta e a de Bicalho (2006).....	94
Figura 6.14 – Validação das equações de correlação através das amostras do evento 4.....	97
Figura 6.15 – Validação das equações de correlação através das amostras do evento 1.....	98
Figura 6.16 – Validação das equações de correlação através das amostras do evento 3.....	98
Figura 6.17 – Validação das equações de correlação através das amostras do evento 4.....	99
Figura 6.18 – Sólidos em suspensão calculados através da correlação e da curva-chave dando enfoque a parte que mostra a queda de barranco na encosta	100
Figura 6.19 – Comparativo entre o resultado da simulação com o KINEROS2 e o valor observado para Vazão (m ³ /s) e Descarga Sólida (ton/dia) – Evento 01.....	102
Figura 6.20 – Comparativo entre o resultado da simulação com o KINEROS2 e o valor observado para Vazão (m ³ /s) e Descarga Sólida (ton/dia) – Evento 03.....	103
Figura 6.21 – Comparativo entre o resultado da simulação com o KINEROS2 e o valor observado para Vazão (m ³ /s) e Descarga Sólida (ton/dia) – Evento 04.....	104
Figura 6.22 – Comparativo entre o resultado da simulação com o KINEROS2 e o valor observado para Vazão (m ³ /s) e Descarga Sólida (ton/dia) – Evento 06.....	105
Figura A. 1 – Vazão Calculada (m ³ /s) <i>versus</i> tempo (março/2006 à agosto/2006)	118
Figura A. 2 – Vazão Calculada (m ³ /s) <i>versus</i> tempo (setembro/2006 à agosto/2007)	118

Figura A. 3 – Vazão Calculada (m^3/s) <i>versus</i> tempo (setembro/2007 à agosto/2008)	119
Figura B. 1 – Precipitação distribuída na bacia no ano hidrológico 2006-2007	120
Figura B. 2– Precipitação distribuída na bacia no ano hidrológico 2007-2008	120
Figura C.1– Comparativo entre o resultado da simulação com o KINEROS2 e o valor observado para Vazão (m^3/s) e Descarga Sólida (ton/dia) – Evento 02.	121
Figura C.2– Comparativo entre o resultado da simulação com o KINEROS2 e o valor observado para Vazão (m^3/s) e Descarga Sólida (ton/dia) – Evento 05.	122
Figura C.3– Comparativo entre o resultado da simulação com o KINEROS2 e o valor observado para Vazão (m^3/s) e Descarga Sólida (ton/dia) – Evento 07.	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Caracterização e exemplificação das classes (adaptado de DeVries e Hromadka, 1992)	6
Tabela 3.2 - Caracterização e exemplificação das classes (adaptado de DeVries e Hromadka, 1992).....	22
Tabela 3.3 - Possibilidades de integração e suas caracterizações (Adaptado de Sui e Maggio, 1999).	27
Tabela 4.1 – Elementos e características presentes no KINEROS2 (Semmens <i>et al.</i> , 2005).	40
Tabela 5.1 – Precipitação total entre janeiro e março de 2009, por posto pluviométrico ...	78
Tabela 5.2 – Tipos de Solos existentes, definidos por Reatto <i>et al.</i> (2003a) e sua respectiva classificação por FAO/UNESCO (2003).....	83
Tabela 5.3 – Eventos de Precipitação utilizados na simulação com KINEROS2	84
Tabela 6.1 – Total de Sedimento Transportado por ano hidrológico utilizando diferentes intervalos de medição	95
Tabela 6.2 – Vazão de Pico(Q_p) e Descarga Sólida de Pico (Q_{ssp}) observada e calculada	101
Tabela 6.3 – $Q_p(\text{calc})/Q_p(\text{obs})$ e $Q_{ssp}(\text{calc})/Q_{ssp}(\text{obs})$	107

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

θ	- Porosidade do Solo
$\Delta\theta_{i0}$	- Diferença entre a umidade do solo acima e abaixo da frente de molhamento
Ω	- <i>Unit Stream Power Thereshold</i>
$^{\circ}\text{C}$	- Grau Celsius
A	- Área da Seção Transversal do Fluxo
ADV	- <i>Acoustic Doppler Velocimeter</i>
AGNPS	- <i>Agricultural Non-point Source</i>
AGWA	- <i>Automated Geoespacial Watershed Assessment</i>
A_m	- Área Molhada
AnnAGNPS	- <i>Annualized Agricultural Non-Point Source Pollution Model</i>
ANSWERS	- <i>Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation</i>
ARS	- <i>Agricultural Research Service</i>
BASINS	- <i>Better Assessment Science Integrating Point & Nonpoint Sources</i>
BW	- Largura Inferior
CODEPLAN	- Companhia de Desenvolvimento do Planalto Central
CREAMS	- <i>Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems</i>
C	- Coeficiente de Fricção de <i>Chezy</i>
CAESB	- Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
C_d	- Coeficiente de Arrasto da Partícula
C_h	- Efetividade do Amortecimento da Superfície da Água
C_m	- Concentração de Equilíbrio na Capacidade de Transporte
C_s	- Concentração de Sedimento
C_{ss}	- Concentração de Sólido em Suspensão
Cwa	- Classificação de Köppen que representa clima temperado ou temperado quente, com chuvas de verão e um verão quente.
Cwb	- Classificação de Köppen que representa clima temperado ou temperado quente, com chuvas de verão e um verão temperado.
DF	- Distrito Federal
DHM	- <i>Diffusion Hydrodynamic Model</i>
DQO	- Demanda Química de Oxigênio
DR3M	- <i>Distributed Routing Rainfall-Runoff Model</i>
e	- Taxa de Erosão do Solo

e_h	- Erosão Hidráulica
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias
EPIC	- <i>Erosion-Productivity Impact Calculator</i>
ESRI	- <i>Environmental Systems Research Institute</i>
FAO	- <i>Food and Agriculture Organization</i>
f_c	- Capacidade de Infiltração
FINEP/CT- HIDRO	- Fundo Setorial de Recursos Hídricos
FLDWAV	- <i>Flood Routing Program</i>
FLDWAV	- <i>Flood Wave Model</i>
G	- Potencial de Capilaridade
g	- Aceleração da Gravidade
$G(\theta_i, \theta_0)$	- Calor Efetivo do Potencial de Capilaridade
GLEAMS	- <i>Groundwater Loading on Agricultural Management Systems</i>
GLUE	- <i>Generalized Likelihood Uncertainty Estimation</i>
GRASS	- <i>Geographic Resources Analysis Support System</i>
h	- Volume de Água Armazenado
HEC	- <i>Hydrologic Engineering Center</i>
HECPREPRO	- Pré-processador de SIG do <i>Hydrologic Engineering Center</i>
HMS	- <i>Hydrologic Modeling System</i>
HSPF	- <i>Hydrological Simulation Program--Fortran</i>
I	- Lâmina de Infiltração
I_d	- Fator de Declividade
IID	- Igual Incremento de Descarga
IIL	- Igual Incremento de Largura
ILLUDAS	- <i>Illinois Urban Drainage Area Simulator</i>
KINEROS2	- <i>Kinematic Runoff and Erosion Model</i>
K_s	- Coeficiente de Variação da Condutividade Hidráulica Saturada Efetiva
MDE	- Modelo Digital de Elevação
MIKE11	- <i>Modelling System for Rivers and Channels</i>
MODFLOW	- <i>Modular Ground-Water Model – the Ground-Water Flow Process</i>
n	- Coeficiente de rugosidade de Manningue
NEXRAD	- <i>Next Generation Radar</i>

NTU	- <i>Nephelometric Turbidity Unit</i>
p	- Peso Seco do Sedimento
p_m	- Perímetro Molhado do Canal
P_e	- Perímetro Molhado Efetivo para Infiltração
PRMS	- <i>Precipitation-Runoff Modeling System</i>
Q	- Vazão
$Q_c(x,t)$	- Fluxo Lateral por Unidade de Comprimento do Canal
Q_p	- Vazão de Pico
q_s	- Taxa de Entrada Lateral de Sedimento
Q_{ss}	- Vazão Sólida
Q_{ssi}	- Vazão Sólida Medida em Determinado Instante
Q_{ssp}	- Vazão Sólida de Pico
QUAL2E	- <i>Enhanced and Stream Water Quality Model</i>
r	- Taxa de entrada de água
R^2	- Coeficiente de determinação
RAS	- <i>River Analysis Systems</i>
R_h	- Raio Hidráulico
RiverCAD	- <i>River Computer-Aided Design</i>
RiverTools	- <i>Topographic and River Network Analysis</i>
R_n	- Número de Reynolds
ROTO	- <i>Routing Outputs to Outlets</i>
S	- Declividade
SAS	- <i>Statistical Analysis Software</i>
SCE	- <i>Shuffled Complex Evolution</i>
SCS	- <i>Soil Conservation Service</i>
SHE	- <i>Système Hydrologique Européen</i>
SIG	- Sistema de Informações Geográficas
SPSS	- <i>Statistical Package for Social Science</i>
S_s	- Densidade Relativa do Sedimento
S_{ti}	- Sedimento Transportado em cada Instante
SWAT	- <i>Soil and Water Assessment Tool</i>
SWAT-G	- <i>Storm Water Management Model</i> em sua versão modificada.
SWMM	- <i>Storm Water Management Model</i>

SWRRB	- <i>Simulator for Water Resources in Rural Basins</i>
TIN	- <i>Triangulated Irregular Network</i>
TR-20	- <i>Computer Program for Project Formulation Hydrology - Technical Release Twenty</i>
u	- <i>Velocidade do Fluxo</i>
UNESCO	- <i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
USDA	- <i>United States Department of Agriculture</i>
USLE	- <i>Universal Soil Loss Equation</i>
V	- <i>Volume Total Utilizado</i>
WASP4	- <i>Water Quality Analysis Simulation Program</i>
WSPRO	- <i>Water Surface Profile Computations</i>
Z	- <i>Profundidade da Frente de Molhamento</i>

1 – INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, a ocupação territorial desordenada, a utilização não-sustentável do solo, a expansão da agroindústria, o desmatamento, a erosão do solo e o lançamento de efluentes industriais e domésticos em rios e lagos são os principais problemas encontrados nas bacias hidrográficas brasileiras e têm resultado na escassez dos recursos hídricos, principalmente em áreas urbanas, a poluição das águas, o assoreamento de rios e lagos, bem como a conflitos pelo uso da água.

As situações citadas também refletem a realidade de biomas como o cerrado, que compõe grande parte do planalto central brasileiro, uma zona de elevada altitude e por esse motivo desempenha um papel fundamental na produção e distribuição dos recursos hídricos para a maioria das grandes bacias hidrográficas do território nacional. Com a criação do Distrito Federal uma rápida ocupação territorial aconteceu nesse bioma, porém o acompanhamento e a produção de informações acerca do comportamento hidrológico não aumentaram nem evoluíram na mesma proporção.

Para mitigar as situações citadas, é necessário que a gestão dos recursos hídricos seja planejada de forma adequada, e para isso, conhecer e compreender os processos hidrológicos existentes em uma bacia hidrográfica é indispensável. Para melhor compreensão desses processos, com um menor custo, é feito o monitoramento de pequenas bacias para posterior extensão de seus dados a maiores escalas, já que os parâmetros encontrados, a princípio, podem ser considerados válidos para regiões que possuam características semelhantes à área estudada.

Ao monitorar uma bacia é possível levantar dados de precipitação, vazão, transporte de sedimentos e outros, de uma forma sistemática, através de pontos de amostragem previamente selecionados, com o objetivo de acompanhar os valores e a evolução dos quantitativos de diversos parâmetros, assim, podendo compreender o “funcionamento” da bacia monitorada. Outro importante resultado do acompanhamento são as séries temporais de dados que são informações essenciais para orientar tomadas de decisão com relação ao gerenciamento dos recursos existentes uma bacia.

A necessidade de realização de estudos hidrológicos já é bastante difundida, porém, tão importantes quanto este tipo são os estudos hidrossedimentológicos, já que, segundo Carvalho *et al.* (2005), situações adversas decorrentes do transporte dos sedimentos podem diminuir a vida útil de aproveitamento de um corpo hídrico, tornando a verificação desse tipo de dado necessária.

A grande dificuldade em administrar o uso da água em uma bacia hidrográfica vem, basicamente, da quantidade insuficiente de dados que sirvam para a caracterização e identificação dos problemas que envolvem os recursos hídricos. Ferramentas computacionais avançadas e poderosas, como os modelos matemáticos integrados a sistemas de informações geográficas (SIG) podem ser utilizados para mitigar essa situação, já que esses instrumentos buscam representar o sistema hídrico e assim podem auxiliar a gestão e o planejamento desses recursos.

Devonec e Barros (2002) afirmam que a utilização de bacias experimentais e representativas tem se constituído em uma ferramenta importante para o estudo detalhado das características hidrológicas dos diferentes ambientes, sendo fundamental para desenvolvimento, calibração, teste e parametrização dos modelos hidrológicos.

Neste trabalho, foram realizados estudos hidrológicos e hidrossedimentológicos em uma sub-bacia experimental/representativa, por meio da criação/complementação de uma base de dados, análise dos dados, estudos quantitativos e por fim modelagem matemática utilizando o KINEROS2. A sub-bacia em questão é a do córrego Capão Comprido, que está inserido na bacia do rio Descoberto, responsável por cerca de 70% do abastecimento de água do Distrito Federal, com o intuito de simular o fluxo de água, bem como o transporte de sedimentos para uma posterior transferência entre escalas, ainda que esta seja uma questão em desenvolvimento, como afirma Beven (2001a).

2 – OBJETIVOS

O objetivo principal do estudo é a análise das relações entre os fluxos de água e o transporte de sedimentos em suspensão na bacia experimental do Capão Comprido, com vistas a uma melhor compreensão do comportamento hidrológico em uma sub-bacia agrícola no Cerrado.

Para dar subsídio a essa análise, têm-se os seguintes objetivos específicos:

- Obter dados hidrológicos e hidrossedimentológicos em condições de altas vazões;
- Relacionar vazão, cota e transporte de sedimento, de forma que seja possível elaborar curvas representativas e compará-las com estudos realizados na mesma área;
- Analisar metodologia para encontrar o valor do sedimento transportado no Corpo Hídrico, através da correlação entre a turbidez e a concentração de sedimentos;
- Analisar a frequência mínima de medição de cotas que permita uma estimativa confiável de carga de sedimento através da curva de sedimento;
- Verificar o potencial do modelo KINEROS2 na simulação da vazão e geração de sedimento a partir de dados da bacia, sem calibração.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 – PROCESSOS HIDROLÓGICOS

Considera-se, atualmente, que a quantidade total de água na Terra, cerca de 1.386 milhões de km³, tem permanecido de modo aproximadamente constante durante os últimos 500 milhões de anos; todavia, é importante ressaltar que as quantidades estocadas nos diferentes reservatórios individuais de água da Terra variaram significativamente ao longo desse período, mantendo-se, então, em um ciclo fechado em permanente movimento (Shiklomanov, 1998 e Setti *et al.*, 2000).

O ciclo hidrológico global, ilustrado na figura 3.1, é acionado com a retirada da água, líquida ou sólida, por meio da evaporação da superfície oceânica e terrestre, causada pela energia solar que a Terra absorve. Essa água entra no sistema de circulação geral da atmosfera que depende das diferenças de absorção de energia e da refletância entre os trópicos e as regiões de maior latitude, como as polares (Tucci e Clarke, 1997 e Setti *et al.*, 2000).

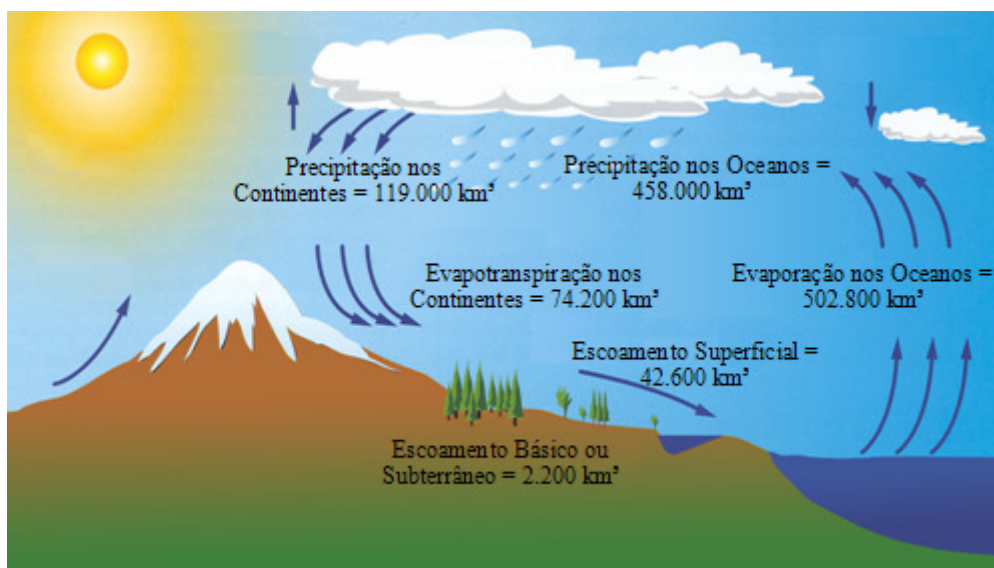


Figura 3.1 – Ciclo hidrológico global médio (Adaptado de Shiklomanov, 1998 e Setti *et al.*, 2000)

A bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico em que a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, considerando-se como perdas intermediárias os volumes evaporados e transpirados e também infiltrados profundamente (Silveira, 1993).

Os processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica possuem duas direções predominantes de fluxo da bacia: vertical e longitudinal. O vertical é representado pelos processos de precipitação e evapotranspiração já o longitudinal pelo escoamento na direção dos gradientes da superfície e do subsolo (Tucci e Clarke, 1997).

3.1.1 – Evapotranspiração

Wallace e Oliver (1990) conceituam a evaporação como o processo no qual a água líquida existente na superfície da Terra é convertida em vapor de água e transferida, nessa forma, para a atmosfera. Quando esse processo de vaporização ocorre através dos estômatos das plantas é chamado de transpiração. Afirmam também que a equação de *Penman-Monteith* é a fórmula básica utilizada para descrever unidimensionalmente o processo de evaporação. Tucci e Beltrame (2004) comentam que o processo de evaporação/evapotranspiração de superfícies naturais, pode ser simulado com embasamento físico, por modelos que descrevem o efeito de resistência à difusão molecular e turbulenta sobre a distribuição da energia do sol ou da atmosfera.

Informações quantitativas desses processos, que existem em quantidade insuficiente, podem ser obtidas por medidas diretas feitas com evaporímetros, lisímetros e medições de umidade do solo, em diferentes locais e condições meteorológicas. Por essa razão, diversos métodos são normalmente utilizados para a estimativa e determinação da evaporação e evapotranspiração. Para a primeira, além dos evaporímetros pode-se citar a transferência de massa, balanço de energia, equações empíricas e balanço hídrico. Já para a segunda, além dos lisímetros e medições de umidade, citam-se os métodos baseados na temperatura, métodos baseados na radiação, método combinado e balanço hídrico (Tucci e Beltrame, 2004).

Wallace e Oliver (1990) comentam que os métodos de balanço hídrico são sujeitos ao problema da precisão na determinação da evaporação por serem dependentes de erros acumulativos em suas variáveis. A Tabela 3.1 contém comentários feitos por Tucci e Beltrame (2004) acerca da conveniência do emprego dos procedimentos de cálculo para evaporação e evapotranspiração, já citados.

Tabela 3.1 - Caracterização e exemplificação das classes (adaptado de DeVries e Hromadka, 1992)

	Procedimento	Conveniência e limitações do emprego
Evaporação	Transferência de massa	Apresenta limitações devido à dificuldade de obtenção das variáveis envolvidas.
	Balço de energia	Superestima a evaporação para condições calmas e úmidas e subestima para condições secas e ventosas.
	Equações empíricas	Devem ser usadas com cuidado, pois, foram estabelecidas com base no ajuste por regressão das variáveis envolvidas, para algumas regiões e condições específicas.
	Atmômetros	Faz parte da categoria evaporímetros e tem como pontos positivos a fácil instalação, operação e portabilidade. A instalação, geralmente bem acima da superfície do solo e o meio circundante, afetam as reações deste aparelho, tornando-o pouco confiável.
	Tanques de evaporação	Também são representantes dos evaporímetros e se faz importante manter a água entre as profundidades recomendadas para evitar erros que podem chegar a 15% do valor determinado. Deve-se dar especial atenção à finalidade a que se destina a informação, evitando, desta maneira, ampliar os erros cometidos correntemente.
	Balço hídrico	O uso é teoricamente preciso, pois a equação está alicerçada no princípio de conservação de massa, porém, na prática as dificuldades para medir as demais variáveis limitam esse procedimento.
Evapotranspiração	Lisímetros	A maior restrição reside no pequeno volume e/ou área que o lisímetro representa. Esse procedimento é muito utilizado para calibrar metodologias de estimativa da evapotranspiração.
	Medidas de umidade do solo	Estão sujeitos à grande variabilidade espacial dos solos e, via de regra, são usados somente em áreas irrigadas. Valores aceitáveis só poderão ser obtidos se forem adotadas práticas preventivas como a determinação em períodos secos, o local de amostragem representativo e outras.
	Thornthwaite	É uma das principais expressões baseadas na temperatura. Foi desenvolvida baseada em dados de escoamento e precipitação colhidos em bacias temperadas dos Estados Unidos e por esse motivo, a utilização dela em regiões que diferem dessas características são insatisfatórias.
	Blaney-Criddle	Também é uma das principais expressões baseadas na temperatura. Tem seu uso não recomendado para regiões equatoriais em que a temperatura se mantém estável, oscilando somente as demais variáveis meteorológicas, também em locais altos e climas de latitude média.
	Métodos baseados em radiação	Proposto originalmente para estimativas diárias, o emprego deste método deve limitar-se a intervalos de cinco dias. A pouca disponibilidade desse tipo informações é o principal empecilho a esse método.
	Método combinado	É a melhor opção para estimativa da evapotranspiração potencial, mas a precisão do método depende fundamentalmente da radiação efetiva. Erros representativos podem ser encontrados em regiões semi-áridas e com ventos constantes.
	Balço hídrico	Normalmente é elaborado para intervalos de tempo superiores a uma semana, devido à falta de medição de todas as variáveis envolvidas. Esse balanço é simplista, já que, não considera todos os processos que envolvem o escoamento na bacia.

3.1.2 – Precipitação

Bertoni e Tucci (2004) definem a precipitação como toda água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre. Neblina, chuva, granizo, saraiva, orvalho, geada e neve são formas de precipitações que diferem apenas no estado em que a água se encontra. Os autores também afirmam que as características principais da precipitação são a altura total, duração e distribuições temporal e espacial, já que o total precipitado não tem significado se não estiver vinculado a uma duração. Collischonn (2006) afirma que a precipitação é provavelmente a variável do ciclo hidrológico que apresenta a maior variabilidade espacial.

Conti (2002) comenta que muitas das avaliações em hidrologia ocorrem em áreas de grandes extensões territoriais, sendo um dos principais insumos os dados de precipitação. No entanto, a grande dificuldade está em como extrapolar/interpolar de forma satisfatória a precipitação a partir dos dados pontuais dos pluviômetros. O mesmo autor afirma que a precipitação em toda uma área, associada a um período de tempo, é obtida usualmente através da aplicação de três métodos, consagrados pela prática, que extrapulam/interpolam a precipitação segundo critérios matemáticos e geográficos. Esses métodos são da média aritmética, de Thiessen e Isoietas, sendo o primeiro, com validade restrita apenas para bacias pequenas, com pouca variação pluviométrica ou bacias com ampla cobertura de postos.

Basicamente existem duas maneiras de medir chuva: pontualmente, com pluviômetros e pluviógrafos e espacialmente por meio de radares meteorológicos e satélites (Chevallier, 2004). Convencionalmente, as formas de medição mais utilizadas são por meio de pluviômetros e pluviógrafos esses em menor número. Esses dados são pontuais e suscetíveis a uma série de fatores naturais relacionados à localidade do posto, além da influência antrópica na mensuração e na manipulação dos dados obtidos (Mol, 2005). A baixa densidade de postos pluviométricos em bacias brasileiras tem sido o fator determinante nas incertezas dos resultados de diversos modelos hidrológicos que têm sido aplicados no país (Collischonn, 2006).

Postos pluviométricos convencionais fornecem registros válidos apenas para um pequeno entorno do instrumento; para superar essa limitação pode-se utilizar radares meteorológicos no

solo, já que esses oferecem estimativas espaciais da precipitação sobre grandes áreas e em tempo aproximadamente real. Nestes, a taxa de precipitação em um determinado ponto é correlacionada à intensidade de um sinal de retorno irradiado pelas gotas de chuva e a distância do ponto ao radar é correlacionada ao tempo de retorno do sinal (Collischonn, 2006).

Tucci e Clarke (1997) afirmam que da precipitação que atinge o solo 85% é decorrente da travessia direta pela vegetação da floresta e de 1 a 2% pelo que escorre através dos troncos. A diferença entre o total precipitado e o que atinge o solo é a interceptação. A quantidade precipitada que chega a atingir o solo pode infiltrar ou escoar superficialmente, dependendo da capacidade de infiltração que o solo oferece. Valor esse que está relacionado ao tipo e uso do mesmo.

3.1.3 – Infiltração

Silveira *et al.* (2004) definem infiltração como a passagem de água da superfície para o interior do solo; portanto, é um processo que depende fundamentalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar, inicialmente presentes no seu interior. Os autores comentam que o equacionamento geral da infiltração é feito a partir da representação matemática do movimento da água em solos não saturados, isto é, solos com teor de umidade abaixo da saturação.

Segundo Hillel (1998) diversas formulações, muitas inteiramente empíricas e outras com base teórica, foram propostas ao longo dos anos em repetidas tentativas de expressar a infiltrabilidade como função do tempo ou da quantidade total da quantidade de água infiltrada no solo. O mesmo autor comenta que as equações de *Green e Ampt* e de *Philip* baseiam-se em soluções matemáticas para bem definir a teoria de infiltração com bases físicas. Por outro lado, as equações de *Horton* e de *Holtan* são expressões essencialmente empíricas.

Incluem-se nos métodos de medição da infiltração no solo o infiltrômetro de aspersão que consiste na aplicação de uma precipitação artificial; a utilização de um infiltrômetro de cilindro que funciona introduzindo um fluxo de água controlado; e também pode-se determinar a infiltração através de dados de chuva (Knapp, 1980 e Hillel, 1998).

3.1.4 – Escoamento superficial

Gerits *et al.* (1990) definem o escoamento superficial como o fluxo de água acima da superfície antes de ser canalizado no corpo hídrico. Tucci e Clarke (1997) afirmam que o escoamento superficial converge para os rios que formam a drenagem principal das bacias hidrográficas. Nos rios o escoamento depende de diversas características físicas tais como a declividade, rugosidade, seção de escoamento e obstruções ao fluxo.

Embora o escoamento superficial possa ser referido como fluxo de uma lâmina uniforme descendo a encosta, esse conceito é irreal. Pode-se afirmar que mesmo se a precipitação for uniforme, o fluxo decorrente não o será (Gerits *et al.*, 1990). Os mesmos autores afirmam que se pode distinguir quatro grandes classes de escoamento superficial:

- Escoamento superficial Hortoniano - ocorre quando a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração.
- Escoamento superficial Hortoniano com atraso - acontece quando a intensidade da chuva excede a capacidade de infiltração somente após certo tempo.
- Escoamento superficial com saturação da camada superior do solo – acontece em solos em que uma camada relativamente permeável sobrepõe uma camada com material menos permeável.
- Escoamento superficial saturado – ocorre quando a capacidade de armazenamento do solo está completamente esgotada, de forma que o incremento subsequente de água na superfície força o escoamento sobre da mesma.

O gráfico que relaciona a vazão no tempo é denominado hidrograma e a sua forma depende de fatores como o relevo, a cobertura da bacia, as modificações artificiais no rio, a distribuição, duração e intensidade da precipitação, bem como o solo. O hidrograma pode ser caracterizado por três partes principais (ascensão, região de pico e recessão), nas quais, as duas primeiras têm como componente principal o escoamento superficial (Tucci, 2004).

Gerits *et al.* (1990) afirmam que o escoamento superficial durante o evento de precipitação é governado pelas leis de conservação da massa e de momento as quais são sempre remetidas às equações de *Saint-Venant*. Os autores comentam que embora o escoamento superficial seja representado, de forma idealizada, por meio das equações citadas, a solução

através da onda cinemática vem obtendo resultados acurados para a maior parte dos casos da hidrologia. O método da onda cinemática simplifica as equações de *Saint-Venant* desprezando os termos de aceleração local e convectiva, bem como a contribuição lateral e iguala a inclinação da superfície livre à da linha de energia.

O escoamento superficial pode ser laminar, turbulento ou transicional, no qual, o primeiro pode ser descrito pela equação de *Darcy-Weisback*, o segundo pela equação de *Manning-Strickler* e o terceiro pode ser descrito pela forma modificada da equação de *Colebrook-White* para conduto forçado. As características hidráulicas do escoamento superficial são descritas, basicamente, pelo número de *Reynolds* que é um índice de turbulência do fluxo; contudo, esse número não descreve por completo o grau de turbulência o qual também é influenciado pelo impacto da queda da chuva e pelas irregularidades topográficas que induzem a distúrbios no fluxo (Gerits *et al.*, 1990).

Para Tucci (2004) o escoamento superficial em pequenas bacias ocorre predominantemente sobre a superfície do solo, em drenos com perdas hidráulicas maiores, mas com maior declividade. Já em bacias de grande porte, o processo predominante é o deslocamento da onda de cheia por um caminho definido, de menor declividade, mas com perda de carga menor.

O escoamento superficial e outros processos carregam os sedimentos que são deslocados esporadicamente e acabam provocando o remanejo e a redistribuição pela bacia de ponderáveis massas de partículas sólidas, a ponto de poderem eventualmente influenciar no ciclo hidrológico e, certamente, afetar o uso, a conservação e a gestão dos recursos hídricos. Os caminhos e velocidade de deslocamento serão determinados pelos obstáculos que as águas encontrarão (Bordas e Semmelmann, 2004).

O processo de deslocamento citado recebe o nome de erosão que têm início com a separação dos sedimentos por meio do impacto da queda da chuva e do escoamento, prossegue com o transporte dos mesmos por meio do respingo das gotas de chuva e do escoamento e finaliza com a deposição. Tentando descrever conceitualmente as perdas por erosão foi desenvolvido o modelo empírico-concentrado USLE (*Universal Soil Loss Equation*); desde então diversos outros modelos foram desenvolvidos, dentre eles os modelos com base física que utilizam as equações de continuidade para água e sedimento;

os modelos para previsão da influência da topografia na erosão e deposição; e a curva de descarga de sedimentos. (Gerits *et al.*, 1990)

3.1.5 – Escoamento subterrâneo

Segundo Römken *et al.* (1990) o escoamento subterrâneo tem início com a infiltração que é um processo complexo afetado por diversos fatores na superfície e no perfil do solo. Hillel (1998) afirma que infiltração é um termo aplicado ao processo de entrada da água no solo, geralmente através do fluxo descendente por toda a superfície do solo. A taxa desse processo determina a quantidade de água que atingirá as zonas abaixo da superfície e o quanto irá escoar superficialmente.

De acordo com a proporção de água dentro dos vazios do solo, a região sub-superficial pode ser dividida em duas: uma zona saturada, onde a água presente ocupa todos os vazios da matriz sólida, e uma zona não-saturada, onde se considera que a água não preenche todos os vazios e por isso, há presença de gases (Wanderley, 2000)

Wanderley (2000) comenta que descrever o fluxo em solo não-saturado é algo amplamente complexo, já que a presença de ar nos poros de um solo afeta fortemente as suas características hidráulicas, assim; o melhor meio de descrevê-lo é através da equação de *Richards* que leva em consideração o conteúdo de água no solo. Freeze e Cherry (1979) afirmam que os processos hidrológicos sub-superficiais são tão importantes quanto os superficiais e que para descrever o fluxo da água na zona saturada é necessário atrelar a lei da conservação de massa à lei de *Darcy* aplicada em três dimensões.

3.2 – LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

3.2.1 – Levantamento Hidrossedimentométrico

O transporte de sedimentos pelos rios é um fenômeno complexo que depende de processos erosivos ocorridos nas vertentes da bacia e no leito e margens dos rios e que fornecem material que, por sua vez, depende da energia do fluxo para ser transportado. A combinação dessas variáveis com fornecimento de material e energia do fluxo resulta em um fenômeno com grande variação no tempo e no espaço. O transporte de sedimentos é um processo natural e faz parte da evolução da paisagem originando formas geomorfológicas (Santos *et al.*, 2001).

O total de sedimento transportado ou descarga sólida total pode ser determinado por diversos métodos diretos ou indiretos, dentre eles: dados medidos nos rios, levantamentos topo-batimétricos de reservatório, estimativa da erosão por modelos de perda de solo ou através de regionalização dos dados (Carvalho, 1994). Correlacionar a descarga sólida com a turbidez também é uma forma de medição que vem sendo aplicada.

3.2.1.1 – Amostragem

A finalidade da amostragem é definir a tipologia e a concentração do material transportado no momento da medição, de forma a se obter amostras representativas na seção transversal do curso d'água (Santos *et al.*, 2001). A técnica de amostragem dos sedimentos a ser utilizada durante um estudo poderá variar de acordo com a disponibilidade de equipamentos e/ou objetivos a serem atingidos (Poletto e Merten, 2006).

Poletto e Merten (2006) afirmam também que a depender do propósito da pesquisa pode-se utilizar um determinado tipo de amostrador, como por exemplo, o do tipo acumulativo para caracterização geoquímica dos sedimentos, do tipo instantâneo para identificação de fontes de sedimentos, do tipo automático para estudos mais completos e também se pode citar integrador vertical que é o equipamento mais utilizado segundo Carvalho (1994).

Diversos autores, dentre eles Carvalho (1994) e Poletto e Merten (2006) afirmam que existem basicamente duas técnicas de amostragem que são utilizadas para monitoramento de sedimentos em rios, a denominada Igual Incremento de Largura (IIL) e a chamada Igual Incremento de Descarga (IID).

O princípio básico do método IIL baseia-se na divisão de uma seção transversal de um rio em segmentos igualmente espaçados, sendo a amostragem realizada em uma vertical, localizada na posição central de cada segmento. Procura-se entre as verticais escolhidas a que apresenta o maior valor entre o produto velocidade x profundidade, de onde se obtém a primeira amostra e encontra-se o tempo mínimo de amostragem. As outras amostras são coletadas na mesma velocidade de trânsito, e assim, terão volumes diferentes que poderão ser reunidos em uma amostra única para que seja feito apenas uma análise ou poderá continuar separado e a análise ser individual (Carvalho, 1994, Santos *et al.*, 2001, Bicalho, 2006).

O método IID condiciona medições através da divisão de uma seção transversal em parcelas de igual incremento de descarga. Em cada uma dessas parcelas é tomada uma amostra da mistura água e sedimentos em uma vertical localizada no centro da mesma e esta é considerada como sendo a concentração média da parcela. O método IID se caracteriza pela necessidade de conhecer desde o início, as velocidades e as vazões da seção a ser amostrada, já que como base nessas informações se gera um gráfico que possibilita a identificação das posições e profundidade para amostragem (Poletto e Merten, 2006).

Poletto e Merten (2006) explicam que se equipamentos automáticos de coleta, como o ISCO, forem utilizados é necessário que seja realizado um procedimento de calibração para a validação das amostras obtidas por esses equipamentos, já que, o ISCO realiza coletas pontuais de amostras, o que pode não expressar a condição real das concentrações de sedimentos.



Figura 3.2 – Amostrador Automático ISCO

Coiado (2001) afirma que coletas realizadas com amostradores convencionais (USDH-48, USDH-59 e outros) são inviáveis quando se tem objetivo de coletar amostras em um período seqüencial de várias horas, por esse motivo, o autor fez teste com amostrador automático do tipo ISCO, que permite programar a coleta das amostras sem a presença de um técnico e verificou que os valores de concentração obtidos eram bem próximos dos encontrados do modo convencional.

A rapidez de ocorrência e a dificuldade em acertar o horário foram os motivos apresentados por Lobo *et al.* (1999) para questionar a amostragem manual para sedimentos durante eventos chuvosos. Os autores sugerem, também, a instalação de amostrador automático.

3.2.1.2 – Análises de Laboratório

A escolha do método depende das análises que serão efetuadas, da quantidade de sedimentos na amostra e da qualidade dos sedimentos. Para amostras com baixas concentrações o método da filtração é o mais indicado, já para altas concentrações ou quando o teor de argila na amostra for grande, dificultando a filtração, indica-se utilizar o método da evaporação. Se o intuito for realizar apenas análise de concentração pode-se utilizar a metodologia da filtração ou a da evaporação. Se houver interesse de também fazer uma análise granulométrica é indicado a utilização do método do tubo retirado pelo fundo (Carvalho, 1994).

O método da filtração é o mais utilizado para análise de concentração e é recomendado pela rapidez de operação e simplicidade de equipamento apresentando uma relativa precisão (Carvalho, 1994). Para a aplicação do método da filtração, o procedimento inicial deve ser a determinação do volume de amostra a ser utilizado. Em seguida deve-se utilizar um béquer para transferir todo o composto (líquido+sedimentos) para um recipiente que funciona com uma bomba a vácuo succionando o material através de um papel filtro com malha de 0,47 mm ou inferior, que deve ser pesado antes da filtragem (Figura 3.3).



Figura 3.3 – Método da Filtração em uso

O resíduo da filtragem presente no papel filtro é levado à estufa, onde permanece cerca de 24 horas a uma temperatura em torno de 100°C, depois o material é levado para dessecadores a vácuo até atingir a temperatura ambiente, para em seguida, ser pesado na balança de precisão e o valor obtido deve ser subtraído do peso inicial do filtro. A concentração (C_s) é determinada pela razão entre o peso seco do sedimento (p) contido na amostra e o volume total utilizado (V).

$$C_s = \frac{p}{V} \quad 3.1$$

Para encontrar o valor da descarga sólida basta multiplicar a concentração de sedimentos pela vazão medida no momento da amostragem (Santos *et al.*, 2001).

3.2.2 – Curva-Chave de Sedimento

Glysson (1987), Poletto e Merten (2006) e Cobaner *et al.* (2009) afirmam que a curva-chave de sedimentos relaciona valores de vazão e descarga sólida e é um procedimento utilizado para extrapolar informações de concentração de sedimentos medidas de forma esporádica para informações de concentração de sedimentos não medidas. A maior representatividade da curva está diretamente ligada ao maior número de pontos medidos e a maior variação de vazão alcançada entre os valores máximos e mínimos (Carvalho, 1994).

Poletto e Merten (2006) indicam que a frequência mínima de medições é de uma por mês, sendo que boa parte das medições deveria ser realizada durante o período de cheias. Glysson (1987) e Carvalho (1994) afirmam que entre os métodos mais utilizados para traçar a curva destacam-se o do traçado visual e a da regressão linear. A Curva-chave de sedimento pode ter os pares de dados transformados em logaritmos, devido à dispersão dos pontos, e as equações de ajustes serem linear ou polinomial (Glysson, 1987 e Poletto e Merten, 2006).

Asselman (2000) ajustou curvas-chave de sedimentos para diferentes locais ao longo do rio Reno, localizado próximo a fronteira entre a Alemanha e a Holanda, e seus tributários. Os resultados mostraram que as curvas obtidas através de regressão usando mínimos quadrados, para os dados transformados em logaritmos, tendem a subestimar as taxas de sedimento transportado em valores entre 10% e 50%. O autor afirma que melhores

resultados são obtidos ao utilizar uma função potencial com base na regressão linear dos mínimos quadrados.

Em seus estudos Córdova e González (1997) analisaram a estimativa de sedimento utilizando curva-chave de sedimento e curva da duração do fluxo em dois importantes reservatórios na Venezuela. Ao relacionar os resultados com as medições os autores afirmam que encontraram erros grosseiros que subestimaram o sedimento transportado para pequenas bacias.

Bicalho (2006) executou trabalho em diversas sub-bacias afluentes do rio Descoberto, entre elas pode-se citar a do Capão Comprido no Distrito Federal em que a autora realizou campanhas entre junho de 2005 e fevereiro de 2006 e gerou curva-chave de sedimentos com um coeficiente considerado alto, tornando assim, uma curva bastante inclinada. A autora também levanta alguns prováveis erros que foram cometidos e que poderiam levar a esse formato.

Fragoso (2008) também estudou a bacia do Córrego do Capão Comprido e em seu trabalho afirma que utilizou a curva-chave de sedimentos feita por Bicalho (2006) porque não foi possível coletar amostras de sedimentos em eventos de cheia.

Picouet *et al.* (2001) afirmam que os laços de histerese são causados, entre outras razões, pela variação da quantidade de material disponível para erosão, pois as curvas-chave são modelos empíricos muito simples e incapazes de descrever tais variações e por isso, assumiram a possibilidade de que o transporte do sedimento não dependa somente da capacidade do curso d'água de erodir as margens e o leito bem como, de sua capacidade de transporte, e também da disponibilidade de sedimentos na bacia, levando em conta que a disponibilidade diminui durante a cheia.

Lenzi e Marchi (2000) analisaram sete eventos chuvosos que aconteceram entre 1991 e 1996 em uma pequena bacia localizada nos Alpes Italianos. Os autores encontraram diferentes padrões de histerese na relação entre os sedimentos e a descarga que foram verificadas para os diferentes características e localizações das fontes de sedimentos ativas.

3.2.3 – Relação entre Turbidez e Concentração de Sedimentos

Lopes *et al.* (2009) afirmam que a obtenção direta da produção de sedimento é bastante limitada, por necessitar de coleta e análise laboratorial. Outro problema é a variação temporal da geração de sedimentos não captada por amostras pontuais seja devido à sazonalidade das estações chuvosa e de estiagem ou até mesmo ao longo de um único evento pluviométrico.

Medidas de turbidez *in loco* estão sendo cada vez mais utilizadas para geração de dados contínuos de sedimentos em um corpo hídrico, porém, a utilidade da informação obtida depende da existência de uma relação próxima entre as duas (Minella *et al.*, 2008). Segundo Lewis (2003) a coleta automática de dados é essencial para a medição de sólidos em suspensão durante eventos de cheia, particularmente para pequenas bacias.

Minella *et al.* (2008) utilizaram duas metodologias diferentes para calibração de equação para correlacionar turbidez e concentração de sedimento para uma pequena bacia rural no sul do Brasil. No primeiro foram utilizadas medidas de turbidez feitas no campo e no segundo a medição foi feita em laboratório. Os autores buscaram observar qual metodologia apresentaria um menor erro e a verificação da turbidez diretamente em campo obteve os melhores resultados.

3.2.4 – Levantamento Pluviométrico

No Brasil, onde a maioria absoluta da precipitação cai sob a forma de chuva, costuma-se medir a precipitação por aparelhos chamados pluviômetros e pluviógrafos. O pluviômetro é um aparelho dotado de uma superfície de captação horizontal delimitada por um anel metálico e de um reservatório para acumular a água recolhida, ligado a área de captação (Santos *et al.*, 2001).

O pluviômetro não é adequado para medir chuvas de pequenas durações, para contornar isso se utilizam os chamados pluviógrafos, que são aparelhos capazes de registrar, continuamente, a precipitação em determinado local de forma digital ou analógica. Entre os diferentes tipos construtivos de pluviógrafos se destacam o de bóia, o de balança e o de cubas basculantes (Santos *et al.*, 2001).

Segundo Bertoni e Tucci (2004) um dos métodos que podem ser utilizados para preencher séries de dados de precipitação com falhas é o da Ponderação Regional. Para utilização desse método deve-se ter um grupo de postos pluviométricos localizados em regiões climatologicamente semelhantes, dos quais, pelo menos três devem ser selecionados. Em um determinado posto que contenha falhas, as mesmas serão preenchidas com base na equação 3.2.

$$y = \frac{1}{3} \left(\frac{x_1}{x_{m1}} + \frac{x_2}{x_{m2}} + \frac{x_3}{x_{m3}} \right) y_m \quad 3.2$$

Onde, y é a precipitação do posto Y a ser estimada; x_1 , x_2 e x_3 as precipitações observadas em estações vizinhas, y_m a precipitação média do posto Y e x_{m1} , x_{m2} e x_{m3} as precipitações médias nas estações vizinhas. Outra metodologia que pode ser utilizada é a da regressão linear.

3.2.5 – Levantamento Fluviométrico

Métodos que propiciam o conhecimento direto da descarga líquida em um dado instante, são caros e têm medições demoradas. Então, para poder se conhecer a vazão ao longo do tempo busca-se estabelecer relação ligando a altura do nível da água com a descarga, já que obter o valor da referida altura é algo simples (Chevallier, 2004).

Para medir a altura do nível (cota) de um curso d'água a maneira mais simples é a instalação de réguas verticais na água e observação regular do nível. As réguas devem ser niveladas a um *datum*, que pode ser obtido com uma referência de nível do levantamento geral da região. Com a régua instalada, um operador deverá fazer a leitura das cotas pelo menos uma vez por dia porém, por uma maior praticidade e melhor descrição temporal da vazão, a associação da régua com um aparelho automático, chamado linígrafo permitirá registro de eventos significativos de uma curta duração, o que é extremamente importante em uma bacia pequena (Santos *et al.*, 2001 e Chevallier, 2004).



Figura 3.4 – Réguas instaladas

Já para a medição da vazão em um determinado momento existem vários métodos sendo a medição das velocidades do fluxo d'água o mais utilizado em todo o mundo, principalmente no Brasil. Essas velocidades podem ser obtidas utilizando equipamentos como flutuadores, molinetes e equipamentos acústicos (Chevallier, 2004).

3.2.6 – Curva Chave de Descarga

Traçar uma curva-chave de descarga é determinar uma representação gráfica da relação cota-descarga a partir de algumas medições muitas vezes mal distribuídas no intervalo de cotas e, em certos casos, pouco precisas. É necessário ter um bom conhecimento do terreno e uma compreensão exata do funcionamento hidráulico do canal onde está a régua, para que, se possa ter uma correta interpretação das medições de descarga líquida (Jacon e Cudo, 1989).

Para que uma curva seja confiável é necessário que sejam feitas diversas campanhas de medições em épocas de estiagem, de águas médias e de cheias. Também é importante que o acompanhamento das medições de vazão seja permanente ao longo dos anos, já que modificações da seção transversal ocasionam a não permanência da curva-chave em muitas seções (Santos *et al.* 2001 e Barnez, 2004).

Chevallier (2004) afirma que a representação gráfica é a forma mais utilizada e nela a representação h/Q é feita por uma curva traçada em um sistema de eixos retangulares. Toda relação cota x descarga pode ser representada, na sua totalidade ou por trechos sucessivos,

por expressões matemáticas. Suas formas mais frequentes são a exponencial e a polinomial.

3.2.6.1 –Extrapolação da Curva

Para poder estimar as vazões maiores que a máxima medida em campo e assim estabelecer uma série contínua de vazões no local, a curva deve ser extrapolada (Santos *et al.*, 2001). É importante esclarecer que “extrapolar” não significa dizer, simplesmente, completar o traçado da curva segundo sua tendência. Esse é um erro que ocorre com bastante frequência e pode conduzir a valores absurdos para a descarga (Jacon e Cudo, 1989).

Existem diferentes métodos de extrapolação da curva, os mais utilizados são a extrapolação logaritimica e a feita pela metodologia de *Stevens*. O primeiro método consiste em aplicar na parte superior da curva um ajustamento de uma expressão matemática exponencial através da utilização da plotagem dos valores medidos em uma escala logarítmica, determinar graficamente o valor que retifica melhor a curva e extrapolar a reta até a cota máxima observada (Chevallier, 2004).

O método de *Stevens* utiliza a fórmula de *Chézy* apresentado na forma da equação 3.3, na qual a quantidade $A_m\sqrt{R_h}$ representa um fator geométrico e a quantidade $C\sqrt{I_d}$ um fator de declividade que varia muito pouco nos limites da aplicação (Chevallier, 2004). Este é um método simples por ser estritamente gráfico, porém existem algumas restrições ao uso como: o perfil deve ser estável e o fator geométrico não deve variar entre cheia e depleção e deve-se dispor de um número suficiente de medições (Jacon e Cudo, 1989).

$$\frac{Q}{A_m\sqrt{R_h}} = C\sqrt{I_d} \quad 3.3$$

3.3 – MODELOS HIDROLÓGICOS

Atualmente a modelagem é uma ferramenta utilizada com frequência em diversos campos, incluindo a pesquisa científica. Segundo Tucci (1998), modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas. Em uma definição mais simplória, mas não menos consistente Anderson e Woessner (1991) afirmam que um modelo é qualquer aparato que represente uma aproximação da situação real

A modelagem hidrológica, com um sentido matemático, teve seu provável início em 1856, com a publicação das análises do engenheiro francês *Henry Darcy* a cerca do fluxo d'água a um gradiente de pressão com uma taxa determinada pelo meio que o mesmo atravessa (Silberstein, 2006).

Antes do advento do computador a simulação matemática de sistemas de recursos hídricos sofria com as dificuldades de cálculo, o que impedia o seu pleno desenvolvimento. Desde a década de 1960 o cenário dos computadores vem se modificando de forma acelerada, possibilitando uma enorme evolução das técnicas matemáticas de simulação e otimização. (Azevedo *et al.*, 2002).

3.3.1 – Classificação dos Modelos

Diversos tipos de modelos foram elaborados e são utilizados para diferentes finalidades desde as mais simples como a estimativa da vazão de uma pequena bacia, em um projeto de drenagem até a previsão hidrológica em bacias sem dados para a calibração de modelos conceituais. Segundo DeVries e Hromadka (1992), modelos com maior complexidade requerem dados de mais difícil obtenção e assim pode até ser mais viável a utilização de um modelo menos complexo.

DeVries e Hromadka (1992) agruparam os modelos em quatro classes: de evento único, de simulação do fluxo contínuo, hidráulico de inundação e de qualidade da água. A Tabela 3.2 apresenta características e exemplos para as classes definidas pelos autores.

Tabela 3.2 - Caracterização e exemplificação das classes (adaptado de DeVries e Hromadka, 1992).

Tipos de Modelos	Características	Exemplos
Modelos de Evento Único	Têm como interesse inicial a elaboração do hidrograma de cheia e por esse motivo não é preciso calcular a evapotranspiração, mudanças no solo e nem o detalhamento do processo do fluxo de base.	TR-20, ILLUDAS, DR3M KINEROS2 e AGNPS.
Modelos de Simulação de Vazão Contínua	Consideram a variação temporal da precipitação e o movimento da água em toda bacia hidrográfica até a sua foz. Descrevem a maioria dos processos hidrológicos que governam o movimento da água em uma bacia.	SWRRB, PRMS, SWAT e SHE.
Modelos Hidráulicos de Inundação	Computam o perfil da superfície da água em canal aberto e representam o fluxo em canais naturais como rios, onde a geometria do perfil muda a cada seção.	WSPRO, FLDWAV e DHM.
Modelos de Qualidade da Água	Juntam a determinação da quantidade de água com a análise da qualidade da mesma. Normalmente necessitam que as características hidráulicas e de cargas lançadas no corpo hídrico sejam dados de entrada.	SWMM, HSPF, QUAL2E, WASP4, HEC-HMS e MIKE11.

Considerando a classificação supracitada, Garrido (2003) afirma que diversos modelos seriam classificados simultaneamente como de qualidade da água e de simulação do fluxo contínuo, visto que agregam as duas análises.

Outros autores como Refsgaard (1997), Tucci (1998), Collischonn (2001), Machado (2002), Kaiser (2006) e Silberstein (2006) utilizam uma classificação mais detalhada que a apresentada anteriormente e que por esse motivo consegue explicitar e dividir melhor os grupos de modelos de acordo com suas características, como pode se visto na Figura 3.5 e conceituado a seguir.

- **Modelos Concentrados** – consideram a bacia hidrográfica como sendo uniforme e assim não levam em conta a variabilidade espacial das suas características.
- **Modelos Conceituais** – quando as funções utilizadas na elaboração do modelo levam em consideração os processos físicos.
- **Modelos Distribuídos** – consideram a distribuição espacial e temporal das características da bacia.
- **Modelos Determinísticos** - as equações utilizadas nesse modelo não contêm componentes aleatórios então se os dados de entrada forem os mesmos a mesma resposta sempre será produzida.

- **Modelos Estocásticos** - as formulações utilizadas nesse tipo de modelo contêm variáveis aleatórias que seguem alguma distribuição probabilística e resultam em uma distribuição de resultados ou um resultado acompanhado de uma variação.
- **Modelos Empíricos** – buscam relacionar causas e efeitos através do ajuste dos valores calculados aos dados observados, sem preocupação com o significado físico do processo.
- **Modelos de Base Física** – representam os processos físicos do problema através de equações matemáticas. Esses modelos têm sua utilização restringida em função da dificuldade de representar matematicamente todos os processos.

É importante comentar que fatores como a disponibilidade de dados, os objetivos do estudo e as dimensões da bacia são condicionantes para o tipo de modelo a ser utilizado. Segundo Kaiser (2006), a necessidade de poder avaliar os impactos, oriundos da ação humana, de forma qualitativa e quantitativa remete à necessidade do desenvolvimento de modelos que representem mais realisticamente os processos hidrológicos e para isso é preciso que esses representem de forma distribuída os eventos e as características da bacia em processo de modificação.

Segundo Tucci (1998), os modelos completamente distribuídos não existem na prática, já que são utilizadas discretizações que, de algum modo, tornam o modelo distribuído em concentrado para uma pequena subdivisão. O alto investimento em tradução dos processos na forma matemática, produção de código fonte, preparação dos dados e experimentação no campo são fatores que devem ser levados em consideração ao escolher um modelo dito distribuído.

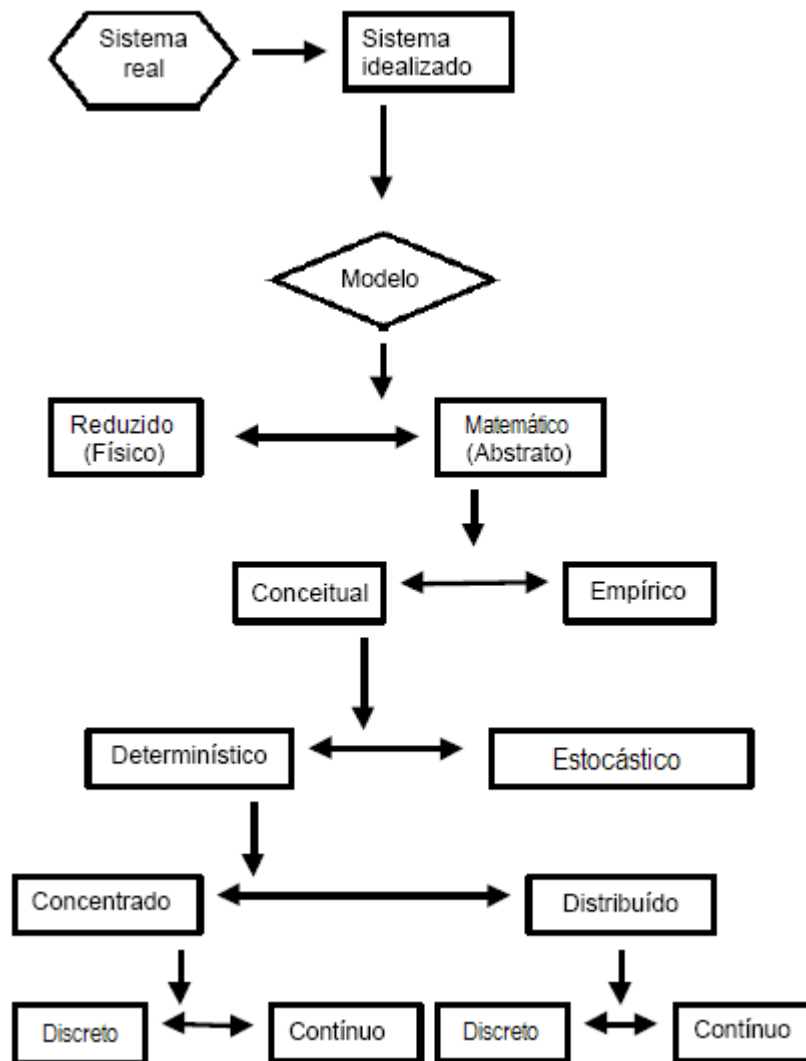


Figura 3.5 – Classificação simplificada dos modelos (Adaptado de Machado, 2002)

Ao se analisar as definições de modelo distribuído e de base física percebe-se que é impossível dissociá-los já que certo embasamento físico é necessário para explicar a consideração de características distribuídas. Previsão das conseqüências de alterações do uso do solo, da heterogeneidade espacial de variáveis de entrada e saída, do movimento de poluentes e sedimentos, bem como, a previsão hidrológica em bacias sem dados para a calibração de modelos conceituais são possibilidades de aplicação dos modelos distribuídos com base física (Beven, 1985).

3.3.2 – Escala e Incertezas

Collischonn (2001) afirma que um dos grandes desafios da hidrologia tem sido o melhor entendimento da escala espacial na qual os processos hidrológicos se desenvolvem. O autor

também discorre sobre a dificuldade que os modelos matemáticos de simulação enfrentam com a escala espacial de atuação nos seguintes aspectos:

- As simulações na escala que a hidrologia tradicional tem enfrentado maiores desafios, de dezenas e centenas de quilômetros quadrados, são adequadas para modelos hidrológicos conceituais, de uso tradicional na engenharia e modelos distribuídos mais recentes.
- Para uma escala acima de 10^4 km² se deve fazer simulações com modelos que considerem os processos hidrológicos superficiais em grande escala e com razoável embasamento físico.
- No extremo superior da escala existem os modelos que operam como módulos de hidrologia superficial nos modelos de previsão de tempo e clima.

Sabe-se que em grandes escalas os padrões existentes de topografia, solo e precipitação são importantes na geração de escoamento superficial, ou seja, diferenças nesses padrões causarão respostas diferentes. À medida que a escala espacial diminui, a bacia tende a suavizar os padrões locais de geração de escoamento superficial e fluxos. Para pequenas escalas, a geração de escoamento se torna, de alguma forma, insensível às mudanças na intensidade de precipitação, e a resposta da bacia, passa a ser governada por características de macro escala (Wood *et al.*, 1988)

Silberstein (2006) afirma que a incerteza na modelagem pode ter origem em erros na estrutura do modelo e na estimativa dos parâmetros. Para o caso de não existência de erro estrutural pode-se aperfeiçoar o modelo através da adição de processos e conseqüente aumento na complexidade o que irá requerer um maior número de parâmetros.

Segundo Wagener *et al.* (2001) a combinação de incerteza e a falta de identificação nos parâmetros de um modelo pode limitar significativamente o uso dos modelos para propósitos como a regionalização de parâmetros, a identificação do uso da terra e cenários de mudanças climáticas. Esse problema leva a uma investigação menos complicada e parcimoniosa da estrutura do modelo. Kaiser (2006) ressalta que a incerteza envolvida em todo o processo de calibração de modelos hidrológicos não se restringe apenas aos parâmetros, mas também aos dados e à adequação do modelo ao problema que está sendo analisado, de forma inter-relacionada.

Segundo Collischonn (2001), existem atualmente pelo menos duas formas de avaliar o problema da incerteza na determinação dos valores dos parâmetros, a primeira é a propagação das incertezas pelo método GLUE, que consiste basicamente na avaliação de muitos conjuntos de parâmetros na aplicação do modelo hidrológico; já a segunda forma consiste em analisar o problema sob a ótica da calibração multi-objetivo, buscando reproduzir o procedimento normal durante a calibração manual.

3.3.3 – Sistemas de Informações Geográficas Integrados a Modelos Hidrológicos

Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são definidos por Silva (2007) como aqueles que mostram e analisam a territorialidade dos fenômenos neles representados. O autor comenta que a grande utilização desses sistemas para a representação de ambientes se deve à capacidade que possuem de considerar, de forma integrada, a variabilidade de classificação, a expressão territorial e as alterações temporais verificáveis em uma base de dados georreferenciada.

Segundo Ramirez e Souza (2007), os sistemas de informações geográficas podem ser utilizados para as mais diversas finalidades, como: planejamento do uso do solo, monitoramento ambiental, monitoramento de safras agrícolas, tomadas de decisões em prospecção mineral, como banco de dados geográficos, dentre outros.

Nas décadas de 1960 e 1970, os modelos hidrológicos e os SIG desenvolveram-se por caminhos que não se cruzavam; somente no fim dos anos 80 que os hidrólogos geraram uma demanda pela representação digital do terreno e em parceria com a comunidade SIG iniciaram o processo de integração que vem gerando avanços e benefícios mútuos (Sui e Maggio, 1999).

Os mesmo autores discorrem sobre quatro possibilidades de integração entre sistemas de informações geográficas e modelos hidrológicos, como pode ser visto na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Possibilidades de integração e suas caracterizações (Adaptado de Sui e Maggio, 1999).

Integrações	Características	Exemplos
SIG embutido no modelo hidrológico	Adotado quando as funções do pacote SIG são utilizadas somente como ferramentas de mapeamento e são conceitualmente irrelevantes para o modelo.	RiverCAD, HEC-RAS 2.0, RiverTools e MODFLOW
Modelo hidrológico embutido no SIG	Possui grande capacidade de realizar as funcionalidades de um SIG, porém, suas capacidades de modelagem hidrológicas são bem reduzidas.	ArcGrid, Integrgraph's InRoads
Fraco acoplamento	Sempre envolve um pacote SIG padrão e um modelo hidrológico/hidráulico ou um pacote estatístico. Os dados são transferidos entre os pacotes nos formatos ASCII ou binário sem uma interface comum.	HEC-1, HEC-2, SPSS , e SAS.
Forte acoplamento	Programação convencional ou macros que fazem a modelação hidrológica são embutidos na estrutura do pacote SIG, porém programas mais sofisticados não são capazes de ser implementados dessa forma.	ESRI's Avenue e AML

Ogden *at al.* (2001) apresentam as características e funcionalidade de alguns *softwares* utilizados como módulos SIG para processamento de dados hidrológicos e também alguns modelos hidrológicos distribuídos. Os autores apontaram a melhoria da precisão, a diminuição do erro nos dados de entrada, a facilidade de armazenamento de mapas e uma maior flexibilidade de uso como vantagens obtidas ao integrar os dois tipos de programas.

Sui e Maggio (1999) encontraram uma grande quantidade de estudos empíricos que fazem a integração de SIG e modelos hidrológicos e afirmaram que esses apresentam problemas conceituais por muitos dos trabalhos fazerem a integração utilizando modelos concentrados e assim o uso do SIG não melhoraria a fundamentação teórica dos mesmos. Eles também revisaram as possibilidades futuras da utilização de modelos hidrológicos com base SIG e concluíram que a integração dessas duas ferramentas deve continuar com a incorporação de conceitos multidimensionais de espaço, tempo e escala.

3.3.4 – Principais Modelos Hidrológicos e de Qualidade de Água de Domínio Público

A quantidade e qualidade dos modelos hidrológicos que utilizam sistemas de informações geográficas para auxiliar na produção de dados de entrada vêm crescendo em paralelo com o desenvolvimento da informática. Diversos modelos de domínio público estão em constante desenvolvimento há vários anos e por isso têm se tornado os mais confiáveis e

mais utilizados por pessoas ligadas a essa área de conhecimento. Alguns desses modelos serão analisados nos tópicos que se seguem.

3.3.4.1 – AGNPS (Agricultural Non-Point Source)

O modelo AGNPS foi desenvolvido ARS (*Agricultural Research Service*) do USDA (*United States Department of Agriculture*) em cooperação com a Agência de Controle de Poluição de Minnesota e o SCS (*Soil Conservation Service*). Tem o objetivo de analisar e estimar a qualidade da água escoada em áreas rurais com tamanho variando entre poucos até acima de 20.000 hectares. O modelo simula escoamento superficial, transporte de sedimentos e nutrientes de bacias rurais. Os nutrientes considerados são o fósforo e o nitrogênio, que são essenciais para as plantas e maiores responsáveis pela poluição superficial. Adicionalmente, o AGNPS considera as fontes pontuais de nutrientes, sedimentos e DQO (Young *et al.* 1989).

O AGNPS opera com a subdivisão da bacia em células quadradas uniformes que podem ser analisadas em qualquer ponto da bacia e quanto menor a área drenada menor deve ser o tamanho da célula. O Modelo é composto basicamente por módulos para o ciclo hidrológico, erosão, transporte de sedimentos e nutrientes. O AGNPS já está em sua quinta versão e incorporou diversas melhorias em seu escopo inclusive um módulo de cálculo de análise de risco (Young *et al.* 1989).

Young *et al.* (1989) apresentam as principais equações que regem esse modelo bem como os 22 possíveis dados de entrada e os 19 resultados que podem ser obtidos com a simulação. Discorrem também sobre os resultados realísticos obtidos com testes em 20 bacias dos Estados Unidos e mais duas simulações em áreas críticas do mesmo país.

Souto e Crestana (2000) utilizaram o modelo AGNPS para identificar áreas potenciais de poluição não pontual e avaliar práticas conservacionistas de solo em uma microbacia do estado do Paraná. Após fazer quatro simulações em diferentes épocas os autores chegaram à identificação das áreas com potencial para produção de sedimentos e dos percentuais gerados relacionados a cobertura do solo, comprimento do declive e declividade. Para tal também conseguiram verificar a influência das modificações das técnicas de cultivo na redução da produção de sedimentos.

Cho *et al.* (2008) aplicaram o modelo em duas pequenas bacias rurais da Coréia empregando em uma a inclinação irregular nas células para as florestas. Foi utilizado o *software* GRASS (*Geographic Resources Analysis Support System*) como ambiente SIG e realizaram a simulação com o modelo encontrando resultados satisfatórios para reprodução da hidrologia nas duas bacias. No entanto, a simulação da produção de sedimentos foi subestimada para a calibração e superestimada para a validação. Ao compararem a metodologia de modificação da célula com o padrão normal do modelo percebeu-se que o volume escoado superficialmente foi maior e o pico do fluxo foi menor, sendo considerado um resultado mais satisfatório.

3.3.4.2 – ANSWERS (Areal Non point Source Watershed Environment Response Simulation)

O ANSWERS é um modelo de base física, orientado para eventos, com parâmetros distribuídos em escala de bacia e trabalha dividindo a bacia hidrológica em células. Foi desenvolvido para simular a influência das práticas de gerenciamento de bacia no escoamento superficial e produção de sedimentos. A estrutura do modelo é composta por módulos para o ciclo hidrológico, separação e transporte de sedimentos bem como para outros componentes necessários para descrever o movimento da água no escoamento superficial, na sub-superfície e nos cursos de água (Singh *et al.*, 2006).

Segundo Garrido (2003), o modelo ANSWERS não possuía, inicialmente, nenhuma integração com ambiente SIG, porém, as últimas versões do mesmo passaram a utilizar o GRASS como ambiente de entrada das informações espacialmente distribuídas, com a mesma base original.

Singh *et al.*(2006) utilizaram o ANSWERS para modelar uma pequena bacia hidrográfica, com aproximadamente 16,13 km², no leste da Índia. O modelo foi calibrado com o uso de dezesseis tempestades entre 1993 e 1994 e foi validado com quinze entre 1995 e 1996, os resultados obtidos foram considerados bastante satisfatórios e revelaram que o modelo pode ser aplicado em outras bacias indianas com características similares.

3.3.4.3 –HEC-HMS (Hydrologic Modeling System)

Segundo Scharffenberg e Fleming (2006), o HEC-HMS foi desenvolvido para simular os processos de precipitação-escoamento em bacias com sistemas dendríticos e tem a capacidade de representar diferentes bacias hidrográficas podendo ser aplicado para simulação do suprimento de água e da hidrologia de cheias em bacias de grandes rios até a simulação do escoamento em pequenas bacias urbanas ou naturais. Os autores comentam que no programa constrói-se um modelo conceitual da bacia por meio da separação do ciclo hidrológico em partes controláveis e definição dos contornos da bacia de interesse.

Ford *et al.* (2002) afirmam que o HEC-HMS é um modelo numérico que inclui uma grande quantidade de métodos para simulação de bacias, canais e comportamento de estruturas de controle da água, podendo assim prever fluxo, posição e tempo. Nesse estudo os autores sumarizam os 34 possíveis métodos de simulação que estão divididos em 6 categorias e podem ser utilizados para simulação com o *software* em questão.

Knebl *et al.* (2005) desenvolveram um sistema para modelagem em escala regional que integra dados de precipitação estimados pelo NEXRAD nível III, SIG e o modelo hidrológico HEC-HMS/RAS. O estudo foi feito na bacia do rio Santo Antonio, centro do Texas-EUA, com cerca de 10.000 km² e com freqüentes ocorrências de enchentes em um curto período de tempo. Segundo os autores, a simulação com o HEC-HMS utilizou um grid de 4X4 km e parâmetros calibrados manualmente para 12 sub-bacias. O resultado final foi um modelo com capacidade de executar estudos hidrológicos em escala regional e também servir como um sistema de alerta regional para mitigação do perigo.

3.3.4.4 –KINEROS2 (Kinematic Runoff and Erosion Model)

Segundo Semmens *et al.* (2005), o KINEROS2 é um modelo distribuído, de base física que descreve os processos de interceptação, infiltração, escoamento superficial e erosão em bacias hidrográficas caracterizadas por predominância de escoamento superficial. O modelo foi criado no final da década de 1960 pelo ARS (*Agricultural Research Service*) do USDA (*United States Department of Agriculture*) e o SWRC (*Southwest Watershed Research Center*).

Ainda de acordo com Semmens *et al.* (2005), o modelo representa a bacia como uma cascata de planos e canais nos quais o fluxo é simulado utilizando diferenças finitas para solução das equações unidimensionais de onda cinemática. Os autores também comentam sobre a integração com a interface em base SIG, *Automated Geospacial Watershed Assessment* – AGWA, apropriado para análises da bacia fundamentadas em informações do terreno que podem ser utilizadas como dados de entrada no modelo além de também ser eficiente para visualização do ambiente e resultados do modelo. Semmens *et al.* (2005) apresentam uma descrição detalhada do modelo KINEROS2 bem como da interface SIG AGWA.

Segundo Scott *et al.* (2006) a ferramenta multiuso AGWA tem como objetivos: 1) Prover um método simples, direto e repetível para parametrização de modelo hidrológico; 2) Utilização básica de dados GIS; 3) Compatibilização com outros softwares de análise geoespacial de bacia; 4) utilização de cenário de desenvolvimento e alternativas futuras de simulação em múltiplas escalas

Santos *et al.* (2007) utilizaram o modelo KINEROS2 para estimar a produção de sedimentos na bacia experimental Jatobá, localizada na região semi-árida do estado de Pernambuco. Para isso utilizaram parâmetros físicos do solo, já calibrados em uma bacia localizada em uma mesma área com características hidrológicas homogêneas. Como forma de comparação os autores dividiram a bacia em planos e canais com técnicas de discretização convencionais e por técnicas automatizadas utilizando o AGWA e encontraram um resultado de perda de solo similares para as duas simulações e com valores considerados baixos.

Lopes (2003) utilizou o KINEROS2 em bacias representativas da Paraíba, que variavam de 100 a 140 km², com o objetivo de analisar o efeito de escala sobre os parâmetros do modelo. Os resultados encontrados mostraram que os parâmetros principais, potencial efetivo de capilaridade (G) e o relativo à erosão por impacto das gotas de chuva (c_f) sofrem com o efeito de escala.

3.3.4.5 –SWAT (Soil and Water Assessment Tool)

O modelo SWAT foi elaborado pelo ARS (*Agricultural Research Service*) do USDA (*United States Department of Agriculture*) com a cooperação da Universidade A&M do Texas e diversas agências federais. Esse modelo foi desenvolvido para simular o impacto das práticas de manejo do solo sobre a água, os sedimentos e na produção química da agricultura em bacias grandes e complexas com grande variabilidade de uso do solo e das condições do manejo por um longo período de tempo (Arnold *et al.*, 1998; Neitsch *et al.*, 2005).

Neitsch *et al.* (2005) e Roloff *et al.* (2007) afirmam que o SWAT tem sua origem no modelo CREAMS (*Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*), que simula o impacto do manejo da terra sobre deflúvio, sedimento, nutrientes e agrotóxicos. A esse modelo se adicionou uma expansão do modelo para permitir a computação simultânea em diversas sub-bacias para estimar a saída de água da mesma, um módulo para água subterrânea, um módulo para reservatório, um simulador climático, aprimoramento no cálculo da taxa máxima de escoamento, adição do modelo EPIC (*Erosion-Productivity Impact Calculator*) para considerar as variações sazonais da cobertura do solo, módulo para propagação de cheias, incorporação de algoritmos para transporte de sedimentos através de tanques, reservatórios, rios e vales, adição do cálculo de perdas de água por transmissão e incorporação dos algoritmos do GLEAMS (*Groundwater Loadind Effects on Agricultural Management Systems*) que trata do destino dos agrotóxicos e de novas equações para produção de sedimentos. Com esses aprimoramentos o programa passou a se chamar SWRRB (*Simulator for Water Resources in Rural Basins*). A próxima etapa cronológica foi a junção ao *software* ROTO (*Routing Outputs to Outlets*) que fazia o caminhamento dos produtos de saída do SWRRB através de canais e reservatórios. Dessa junção gerou-se o SWAT que evoluiu com a incorporação de módulos e algoritmos como o do modelo QUAL2E e hoje já está em sua versão 2005.

Segundo Ogden *et al.* (2001), entre os componentes desse modelo estão incluídos ciclo hidrológico, clima, transporte de sedimentos, nutrientes e pesticidas, temperatura do solo, desenvolvimento de culturas e manejo agrícola. Os autores afirmam que o modelo apresenta interface com os SIG's GRASS e ArcView além de ter sido incorporado à

interface BASINS (*Better Assessment Science Integrating Point & Nonpoint Sources*) que é um ambiente desenvolvido em ArcView para permitir que as agências reguladoras tenham capacidade de analisar rapidamente os problemas de qualidade da água.

O SWAT simula o escoamento superficial para chuva diária através do método do número da curva do SCS (*Soil Conservation Service*). A produção de sedimentos para cada sub-bacia é computada por meio da forma modificada da equação universal de perda do solo. O modelo permite computação simultânea em cada sub-bacia e condução da água, sedimentos e nutrientes provenientes do exutório de cada sub-bacia para o da bacia (Tripathi *et al.*, 2003).

Garrido (2003) aplicou o SWAT à bacia do rio Jiquiriçá, no estado da Bahia, com cerca de 6900 km². Foram realizadas simulações diárias para o aspecto quantitativo e os resultados demonstraram vazões ajustadas próximas das observadas para os meses secos e superestimadas nos meses chuvosos. Por isso, a autora afirma que é preciso uma melhor avaliação da distribuição espacial e temporal da chuva, bem como da variação temporal da vazão. Em relação ao modelo SWAT o trabalho discorre sobre a discrepância entre a dificuldade de encontrar, no Brasil, informações necessárias para utilização no modelo e a facilidade de obter esses dados no país desenvolvedor do modelo, os Estados Unidos.

Tripathi *et al.* (2003) utilizaram o SWAT para identificar e priorizar sub-bacias críticas para o gerenciamento da conservação do solo. A simulação foi feita para uma pequena bacia, com 92,46 km², localizada na Índia e utilizada para o propósito citado. Como resultado foram identificadas as sub-bacias que apresentaram situações críticas para descarga de água, produção de sedimentos e nutrientes para uma posterior priorização em um plano de gerenciamento objetivando a redução desses valores. Os autores afirmam que o estudo confirmou a capacidade do modelo SWAT em simular escoamento superficial, produção de sedimento e perda de nutrientes particularmente para pequenas bacias hidrográficas.

Eckhardt e Arnold (2001) propuseram uma forma de calibração automática para a versão SWAT-G do modelo SWAT, versão essa que faz uma modificação no cálculo da percolação e do fluxo lateral. A calibração é realizada por meio de um algoritmo de otimização estocástica global, conhecido como SCE (*Shuffled Complex Evolution*). Os

autores testaram a nova versão em uma bacia na Alemanha, com aproximadamente 81 km², com dados já estabelecidos e o resultado foi positivo, levando os autores a afirmarem que modelos hidrológicos distribuídos tão complexos quanto o SWAT podem ser calibrados automaticamente com sucesso.

Green e van Griensven (2008) também propuseram a utilização da calibração automática com análise de sensibilidade, que é um módulo embutido na versão 2005 do modelo SWAT, em seis pequenas bacias hidrográficas nos Estados Unidos. Os autores fizeram simulações com a calibração manual, mista (automática e manual) e automática e concluíram que os resultados obtidos através da calibração mista foram mais adequados para essas pequenas bacias.

3.4 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Distrito Federal está situado no Planalto Central do Brasil, dentro de um quadrilátero de 5.814 km², limitado ao norte pelo paralelo 15°30'S, ao sul pelo paralelo 16°03'S, a leste pelo rio Preto e a oeste pelo rio Descoberto que, segundo Carvalho (2004), é o principal curso d'água da bacia homônima e a maior parte de sua extensão está situada nas divisas entre o Distrito Federal e o Estado de Goiás.

O lago do Descoberto, formado pelo represamento do próprio rio Descoberto, é utilizado para fins de abastecimento de água em diversas cidades do DF, como Ceilândia, Taguatinga, Guará, Gama, Plano Piloto e outros núcleos urbanos. Os principais cursos de água afluentes ao lago são: o rio Descoberto, o ribeirão das Pedras, o ribeirão Rodeador e os córregos Chapadinha, Capão Comprido e Pulador. É um dos principais mananciais produtores do Distrito Federal, com capacidade estimada de suprimento de até 6 m³/s o que representa cerca de 2/3 da demanda global da unidade federativa em questão (Campana *et al.*, 1998).

A sub-bacia do Capão Comprido, apresentada na Figura 3.6, possui uma área aproximada de 16,40 km², localizando-se entre as latitudes 15°43'42"S e 15°45'41"S e as longitudes 48°10'07"W e 48°06'13"W. As cotas altimétricas variam de 1030 a 1270 metros e que a agricultura se destaca como uma das principais atividades da economia local (Fernandes, 2005).

Reatto *et al.* (2003b) realizaram estudo a cerca dos tipos de solo na bacia do lago Descoberto. Na sub-bacia do Capão Comprido pode-se perceber a predominância do latossolo vermelho (Figura 3.7). Reatto *et al.* (2003a) afirmam que esses são solos minerais não hidromórficos, profundos, apresentando horizonte B espesso, estruturas predominantes maciças ou em blocos subangulares ou em forma muito pequena granular, textura variando de média a argilosa, acentuadamente drenados e com alta permeabilidade. Esse solo é resultado de um alto grau de intemperismo formando uma estrutura bastante porosa, com alto índice de vazios e por consequência um baixo peso específico (Bicalho, 2006).

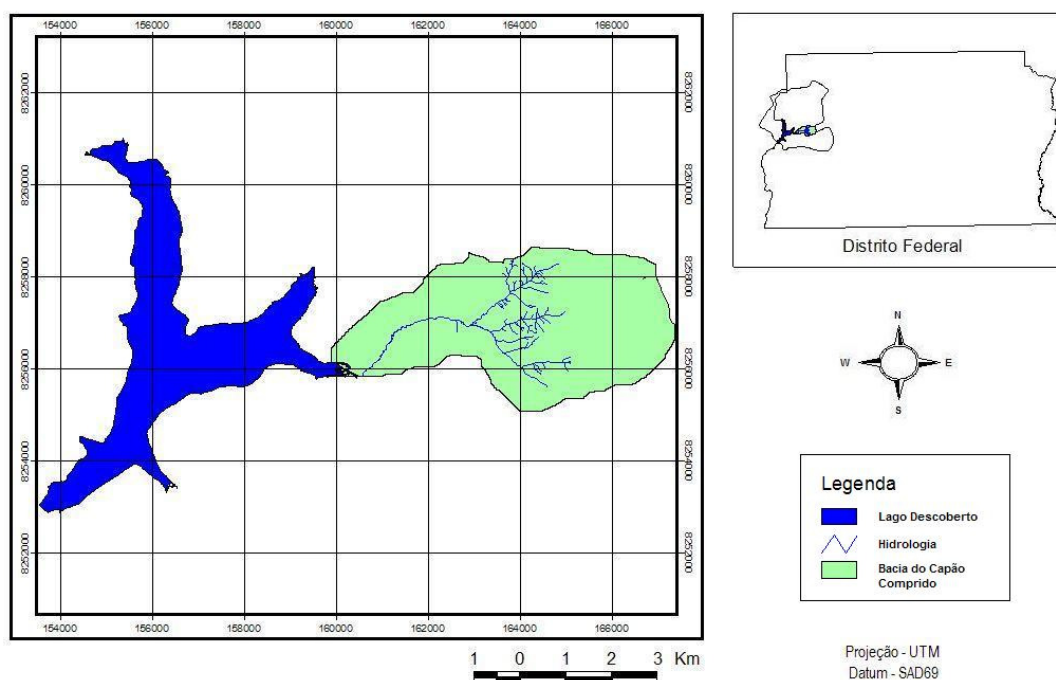


Figura 3.6 - Inserção da bacia do Capão Comprido no Distrito Federal.

Nascimento *et al.* (2000) afirmam que o clima na região caracteriza-se pela existência de duas estações bem definidas: uma chuvosa e quente, que se prolonga de outubro a abril, e outra, fria e seca, de maio a setembro. Novembro, dezembro e janeiro são os meses com maior índice pluviométrico e junho, julho e agosto com menor.

CODEPLAN (1984) utilizou a classificação de *Köppen* em todo o Distrito Federal e analisando esse estudo verificou-se que os tipos climáticos Tropical de altitude (Cwa) e Tropical de altitude (Cwb) são os dois que podem identificar o clima na sub-bacia. O tipo

Cwa se caracteriza pelas temperaturas inferiores a 18°C no mês mais frio, uma média superior aos 22°C no mês mais quente e, nesse caso, altitudes entre 1000 e 1200 metros. O tipo Cwb se caracteriza pela mesma faixa de temperatura para o mês mais frio, porém com média inferior a 22°C no mês mais quente e, nesse caso, cotas altimétricas superiores a 1200 metros (Lima, 2003).

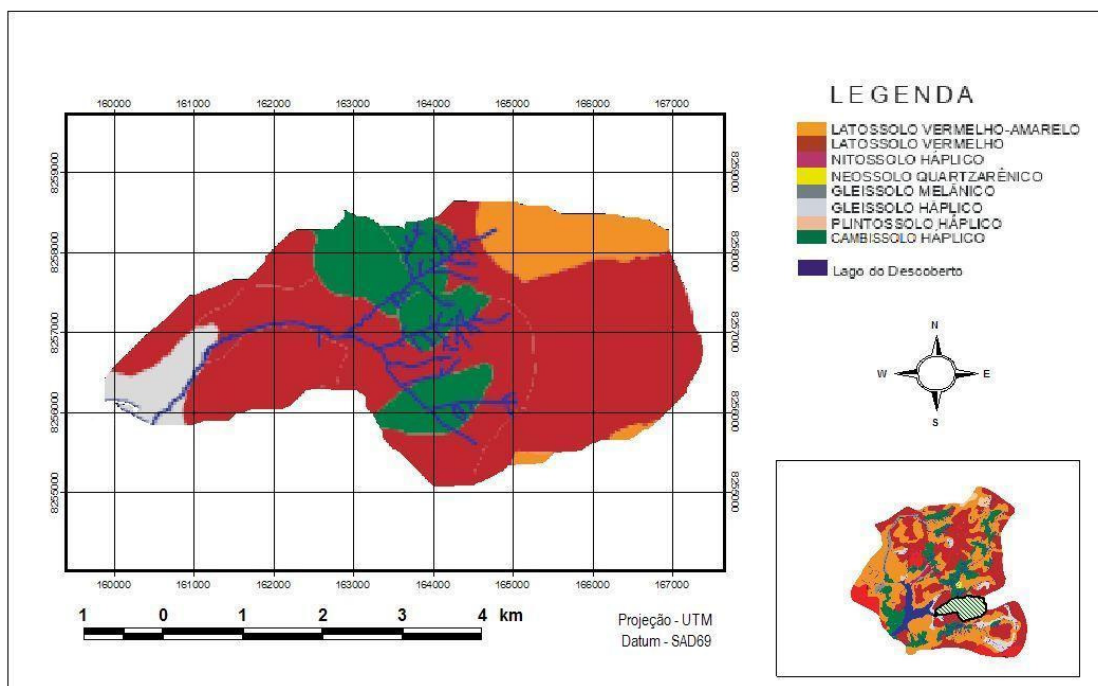


Figura 3.7 – Caracterização do solo na bacia do Capão Comprido (Adaptado de Reatto *et al.*, 2003a)

A sub-bacia em questão está dentro da área de abrangência do Projeto Integrado de Colonização Alexandre Gusmão, que foi criado com o objetivo de abastecer o Distrito Federal com frutas, legumes e verduras, devendo-se tratar, portanto, de uma bacia com características predominantemente rurais, sendo explorada com agricultura e pecuária em pequenas propriedades. A olericultura e, em menor escala, a fruticultura são à base da produção agrícola local (Nascimento *et al.*, 2000).

Fernandes (2005) afirma que além das atividades agrícolas como o cultivo de alface, brócolis, couve, coentro, cebolinha, rúcula, vagem, berinjela, tomate, etc., a cobertura do solo é composta também por mata ciliar, reflorestamento e remanescentes de vegetação do cerrado, representados por fisionomias de campo limpo, de campo cerrado e de cerrado.

Segundo Bicalho (2006) a sub-bacia do Capão Comprido apresenta carga de sedimento em suspensão mais elevada do que outras sub-bacias com características semelhantes, como o Chapadinha, com valores descarga de sedimentos em suspensão específica da ordem de 26 t/km².ano.

Fragoso (2008) indica que a rede de monitoramento da bacia do Córrego do Capão Comprido foi formada por 4 pluviógrafos, 4 linigráfos e uma estação meteorológica, instalados em julho de 2006. A escolha da localização dos pontos de monitoramento levou em consideração principalmente a segurança dos equipamentos, a facilidade de acesso e a divisão da bacia em sub-bacias.

3.4.1 – Estudo para elaboração de Curva-Chave de Vazão para a bacia

Fragoso (2008) elaborou uma proposição de curva-chave de vazão para o Capão Comprido e a autora afirma que a melhor foi obtida pela linha de tendência no formato potencial com um coeficiente de determinação (R²) igual a 0,8134, que pode ser descrita pela equação $Q = 0,03.x^{5,6147}$. No estudo se afirma que não foi possível coletar informações em altas vazões.

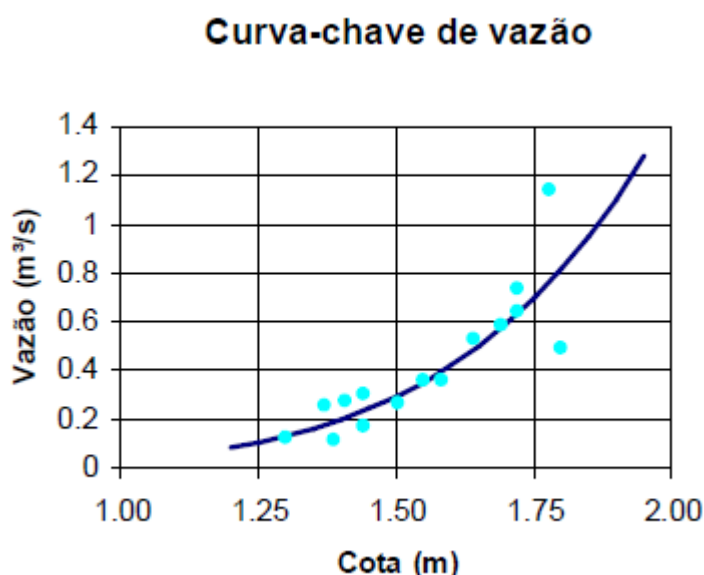


Figura 3.8 – Curva-Chave de vazão elaborada por Fragoso (2008).

3.4.2 – Estudo para elaboração de Curva-Chave de Sedimento para a bacia

Em seu estudo Bicalho (2006) elaborou curva-chave de sedimento para o Capão Comprido e afirmou que a melhor curva foi obtida pela linha de tendência no formato potencial com um R^2 igual a 0,92, que pode ser descrita pela equação $Q_{ss} = 7,5004 \cdot x^{2,28}$. Outra afirmação importante que a autora faz é que só foi possível coletar poucos dados e esses sempre foram em momentos de estiagem e por esse motivo a curva é restrita a vazões entre 0,07 e 0,309 m^3/s .

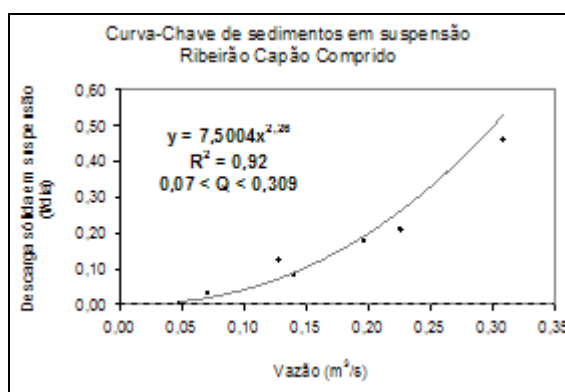


Figura 3.9 – Curva-Chave de sedimento elaborada por Bicalho (2006).

4 – MODELO UTILIZADO NA PESQUISA

Por se tratar de uma bacia com apenas 16,40 km^2 de área, e por se buscarem resultados acerca da hidrossedimentologia, o modelo escolhido para utilizar nessa pesquisa foi o KINEROS2 (Smith *et al.*, 1995 e Goodrich *et al.*, 2002), que é amplamente indicado para análises em pequenas bacias e possui uma robusta formulação para o transporte de sedimentos. O modelo KINEROS2 está presente na ferramenta computacional *Automated Geospatial Watershed Assessment* (AGWA), que é uma extensão do *software Arcview*, desenvolvida pelo *U. S. Agricultural Research Service's Southwest Watershed Resource Center*. Segundo Scott *et al.* (2006), por utilizar como dados de entrada, Modelo Digital de Elevação (MDE), *grid* de Cobertura do Solo, dados de solo e de precipitação, o KINEROS2 integrado ao AGWA torna-se uma ferramenta de mais simples implementação.

O KINEROS2 se caracteriza por ser um modelo hidrossedimentológico, físico, distribuído, orientado a evento, que representa a bacia como uma cascata de planos e de canais e simula os processos de infiltração, escoamento superficial e erosão do solo.

4.1 – MODELO KINEROS2

Em um breve histórico Semmens *et al.* (2005) comentam que o modelo KINEROS2 foi criado, como já foi dito no capítulo anterior, no fim da década de 1960, como um modelo que representava o escoamento superficial através de uma cascata unidimensional de planos que contribuía lateralmente para os canais. Em 1977 foi acoplado ao modelo um módulo de infiltração e passou a chamar-se KINGEN. Após uma quantidade significativa de validações utilizando dados experimentais, este modelo foi modificado para incluir módulos de erosão, transporte de sedimentos e um grande número de aprimoramentos que resultaram no modelo de nome KINEROS que foi lançado em 1990. Com o passar do tempo mais aprimoramentos foram incorporados ao modelo e o mesmo adquiriu uma estrutura mais robusta passando agora a se chamar KINEROS2, que é um programa de código aberto, distribuído gratuitamente na internet e que abaixo é descrito em detalhes, baseando-se nas publicações de Woolhiser *et al.* (1990), Lopes (2003), Semmens *et al.* (2005) e Miller *et al.* (2007).

4.1.1 – Modelo Conceitual

No KINEROS2 a bacia hidrográfica é modelada conceitualmente, como uma coleção de elementos espacialmente distribuídos, que podem ser de diversos tipos. Na tabela 4.1 estão apresentados os elementos citados e seus atributos.

Tabela 4.1 – Elementos e características presentes no KINEROS2 (Semmens *et al.*, 2005).

Tipos de Elementos	Características
Escoamento Superficial	Representados por elementos planos, retangulares, distribuídos em cascata, com diferentes tamanhos, inclinações e parâmetros.
Escoamento Urbano	Representado pela composição de 6 áreas de escoamento superficial que podem ser classificadas, independentemente, como penetráveis ou não.
Canais	Representado em formato simples ou trapezoidal composto.
Estruturas de Detenção	Podem ser representadas por reservatórios, trincheiras ou outra estrutura de medição do fluxo com armazenamento de água. Essa situação é descrita por uma taxa definida pelo usuário e pela equação de balanço de massa.
Tubulação	No ambiente urbano, condutos circulares podem ser utilizados para representar o esgoto produzido nas tempestades. A relação mais utilizada para representar o fluxo em tubos é a fórmula de Darcy-Weisbach, que no algoritmo do KINEROS2 utiliza os pressupostos da onda cinemática.
Injecção	Fornecer recursos necessários para se introduzir dados de água e sedimentos provenientes de fontes outras que não o escoamento derivado da chuva ou o fluxo de base

4.1.2 – Representação dos processos

4.1.2.1 – Infiltração

No início de uma tempestade a taxa de infiltração é igual à de chuva e a precipitação excedente é igual a zero. Durante este período, o solo pode absorver uma quantidade de água superior a que é produzida pela chuva. A taxa máxima na qual, a água pode penetrar no solo é chamada de capacidade de infiltração (f_c).

A capacidade de infiltração é representada utilizando o método 3-parâmetros de Parlange, no qual, o método de Green-Ampt e o de Smith-Parlange são incluídos como limitantes. A equação 4.1 representa esse método que tem a condutividade hidráulica saturada efetiva K_s (m/s) e o valor efetivo do potencial de capilaridade G (m) como parâmetros básicos e em adição a esses se tem um terceiro parâmetro ligado a escala (Semmens *et al.*, 2005).

$$f_c = K_s \left[1 + \frac{\gamma}{\exp\left(\frac{\gamma}{G\Delta\theta_i}\right) - 1} \right] \quad 4.1$$

Por representar o tipo de solo, a variável γ , se aproxima de 0 para uma areia e a equação 4.1 aproxima-se da formulação de Green-Ampt; quando γ se torna próximo de 1 para um

solo franco bem uniforme, a equação 4.1 representa a equação de Smith-Parlange. O valor da variável γ adotado no modelo é 0,85, já que, a maioria dos tipos de solo é melhor representado pelo mesmo (Smith *et al.*, 1993). As outras variáveis presentes na equação são a lâmina acumulada de infiltração (I), porosidade do solo (θ).

O valor efetivo do potencial de capilaridade (G) é dado pela expressão abaixo:

$$G = \int_{-\infty}^0 \frac{K(\Psi)}{K_s} d\Psi \quad 4.2$$

onde ψ representa o potencial mátrico do solo em metros.

É levado em consideração, no modelo, a variabilidade espacial em pequena escala através da incorporação do coeficiente de variação da condutividade hidráulica saturada efetiva (K_s). Smith e Goodrich (2000) simularam conjuntos de pontos de infiltração distribuídos e elaboraram a equação 4.3 para infiltrabilidade que descreve muito bem o comportamento do conjunto. Também se considera a situação de um solo com duas camadas diferentes, onde cada uma possui características diferentes e o modelo tem a capacidade de representá-las.

$$f_{e^*} = 1 + (r_{e^*} - 1) \left\{ 1 + \left[\frac{(r_{e^*} - 1)}{\gamma} (e^{\gamma r_{e^*}} - 1) \right]^c \right\}^{-1/c}, r_{e^*} > 1 \quad 4.3$$

Nessa função f_{e^*} e r_{e^*} representam a infiltrabilidade e a taxa de precipitação no conjunto efetivo assintótico do valor K_s .

Semmens *et al.* (2005) afirma que o KINEROS2 tenta modelar todos os casos de uma maneira realista, incluindo a redistribuição da água no solo durante períodos que o precipitado é menor que o K_s e assim o escoamento não é gerado pela chuva. Segundo Lopes (2003) a equação utilizada no modelo para o cálculo da variação da umidade do solo nestes períodos é:

$$\frac{d\theta_0}{dt} = \frac{\Delta\theta_{i0}}{I} \left[r - K_i - \left(K(\theta_0) + \frac{\beta p K_s \Delta\theta_{i0} G(\theta_i, \theta_0)}{I} \right) \right] \quad 4.4$$

onde:

$\Delta\theta_{10} = \theta_0 - \theta_i$ é a diferença entre a 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, que pode ser menor que K_s , negativa ou zero;

β é um fator de forma igual a
$$\frac{1}{Z(\theta_0 - \theta_i)} \int_0^z (\theta - \theta_i) dz = 0,85$$

Z é a profundidade da frente de molhamento;

p é o fator efetivo de profundidade ($p = 2$ para $r = 0$, $p = 1,5$ para $0 < r < K_s$, $p = 3$ para $r < 0$);

$G(\theta_i, \theta_0)$ é o calor efetivo do potencial de capilaridade na frente de redistribuição de água (m).

4.1.2.2 – Chuva

É modelada de forma espacial e uniforme para cada elemento, mas pode vir a variar entre os mesmos se houver mais de uma medição de precipitação. A variação espacial e temporal é expressa pela interpolação dos locais de medição da chuva para cada plano, reservatório de água ou elemento urbano.

O interpolador tenta encontrar as três medições de chuva mais próximas que envolvam as coordenadas do elemento, caso essa configuração não exista, será feita a busca por dois pontos de medição mais próximos e que envolvam o elemento com duas linhas paralelas originárias desses pontos. Para o caso de haver apenas um local de medição próximo ao elemento, apenas este será utilizado.

Uma vez que a configuração foi determinada e os coeficientes de interpolação espacial foram computados, é feita uma série estendida com a união de todos os limites impostos pelas medições. Se a saturação inicial do solo for especificada no arquivo de chuva, ela será interpolada utilizando os mesmos coeficientes de interpolação espacial.

4.1.2.3 – Interceptação

Os efeitos da interceptação são controlados por dois parâmetros: a altura interceptada e a fração da superfície que é coberta por vegetação. Esses parâmetros em conjunto refletem a média de chuva retida por um tipo de vegetação particular ou uma mistura de tipos existente na superfície.

4.1.2.4 – Escoamento Superficial

A precipitação pode produzir acúmulo superficial de água de duas maneiras, a primeira envolve a taxa de chuva que excede a infiltrabilidade do solo na superfície e tem como característica a pressão hidrostática da água presente na superfície do solo não é maior que a profundidade da água e decresce com o aumento da profundidade. Já a segunda ocorre quando a camada mais profunda do solo restringe o fluxo descendente e assim acontece o preenchimento da porosidade disponível da camada superficial, esse mecanismo tem por característica o aumento da pressão hidrostática com a profundidade até a chegada da camada restritiva.

Analisando em uma escala muito pequena, o escoamento superficial é um processo tridimensional extremamente complexo. Porém, em uma escala maior pode ser visto como um processo unidimensional descrito pela equação 4.5.

$$Q = \alpha h^m \quad 4.5$$

Onde Q é a descarga por unidade de largura e h é o volume de água armazenado por unidade de área. Os parâmetros α e m são relacionados à declividade, rugosidade da superfície e o regime de escoamento. A equação 4.5 é utilizada juntamente com a equação da continuidade:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x,t) \quad 4.6$$

onde t é o tempo, x é a distância ao longo do sentido da declividade e $q(x,t)$ é a taxa de entrada de fluxo lateral. Para modelar o escoamento superficial a equação 4.5 deve ser substituída na equação 4.6 para obter:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha m h^{m-1} \frac{\partial h}{\partial x} = q(x,t) \quad 4.7$$

As equações da onda cinemática são simplificações das equações de *Saint-Venant* e não preservam todas as propriedades das equações mais complexas, como a de remanso e a atenuação da onda difusa. Contudo o método cinemático é uma excelente aproximação para muitas condições do escoamento superficial.

O modelo oferece duas opções de α e m para a equação 4.7, a primeira é a lei da resistência hidráulica de *Manning*, apresentada na equação 4.8. Já a segunda é a lei de *Chezy* que pode ser visualizada na equação 4.9.

$$\alpha = 1,49 \frac{S^{\frac{1}{2}}}{n} \quad \text{e} \quad m = \frac{5}{3} \quad 4.8$$

$$\alpha = CS^{\frac{1}{2}} \quad \text{e} \quad m = \frac{3}{2} \quad 4.9$$

Onde S representa a declividade, n o coeficiente de rugosidade de *Manning* para escoamento superficial e o C o coeficiente de fricção de *Chezy*.

A profundidade de ou unidade de armazenamento na fronteira de montante deve ser especificado para resolver a equação 4.7. Se essa fronteira for um divisor de águas da bacia a condição de contorno será:

$$h(0, t) = 0 \quad 4.10$$

Se outro plano estiver contribuindo com fluxo a montante, a condição de contorno será:

$$h(0, t) = \left[\frac{\alpha_u h_u(L, t)^{m_u} W_u}{\alpha W} \right]^{\frac{1}{m}} \quad 4.11$$

onde os parâmetros com u subscrito referem-se a superfície de montante, W é a largura e L é o comprimento, α é a declividade/rugosidade e $h(L, t)$ é a profundidade no tempo t .

A microtopografia do relevo pode exercer um importante papel na determinação da forma do hidrograma (Woolhiser *et al.*, 1996). O efeito é mais pronunciado durante a recessão, quando a extensão do solo coberta pela água corrente determina a oportunidade para perda de água por infiltração. O modelo prevê o tratamento desse relevo assumindo que a

geometria do mesmo tem uma elevação máxima, e que a área coberta pela 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 (*spacing*) entre os picos e o valor médio (*relief*) dos picos nessa microtopografia (Lopes, 2003).

4.1.2.5 –Escoamento no Canal

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

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial A} = q_c(x, t) \quad 4.12$$

onde A é a área da seção transversal do canal, Q é a vazão do canal e $q_c(x, t)$ o fluxo lateral por unidade de comprimento do canal. Sobre o pressuposto cinemático, Q pode ser expresso como função de A e a equação 4.12 pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial A} \frac{\partial A}{\partial x} = q_c(x, t) \quad 4.13$$

A hipótese cinemática é baseada na relação entre vazão e área da seção transversal do canal é dada por:

$$Q = \alpha R^{m-1} A \quad 4.14$$

Em que, R é o raio hidráulico. Se a relação de *Chezy* estiver sendo usada, $\alpha = CS^{1/2}$ e $m=3/2$. Já se a que estiver em uso for a equação de *Manning*, $\alpha = 1,49S^{1/2}/n$ e $m=5/3$.

O modelo tem a capacidade de simular o escoamento através de canais com uma significativa quantidade de sedimento. Para isso é feita uma composição de canais que contém um algoritmo baseado em duas equações cinemáticas independentes, que são escritas em termos do mesmo *datum* para profundidade do fluxo. Um elemento de canal composto pode estar ligado a outro canal composto ou a um elemento de canal trapezoidal simples.

O KINEROS2 permite ao usuário especificar um fluxo de base constante no canal, através da adição de uma taxa fracionada em cada nó computacional ao longo do canal para alcançar o fluxo designado à jusante. Esta característica permite a simulação de inundações

que podem ocorrer pelo excesso da descarga de base existente, mas exige presciência de onde esses fluxos têm origem e qual a taxa.

Em regiões áridas e semi-áridas a infiltração no leito do canal pode afetar significativamente o volume escoado e o pico de descarga. No modelo, pode-se selecionar opção para infiltração no canal e assim a equação 4.3 é utilizada para calcular a infiltração acumulada para cada nó computacional, iniciando quando o fluxo de entrada lateral começa ou quando a frente avança até o nó computacional. Ao simplificar o canal como um formato trapezoidal introduz-se significativo erro na área do canal coberta por água em fluxo lento. A expressão empírica, apresentada abaixo, pode ser utilizada para estimar o perímetro molhado efetivo.

$$P_e = \min \left[\frac{h}{0,15\sqrt{BW}}, 1 \right] p_m \quad 4.15$$

Onde p_e é o perímetro molhado efetivo para a infiltração, h é a profundidade, BW é a largura inferior e p_m é o perímetro molhado do canal para uma profundidade h . A taxa de perda do canal é obtida através da multiplicação da taxa de infiltração pelo perímetro molhado efetivo.

As equações cinemáticas de fluxo para canais são resolvidas por uma técnica implícita de quatro pontos, similar a utilizada para o escoamento superficial, diferenciando-se que a área A é a incógnita e não a profundidade do fluxo h , e que as mudanças geométricas devido a variação da profundidade devem ser consideradas.

4.1.2.6 – Erosão e Produção de Sedimentos

Como recurso opcional o KINEROS2 é capaz de simular o movimento do solo erodido, além da circulação das águas superficiais. O modelo contabiliza separadamente a erosão causada pela impacto das gotas de chuva (*splash erosion*) e a causada pela água no fluxo (*hydraulic erosion*).

A equação geral utilizada para descrever a dinâmica dos sedimentos em qualquer ponto ao longo do percurso do fluxo superficial é a equação do Balanço de Massa, similar àquela adotada para o fluxo da água (Bennett, 1974):

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x,t) = q_s(x,t) \quad 4.16$$

onde C_s é a concentração de sedimento no fluxo, Q é a vazão hidráulica, A é a área da seção transversal do fluxo, e é a taxa de erosão do solo e q_s é a taxa de entrada lateral de sedimento no fluxo nos canais.

Para os planos, assume-se que a taxa de erosão (e) é composta por dois componentes principais: a produção de erosão provocada pelo impacto das gotas de chuva no solo, e pela erosão (ou deposição) hidráulica, resultado da interação entre a força de cisalhamento do fluxo e a tendência das partículas de solo se depositarem sob efeito da força da gravidade. A erosão resultante é o somatório da taxa de erosão provocada pelo impacto das gotas de chuva e_s e da erosão hidráulica e_h :

$$e = e_s + e_h \quad 4.17$$

Tomando como base evidências experimentais, a erosão por impacto das gotas de chuva pode ser aproximado como uma função do quadrado da taxa de precipitação (Meyer e Wischmeier, 1969). A seguir, a expressão utilizada no modelo para estimar esse tipo de erosão:

$$\begin{aligned} e_s &= c_f \exp^{-c_h h} r^2 & ; & \quad q > 0 \\ &= 0 & ; & \quad q < 0 \end{aligned} \quad 4.18$$

na qual r é a intensidade da precipitação (m/s), c_f é o coeficiente a ser determinado experimentalmente ou por calibração, e está relacionada as propriedades do solo e da superfície, $\exp^{-c_h h}$ é um fator que representa a redução na erosão por impacto das gotas de chuva devido ao aumento da profundidade da água. O parâmetro c_h representa a efetividade do amortecimento da superfície da água, fixado no modelo com o valor igual a 656 (Lopes, 2003).

A erosão hidráulica (e_h) representa a taxa de intercâmbio de sedimento entre o fluxo de água e o solo sobre o qual a mesma passa. A erosão hidráulica é estimada como sendo linearmente dependente da diferença entre a capacidade de transporte do fluxo (concentração de equilíbrio) e a concentração real de sedimento. Em outras palavras, erosão/deposição hidráulica é modelado como um processo de transferência cinética:

$$e_h = c_g (C_m - C_s) A \quad 4.19$$

onde C_m é a concentração de equilíbrio na capacidade de transporte, $C_s = C_s(x,t)$ é a concentração real de sedimentos local e c_g é um coeficiente da taxa de transferência de sedimento. Conceitualmente, quando a deposição ocorre, c_g é teoricamente igual a velocidade de queda das partículas dividido pela profundidade hidráulica (h). Para condições erosivas em solos coesivos, o valor de c_g pode ser reduzido e v_s/h é utilizado como um limite máximo para c_g .

Muitas formulações de capacidade de transporte têm sido propostas na literatura, mas a maior parte foi desenvolvida e testada para escoamento em locais relativamente profundos e levemente inclinados, tais como córregos e calhas. Um trabalho experimental desenvolvido por Govers (1990) e outros utilizaram fluxo raso para demonstrar que essa relação é similar a fórmula de capacidade de transporte proposta por Engelund e Hansen (1967).

O modelo KINEROS2 utiliza formulação proposta por Engelund e Hansen (1967) de forma modificada, para satisfazer os resultados obtidos na pesquisa de Govers (1990) e estender a sua aplicabilidade a fluxos rasos. Essa modificação é feita através da inclusão de um limite crítico do valor da potencia unitária do fluxo $\Omega = uS$ (*Unit Stream Power Threshold*) igual a 0,004 m/s, onde u é a velocidade do fluxo (m/s) e S é a declividade. Então, a equação utilizada no modelo, para o cálculo da concentração de sedimentos na capacidade de transporte é:

$$C_m = \frac{0,05}{d(S_s - 1)^2} \sqrt{\frac{Sh}{g} (\Omega - 0,004)} \quad 4.20$$

onde g é a aceleração da gravidade (m/s²), d é o diâmetro do sedimento (m), h é a profundidade do fluxo (m) e S_s é a densidade relativa do sedimento, igual a 2,65.

A velocidade de queda da partícula é calculada a partir do tamanho da partícula e da densidade, o modelo assume que as partículas têm características de arraste e queda de velocidade final semelhante às de esferas.

$$v_s^2 = \frac{4}{3} \frac{g(\rho_s - 1)d}{C_D} \quad 4.21$$

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

$$C_D = \frac{24}{R_n} + \frac{3}{\sqrt{R_n}} + 0,34 \quad 4.22$$

onde R_n é o número de Reynolds, definido como $R_n = v_s d / \nu$, em que ν (m²/s) é a viscosidade cinemática da água. A velocidade de queda da partícula é encontrada resolvendo simultaneamente as equações 4.21 e 4.22.

As equações 4.16 até 4.20 são resolvidas numericamente para cada passo de tempo utilizado pelas equações do fluxo superficial e por cada classe de tamanho da partícula. Um esquema de diferença finita de quatro pontos é utilizado, contudo, iteração não é necessária, uma vez que, é dado o valor atual e passado imediato para A e Q e valores prévios para C_s , a fórmula da diferença finita dessa equação é explicitada a seguir:

$$C_{sj+1}^{i+1} = f(C_{sj}^i, C_{sj+1}^i, C_{sj}^{i+1}) \quad 4.23$$

Lopes (2003) afirma que a simulação do transporte de sedimentos para os canais é realizada de maneira semelhante ao transporte de sedimentos nos planos. A principal diferença é que a erosão por impacto das gotas de chuva é desprezada, e o termo q_s torna-se importante para a representação da entrada de fluxo lateral.

5 – MATERIAIS E MÉTODOS

As curvas-chave de vazões e sedimentos em suspensão, a correlação entre turbidez e concentração de sedimentos, a comparação de resultados com estudos anteriores, o intervalo de tempo mínimo entre medições para encontrar uma correta carga de sedimentos transportados e outros produtos, foram obtidos realizando algumas das seguintes etapas:

- Trabalho de campo para coleta de amostras e de dados, no início de setembro/2008 ao fim de agosto/2009;
- Análise de laboratório das amostras coletadas para determinação dos valores de concentração;
- Análise e avaliação dos dados obtidos neste trabalho e em estudos anteriores.

- Estudos hidrológicos e hidrossedimentológicos.
- Análise dos resultados obtidos.

5.1 – TRABALHO DE CAMPO

A bacia do Capão Comprido vem sendo estudada pelo Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH/UnB) há alguns anos, como parte do projeto Hidrocer, que é uma parceria entre o programa e a EMBRAPA Cerrados, com financiamento da FINEP/CT-HIDRO. Por esse motivo já existe uma quantidade razoável de equipamentos instalados. A seguir serão descritos os equipamentos já existentes na área e os que foram instalados durante este trabalho.

5.1.1 – Rede de Monitoramento

No trabalho de Fragoso (2008) foram instalados na bacia do Capão Comprido, 4 estações fluviométricas, equipadas com régua linimétrica e linígrafo *Global Water*, 4 estações pluviográficas, com equipamentos da marca *Onset* e uma estação meteorológica. Porém a estação meteorológica foi afetada por queimadas e foi inviabilizada. Para medição de vazões e sedimentos, ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) e amostrador manual USDH-48 foram utilizados para o monitoramento na bacia.

Buscando melhorar a disponibilidade de dados na bacia de estudo foi instalada, em novembro de 2008, uma nova estação meteorológica SL2000-PNVn, da marca Solar Instrumentação, no mesmo local onde estava a antiga. Como as quatro estações pluviométricas estavam alinhadas buscou-se instalar mais dois pluviógrafos para ter uma representação espacial mais representativa da precipitação.

Por existir uma seção de controle localizada próxima ao exutório da bacia, a mesma foi destacada para esse estudo e os esforços foram concentrados nessa seção. No mês de novembro de 2008 iniciaram-se medições com amostrador automático ISCO, utilizado em eventos, já que a área não apresentava segurança nem estrutura para o equipamento ser fixado. Em janeiro de 2009 o turbidímetro com registrador SL2000-TS foi instalado na seção de controle.

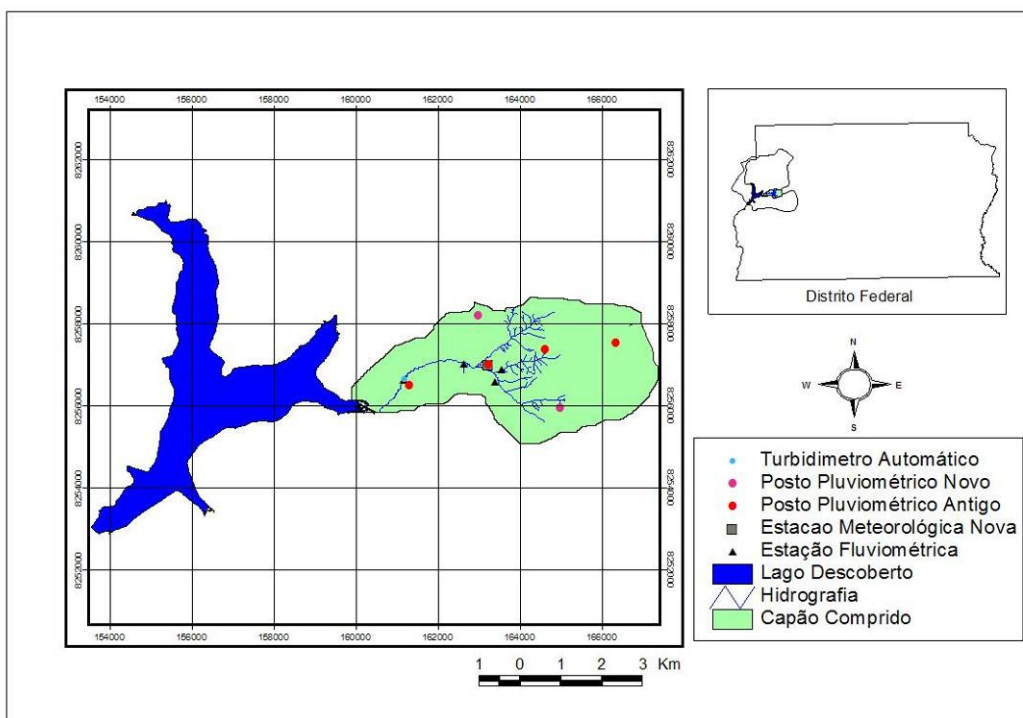


Figura 5.1 – Equipamentos fixos existentes na bacia do Capão Comprido

5.1.2 – Principais Equipamentos Utilizados

No estudo da bacia do Capão Comprido – DF foram obtidos, em campo, dados hidrossedimentológicos, fluviométricos, pluviométricos, piezométricos e outros. Para isso foi necessário a utilização de muitos dos equipamentos instalados por toda a bacia e em maior quantidade na seção próxima ao exutório, que vem sendo monitorada e operada pela CAESB (Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal) em parceria com o PTARH/UnB (Figura 5.2).

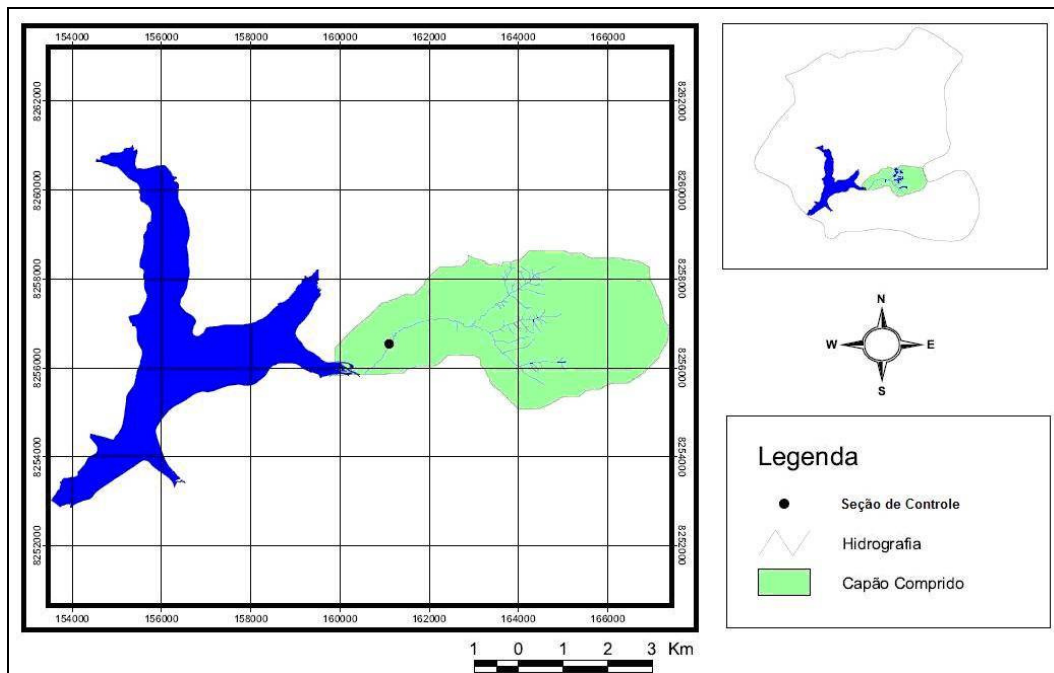


Figura 5.2 – Localização da seção de controle estudada

5.1.2.1 – Turbidímetro Automático SL2000-TS

Segundo Solar (2008), esse equipamento possui sensor que trabalha com dois princípios de operação: a transmitância e a reflectância. Esse tipo de turbidímetro utiliza além do detector de luz espalhada, um detector da luz transmitida através da amostra, e calcula a razão entre essas duas intensidades de luz detectadas. Os dados são adquiridos e armazenados com intervalos programáveis. O equipamento foi configurado para fazer medição a cada 10 minutos

Na ocasião da instalação buscou-se a disposição do sensor a fim de obter maior uniformidade e representatividade em termos de sedimento em suspensão. A sonda foi posicionada em um suporte enterrado dois metros evitando, assim, o arraste do equipamento em eventos extremos. Também foi feita limpeza do sensor periodicamente para evitar medições equivocadas.

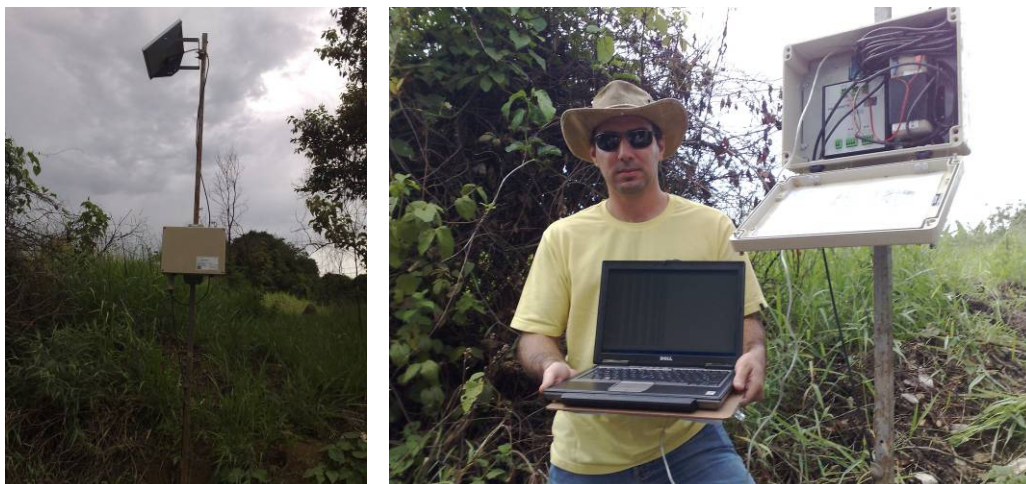


Figura 5.3 – Turbidímetro automático SL2000-TS instalado e transferindo dados para o computador

5.1.2.2 – Amostrador Manual USDH-48

Utilizou-se para as coletas das amostras de sedimento o amostrador USDH-48. As amostras foram coletadas em garrafas de vidro com capacidade de 1 litro. Segundo Carvalho (1994) esse equipamento é um integrador na vertical para coleta de amostras em até 1,5 m, sendo calibrado para bico de ¼”.



Figura 5.4 – Amostrador manual USDH-48

5.1.2.3 – Amostrador do Tipo Automático ISCO 6712

O amostrador ISCO 6712 foi utilizado em diversas campanhas para coletar amostras pontuais em um determinado intervalo de tempo já que esse modelo automático pode ser

programado para fazer até 24 coletas com volume e intervalo de tempo previamente definidos.



Figura 5.5 – Amostrador do tipo automático ISCO 6712

Também se buscou enterrar o suporte a dois metros de profundidade para que a mangueira de sucção ficasse segura sempre no mesmo local, que foi escolhido distante das margens. Por não existir segurança na área onde eram feitas as coletas, instalava-se o equipamento acorrentado a uma árvore e após a coleta de amostras o equipamento era removido.

5.1.2.4 – Régua Linimétrica

Percebe-se na prática que a melhor solução são as régua de ferro esmaltadas (Santos *et al.*, 2001). O antigo DNAEE desenvolveu um tipo semelhante de régua fabricado em alumínio anodizado e este modelo está sendo utilizado na seção estudada, tendo sido instaladas régua com lances de 1 metro, como pode ser verificado na Figura 5.6.



Figura 5.6 – Régua linimétrica instalada na seção de estudo com vazão baixa e alta.

5.1.2.5 – Linígrafo *Global Water* com Data Logger

O linígrafo instalado na seção é composto de um sensor de nível que fica imerso na água próximo ao leito do rio, um cabo que liga o sensor ao armazenador de dados e um armazenador de dados que é capaz de armazenar 24400 leituras. O cabo de ligação tem um duto de ar que permite ao sensor a compensação da pressão atmosférica (Lopes *et al.*, 2009).

Um software específico acompanha o equipamento e a programação do equipamento, assim como a captura dos dados armazenados na central, é feita utilizando-se um computador portátil. Por meio de programação pode-se calibrar o aparelho, limpar a memória da unidade de armazenamento e pré-definir os intervalos de leitura do sensor.



Figura 5.7 – Linígrafo da marca *Global Water*.

5.1.2.6 – ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*)

O aparelho faz a medição da velocidade através da emissão de um pulso sonoro cuja reflexão em partículas em suspensão na água é captada por três sensores. A velocidade das partículas faz com que esses pulsos sofram alterações de frequência que são proporcionais à velocidade. A vazão é calculada por integração do produto área-velocidade. A realização da medida da vazão em uma seção com 10 verticais pode ser feita em cerca de 1 hora. Na Figura 5.8 é apresentada foto do equipamento.



Figura 5.8 – Medidor de velocidade baseado no efeito Doppler (ADV) e medição com equipamento.

5.1.2.7 – Pluviógrafo *Onset*

Possui a particularidade da central de armazenamento ficar dentro do corpo do pluviógrafo e é configurado utilizando um computador. A resolução do aparelho é de 0.2 mm. Em cada movimento da cuba o aparelho emite um pulso que é enviado a uma unidade armazenadora que registra o instante do pulso. Essa forma de registro que permite um armazenamento com menos utilização de memória, pois só é feito registro nos instantes em que há precipitação e assim esses equipamentos podem acumular os dados por um longo período. O pluviógrafo está apresentado na Figura 5.9 e foi configurado utilizando-se um computador.



Figura 5.9 – Pluviógrafo *Onset*.

5.1.3 – Levantamento de dados

Ao somar os novos equipamentos com o já existente, a bacia do Capão Comprido passou a ter uma rede de monitoramento hidrológica e hidrossedimentológica satisfatória e durante o intervalo compreendido entre os meses de agosto de 2008 e setembro de 2009 buscou-se obter o maior número possível de dados para embasar o estudo.

5.1.3.1 – Dados Hidrossedimentológicos

Os levantamentos hidrossedimentológicos foram todos feitos na seção de controle próxima ao exutório, com localização apresentada na Figura 5.2.

Bicalho (2006) verificou, através de amostragens, que a seção de controle em questão pode ser considerada uma seção bem homogênea com relação à distribuição das concentrações de sedimento em suspensão, pois as concentrações médias nas verticais variam pouco em relação à concentração média da seção, com variação média baixa. Buscando confirmar o padrão de mistura completa sugerido foram realizadas 3 campanhas entre os meses de novembro de 2008 e fevereiro de 2009, com o amostrador manual USDH-48 e foi utilizada a metodologia da Integração na Vertical com Igual Incremento de Largura (IIL). As amostras coletadas para cada vertical, em cada evento foram levadas para laboratório para se obter o valor da concentração de sólidos em suspensão (C_{ss}) e assim poder comparar as verticais de cada evento.

Utilizando o amostrador ISCO 6712 foi possível fazer 10 campanhas entre os meses de novembro de 2008 e abril de 2009, com resultados satisfatórios. Buscou-se prioritariamente, amostrar os eventos chuvosos, que segundo Poletto e Merten (2006) representam 90% do fluxo de sedimentos transportado. O equipamento foi configurado para fazer coletas em diferentes intervalos de tempo que variavam entre 5 e 45 minutos, dependendo das condições do tempo no início da amostragem. Essas campanhas geraram aproximadamente 220 amostras, que também foram levadas ao laboratório. Com os valores de C_{ss} encontrados foi possível encontrar, em função da vazão, a curva-chave de sedimentos em suspensão do corpo hídrico, já que a seção se encontra próxima ao exutório.

O turbidímetro automático SL2000-TS foi instalado no mês de janeiro de 2009 e seu funcionamento continua até os dias atuais. Esse equipamento foi utilizado para obter uma

correlação com os dados de concentração de sólidos em suspensão (C_{ss}) obtidos posteriormente à instalação do equipamento. Através dele foi possível avaliar uma outra maneira automática para obtenção dos valores de C_{ss} na bacia.

5.1.3.2 – Dados Fluviométricos

Apesar de continuar acompanhando os dados fluviométricos de todos os quatro postos existentes na bacia, neste estudo foram utilizados os dados obtidos para a seção de controle localizada próxima ao exutório. Os outros postos foram utilizados apenas para preenchimento de falhas através de correlação simples.

Assim como os outros três, o posto fluviométrico localizado na seção de estudo é composto por linígrafo *Global Water* fazendo medição a cada 15 minutos e operando desde o fim do ano 2006, além de régua linimétrica. Para tornar possível a elaboração de Curva-Chave de fluxo também são feitas medições periódicas de vazão com ADV ou molinete. Nesse estudo foi necessário fazer algumas medições e 4 foram aproveitadas em conjunto com outras 23 já selecionadas.



Figura 5.10 – Realização de medição de vazão na seção, com ADV .

A operação da seção em questão é de responsabilidade conjunta com a Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) que monitora a mesma desde 1978 e por esse motivo é importante frisar que os dados foram obtidos por diversas pessoas diferentes, o que causa alguns problemas de organização dos mesmos. Outra dificuldade ocorre em decorrência da não existência de anotações de informações importantes que foram verificadas.

5.1.3.3 –Dados Pluviométricos

Fragoso (2008) afirma que foram instalados, no ano de 2006, quatro pluviógrafos *Onset* em linha, seguindo a calha do córrego. Desde o início os dados vêm sendo obtidos periodicamente em campo e também é feita troca das baterias que mantém o sistema funcionando, sempre que necessário. Apesar dos cuidados tomados alguns aparelhos tiveram problemas em momentos diferentes, o que acarretou em falhas que devem ser preenchidas durante o “tratamento dos dados”.

Em razão dos pluviógrafos estarem localizados em linha se achou importante instalação de mais dois aparelhos de uma forma que contemplasse a área da bacia com uma melhor distribuição espacial, visando verificar se a utilização somente dos 4 pluviógrafos acarretaria em algum problema. Esses equipamentos foram instalados em dezembro de 2008 e a distribuição foi apresentada na Figura 5.1.

5.1.3.4 –Dados Planialtimétricos

Buscando descrever a altimetria da seção de controle em questão e a região que circunda a mesma, no dia 17 de janeiro de 2009, foi feito um levantamento local, utilizando Estação Total - Taqueômetro (Figura 5.11). Esse levantamento utilizou como referência altimétrica marco da CAESB, já existente no local.



Figura 5.11 – Levantamento altimétrico da seção de controle com Estação Total .

Foi aplicado o processo a vau para levantamento detalhado do relevo, pois, segundo Santos *et al.* (2001) é mais indicado para rios pequenos e não muito largos. O levantamento consiste do caminhamento na seção com uma mira, levantando a profundidade vertical e a distancia da vertical até o PI. Também se coletou pontos altimétricos no entorno da seção.

5.2 – TRABALHO DE LABORATÓRIO

Para encontrar a concentração de sólidos em suspensão (C_{ss}) das amostras utilizou-se o laboratório de Análise da Água do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília. Foi aplicada a metodologia da filtração, com utilização de papel filtro com malha de $0,47\ \mu\text{m}$ e se buscou seguir todas as indicações apresentadas em bibliografia especializada e descritas no item 3.2.1.2.



Figura 5.12 – Manuseio de amostra para filtração, sistema de filtragem ligado a bomba de sucção e filtros após amostras passarem pelo sistema.

Procurando evitar erros nas análises foram tomados alguns cuidados como a lavagem e secagem prévia dos filtros com água destilada, antes de sua utilização. Para evitar ganho de umidade os filtros foram pesados imediatamente após serem retirados da estufa, onde ficaram por uma hora com temperatura em torno de 100°C .

5.3 – ANÁLISE DOS DADOS

Foi necessário analisar-se os dados de precipitação, de nível da lâmina d'água, de vazão e de turbidez coletados em campo, bem como, os dados obtidos no laboratório. Quando foi preciso se preencheu falhas pontuais e temporais, e com isto iniciar diversas análises.

5.3.1 – Dados Fluviométricos

No posto fluviométrico localizado na seção de controle têm-se dados linigráficos a partir de março de 2006, com anotação periódica da cota da régua e um total de 27 medições de vazão com ADV ou molinete. Foi possível obter dados de fluxo em situações que contemplaram desde baixos até altos valores. Em uma análise inicial se percebeu a existência de ruídos na série de dados, em um total de 5, que foram descartados (Figura 5.14).



Figura 5.13 – Seção de controle com baixo e com alto fluxo.

Entre os meses de março do ano de 2006 e maio de 2009 foram verificadas 4 falhas de aproximadamente um mês nos dados linigráficos coletados nessa seção. Os dados linigráficos coletados nos três outros postos fluviométricos existentes a montante foram utilizados para preenchimento de falhas após correlação com os valores da seção estudada. Para isso separou-se um período de um ano de dados em que não ocorreram falhas em nenhum dos linígrafos e buscou-se encontrar equações que correlacionassem os dados de um ou mais linígrafos com os valores linigráficos da seção.

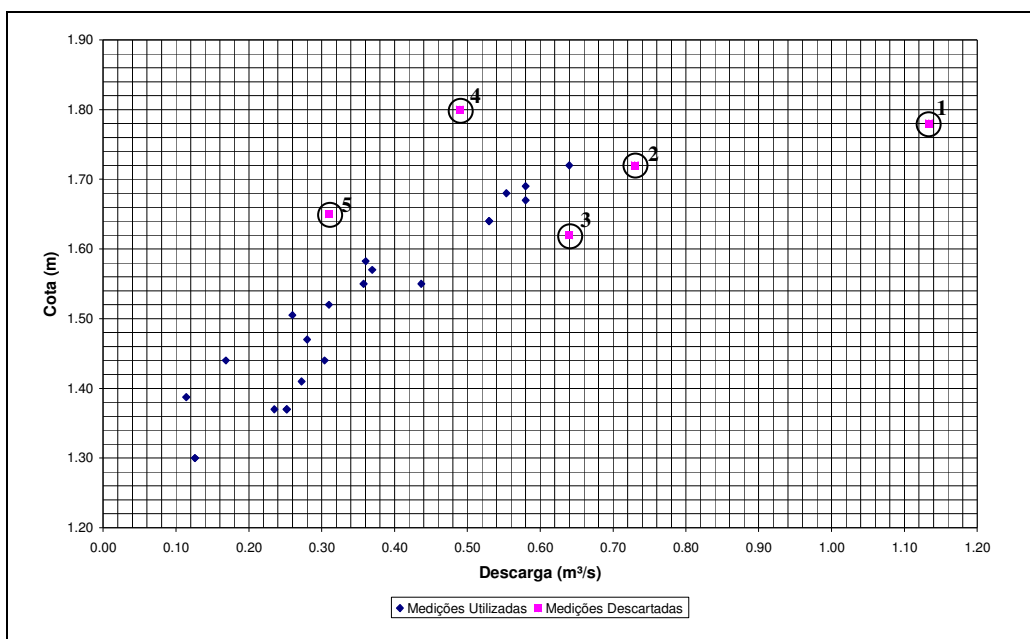


Figura 5.14 – Medições utilizadas para elaboração de curva-chave e descartadas.

Das 27 medições realizadas (Figura 5.14) 5 foram desconsideradas. Os pontos 3, 4 e 5 não foram utilizados por estarem fora da tendência geral dos pontos. O ponto 2 foi descartado por ter sido obtido em uma medição antiga e por existir medição em mesma cota, realizada neste estudo. O descarte do ponto 1 também foi em função da época da realização da medição, já que ela foi feita a mais de 5 anos e também por esse dado mostrar que a vazão quase dobra com uma elevação de apenas 0,08 m com relação a outra medida realizada, sem que tenha ocorrido o transbordamento da calha, o que poderia justificar uma elevação de vazão de tal porte com essa diferença de cota.

Analisando os 22 dados de vazão restantes, medidos com ADV ou molinete, e suas respectivas cotas conseguiu-se verificar duas tendências bem definidas. As duas tendências encontradas podem ser explicadas por mudança na seção estudada por causa do carreamento de sedimentos e deram origem a duas curvas-chave.

As duas tendências verificadas para os dados coletados estão apresentadas na Figura 5.15 e são formadas por dados coletados antes de fevereiro de 2008 para o período denominado “1” e após fevereiro de 2008 para o chamado “2”. Importante comentar que essa mudança aconteceu apenas com as vazões baixas.

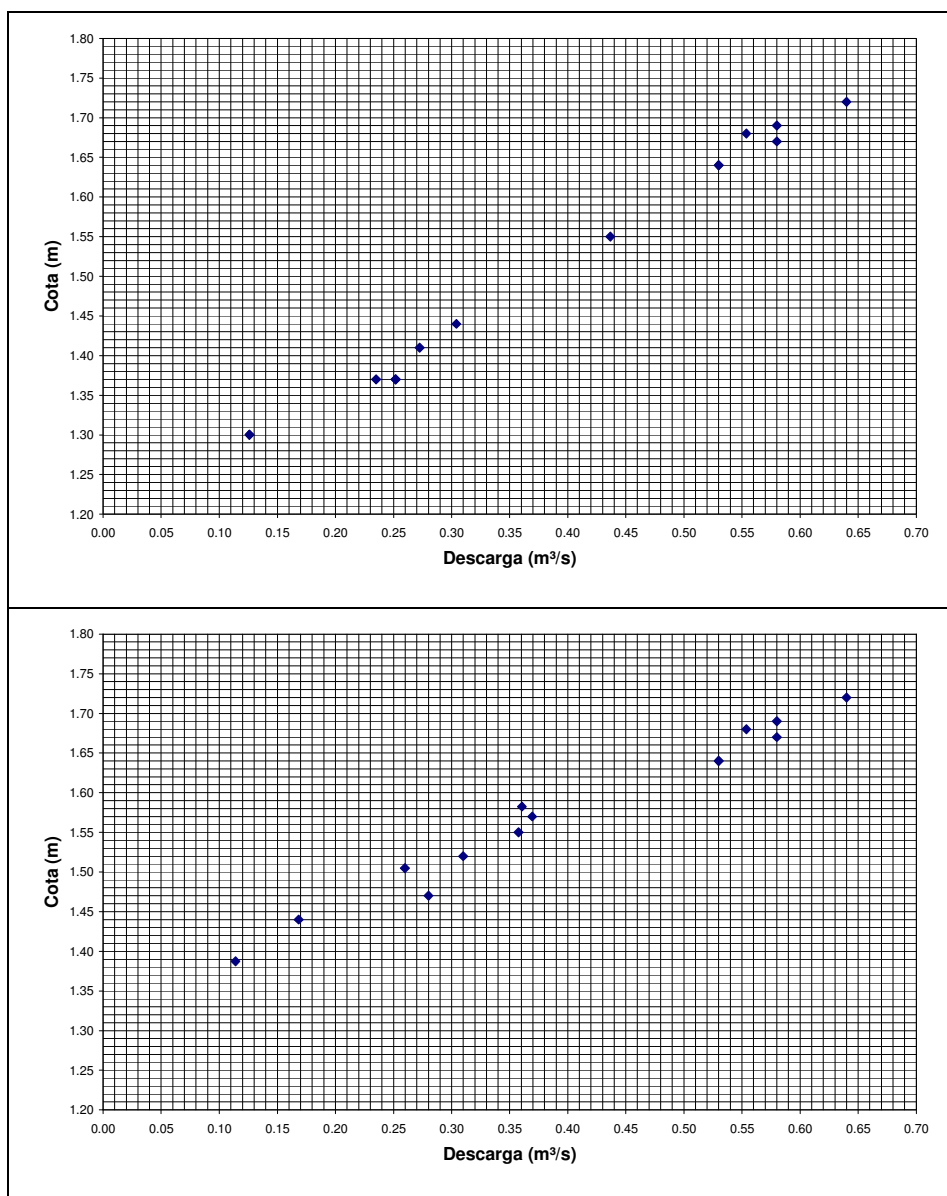


Figura 5.15 – Mudança da tendência identificada para os dados de vazões baixas no período “1” (anterior a fevereiro de 2008) e “2” (posterior a fevereiro de 2008)

Ao analisar as diferenças encontradas entre as tendências apresentadas para cada período, percebe-se que a mudança da seção resultou em uma elevação das cotas correspondentes para as vazões baixas. Com os dados apresentados, fica clara a necessidade de elaboração de curvas-chave distintas para representar cada um dos períodos.

5.3.1.1 – Curva Cota x Descarga com extrapolação pelo método de *Stevens*

Buscando encontrar a equação que melhor se adequasse aos dados observados, utilizou-se uma representação polinomial do terceiro grau e outra potencial. Para a extrapolação da

curva foi utilizado o método de Stevens e comparado com os dados extrapolados pelas duas representações já citadas.

As Figura 5.16 e 5.17 apresentam as curvas “Cota (h) x Descarga (Q)” encontradas, utilizando equação do tipo polinomial do terceiro grau, para cada um dos dois períodos.

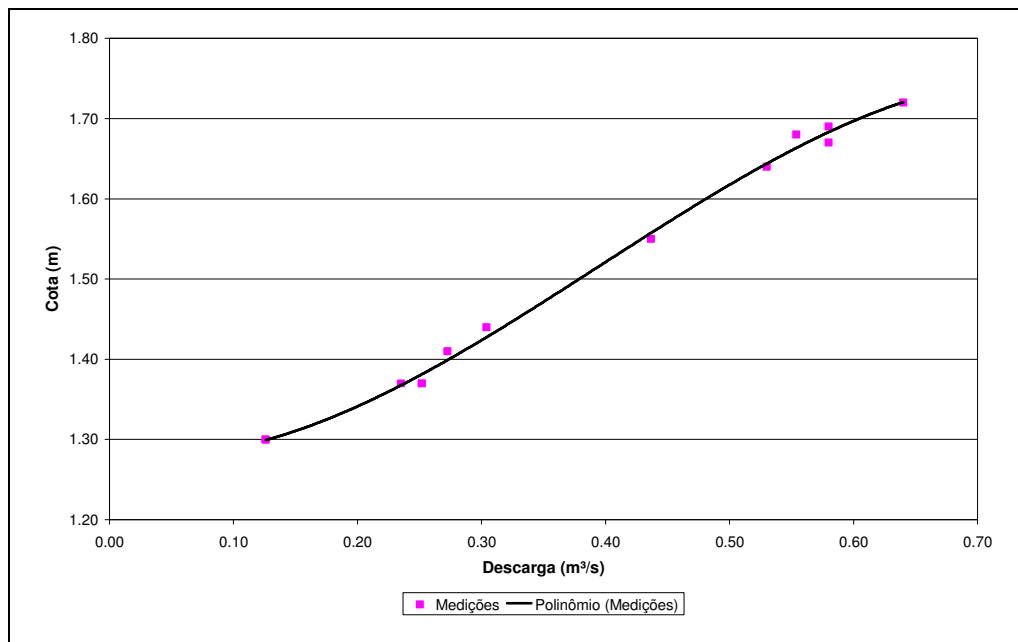


Figura 5.16 – Curva Cota x Descarga com equação do tipo polinomial do terceiro grau, período anterior à 02/2008.

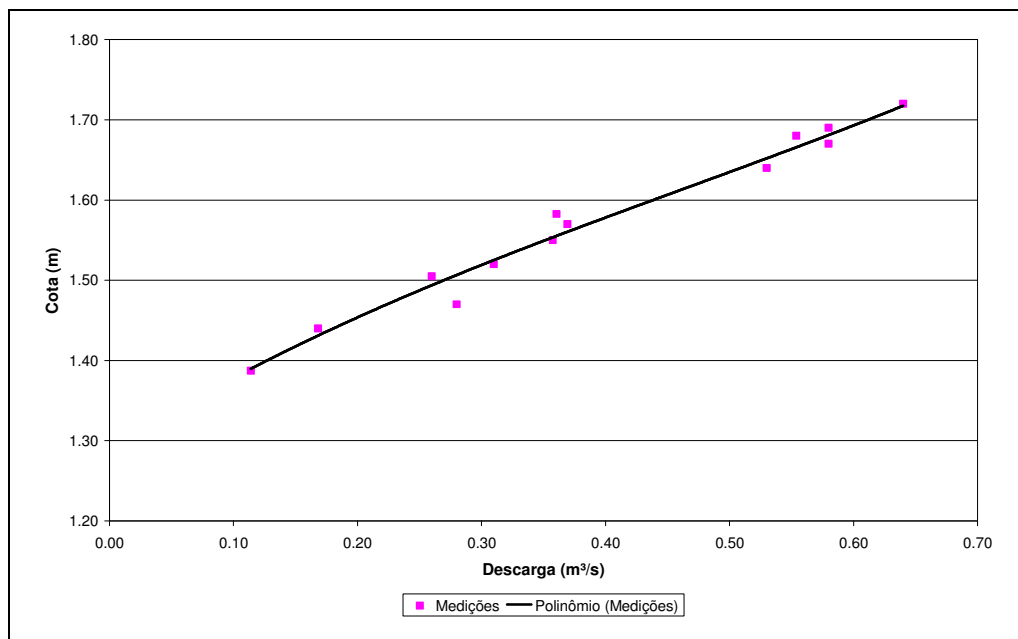


Figura 5.17 – Curva Cota x Descarga com equação do tipo polinomial do terceiro grau, período posterior à 02/2008.

As equações polinomiais do terceiro grau que descrevem as curvas apresentadas estão a seguir e tiveram coeficiente de determinação R^2 igual a 0,996 e 0,977 respectivamente:

$$Q = -1,3990 \times h^3 + 1,7331 \times h^2 + 0,2091 \times h + 1,2469 \text{ :. para dados anteriores à 02/2008} \quad 5.1$$

$$Q = 0,1688 \times h^3 - 0,4397 \times h^2 + 0,8749 \times h + 1,2931 \text{ :. para dados posteriores à 02/2008} \quad 5.2$$

Para encontrar as curvas “Cota(h) x Descarga (Q)” para cada um dos dois períodos, utilizando equação do tipo potencial no formato apresentado na formulação 5.3, que é largamente utilizada para ajustar esse tipo de dado, foi empregada a regressão pelo método dos mínimos quadrados com a utilização da ferramenta *solver* do *software* EXCEL:

$$Q = a \times (h - h_0)^b \quad 5.3$$

Em que, Q é a vazão (m^3/s); h é a leitura da régua (m); a e b são constantes a serem determinadas assim como h_0 que corresponde ao valor de h para a vazão zero. As figuras abaixo apresentam as curvas “Cota (h) x Descarga (Q)” encontradas para cada uma das duas tendências, utilizando a equação do tipo potencial.

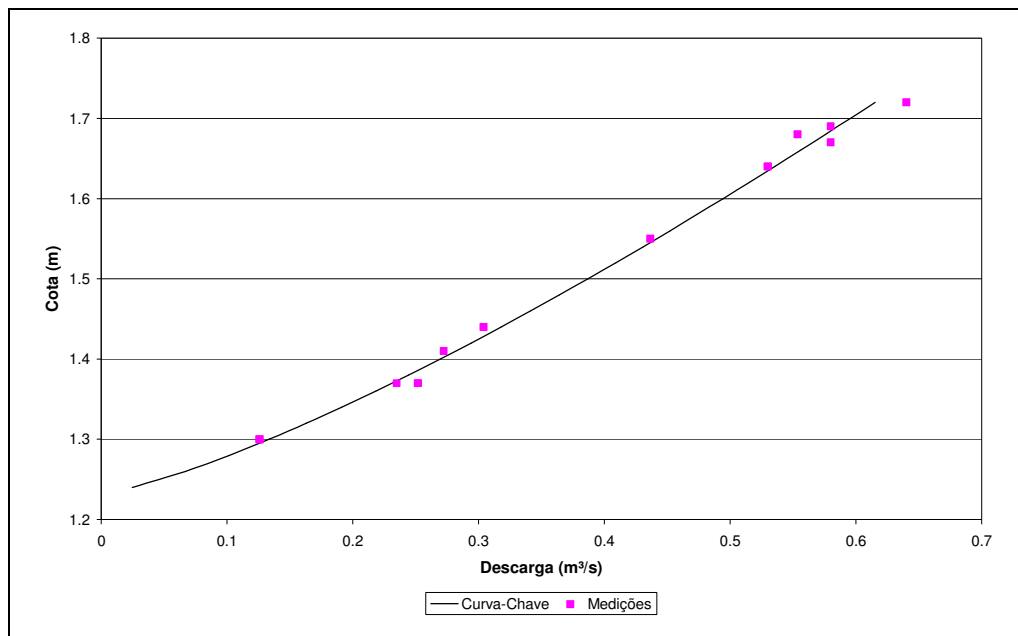


Figura 5.18 – Curva Cota x Descarga com equação do tipo potencial, período anterior à 02/2008.

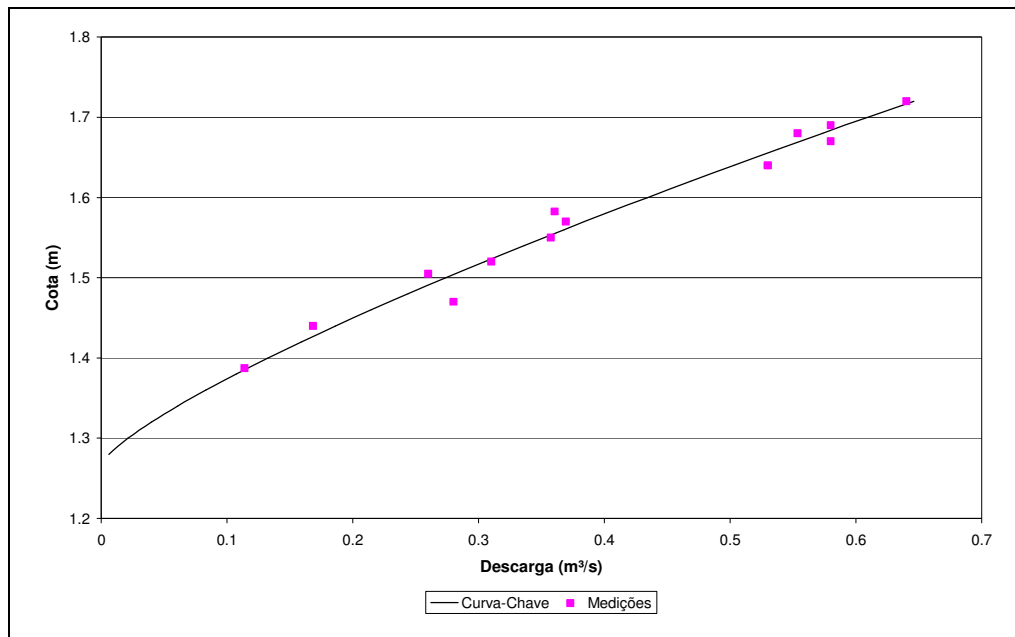


Figura 5.19 – Curva Cota x Descarga com equação do tipo potencial, período posterior à 02/2008.

As equações potenciais que descrevem as curvas tiveram um erro médio de 0,09 e 0,05 e estão apresentadas a seguir:

$$Q = 1,0716 \times (h - 1,2324)^{0,7727} \quad \therefore \text{para dados anteriores à 02/2008} \quad 5.4$$

$$Q = 1,7942 \times (h - 1,2679)^{1,2864} \quad \therefore \text{para dados posteriores à 02/2008} \quad 5.5$$

A vazão mais alta observada em campo corresponde a uma cota de 1,72 m e todos os valores acima dessa cota foram estimados através da extrapolação utilizando o método de *Stevens*. Sabe-se que o método de *Stevens* é um método gráfico e neste trabalho tentou-se ajustar equações às curvas, como pode ser visto na Figura 5.20. Essas equações podem ser utilizadas posteriormente para estimativa das vazões acima da cota limite em planilhas de cálculo.

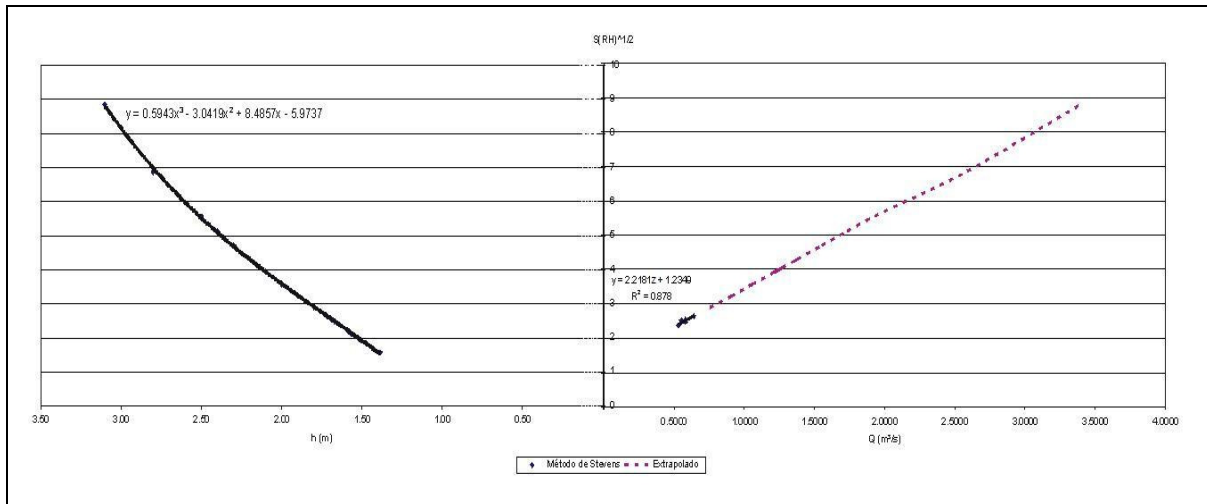


Figura 5.20 – Extrapolação pelo método de *Stevens*.

Como as duas equações possuem o mesmo y deve-se igualá-las para se poder encontrar a relação entre descarga (Q) e cota (h) que será utilizada para extrapolar os valores de vazão para cotas superiores a 1,72 m.

$$Q = \frac{0,5943 \times h^3 - 3,0419 \times h^2 + 8,4857 \times h - 7,2084}{2,2181} \quad 5.6$$

A Figura 5.21 apresenta o comparativo dos resultados da extrapolação dos dados de vazão pelos três métodos abordados. Observa-se que entre os métodos, a extrapolação por equação polinomial, apresenta maiores desvios, com o aumento da cota régua, quando comparado com o método de *Stevens*. Já a extrapolação pelo modelo potencial se apresenta mais próxima aos valores obtidos pelo método de *Stevens*, que por ser baseado em parâmetros hidráulicos da calha do rio, sugere maior confiabilidade, principalmente em seções homogêneas.

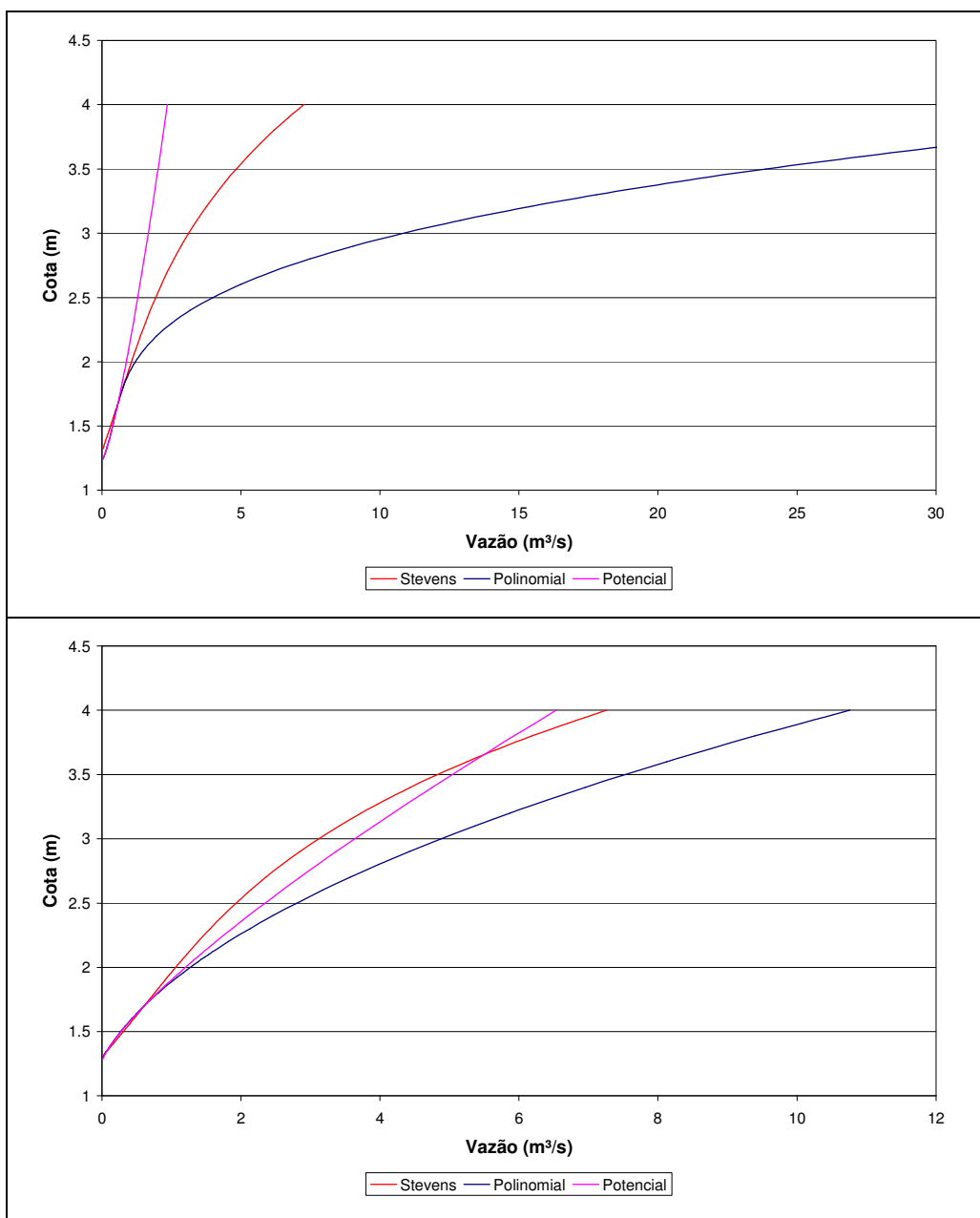


Figura 5.21 – Extrapolação dos dados por três diferentes tendências para os períodos 1 e 2.

As equações que representam de forma mais satisfatória a realidade foram utilizadas para construir a curva-chave para o período “1” e para o período “2” até a cota limite de 1,72. Acima dessa cota a curva-chave foi construída com a equação 5.6 para as duas tendências.

5.3.2 – Dados Hidrossedimentológicos

Inicialmente, é importante comentar que os resultados das análises das amostragens realizadas com amostrador manual, para comprovar o padrão de mistura completa,

sugerido por Bicalho (2006), apresentou diferença máxima de 8% entre as verticais coletadas, o que comprova o padrão sugerido e por isso, dá suporte a utilização de amostrador automático com coleta pontual.

Com os resultados das análises de cerca de 220 amostras coletadas com o equipamento ISCO-6712 foi possível construir uma curva-chave de sedimentos que contempla dados de altas e baixas vazões. Utilizando parte desses dados pôde-se fazer uma correlação com o turbidímetro automático que começou a operar em janeiro de 2009. As Figura 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25 apresentam os resultados da concentração de sólidos em suspensão - C_{SS} (g/L), separados por evento.

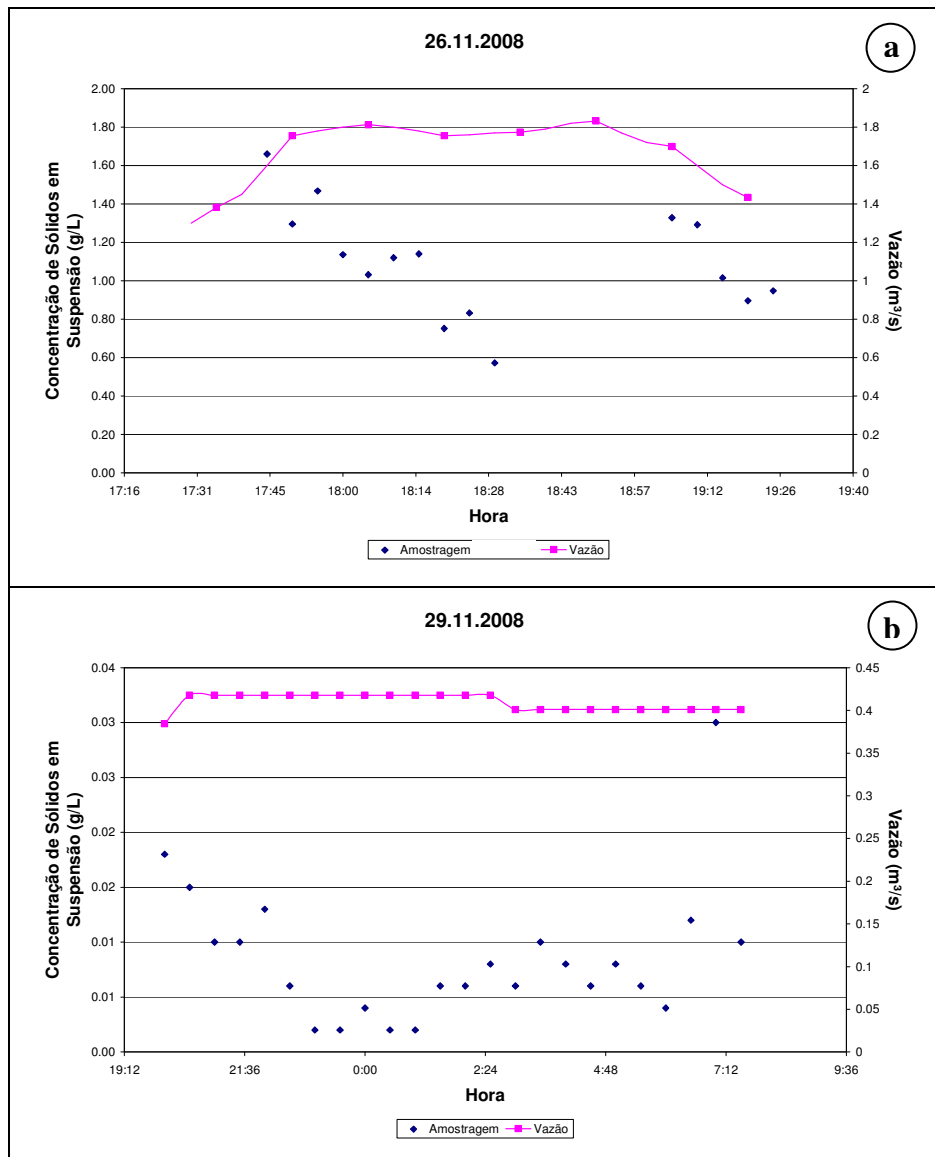


Figura 5.22 – Dados de Concentração de Sólidos em Suspensão (g/L) x Hora para os eventos amostrados – a) evento em 26.11.2008, b) evento em 29.11.2008.

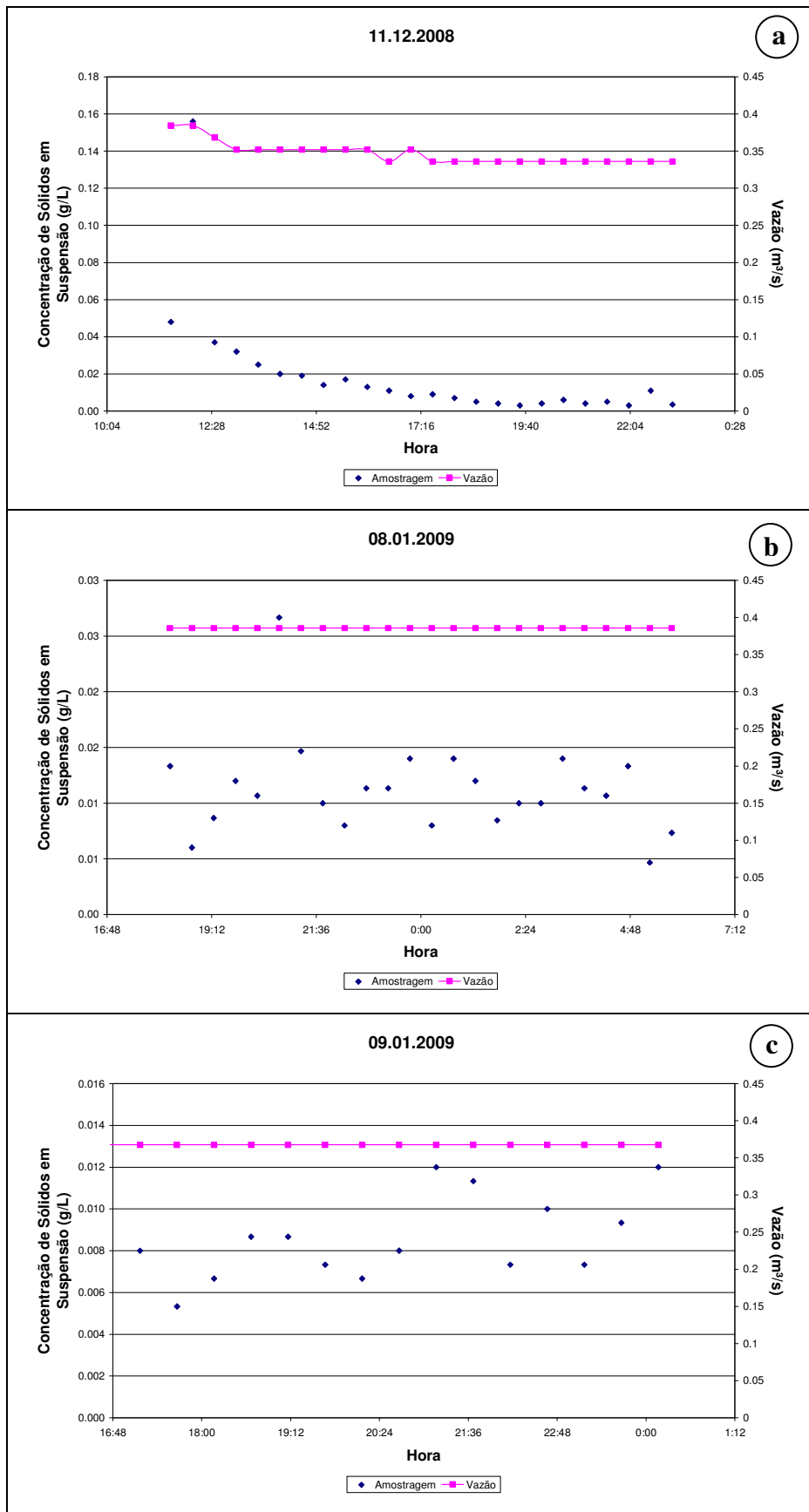


Figura 5.23 – Dados de Concentração de Sólidos em Suspensão (g/L) x Hora para os eventos amostrados – a) evento em 11.12.2008, b) evento em 08.01.2009 e c) evento em 09.01.2009.

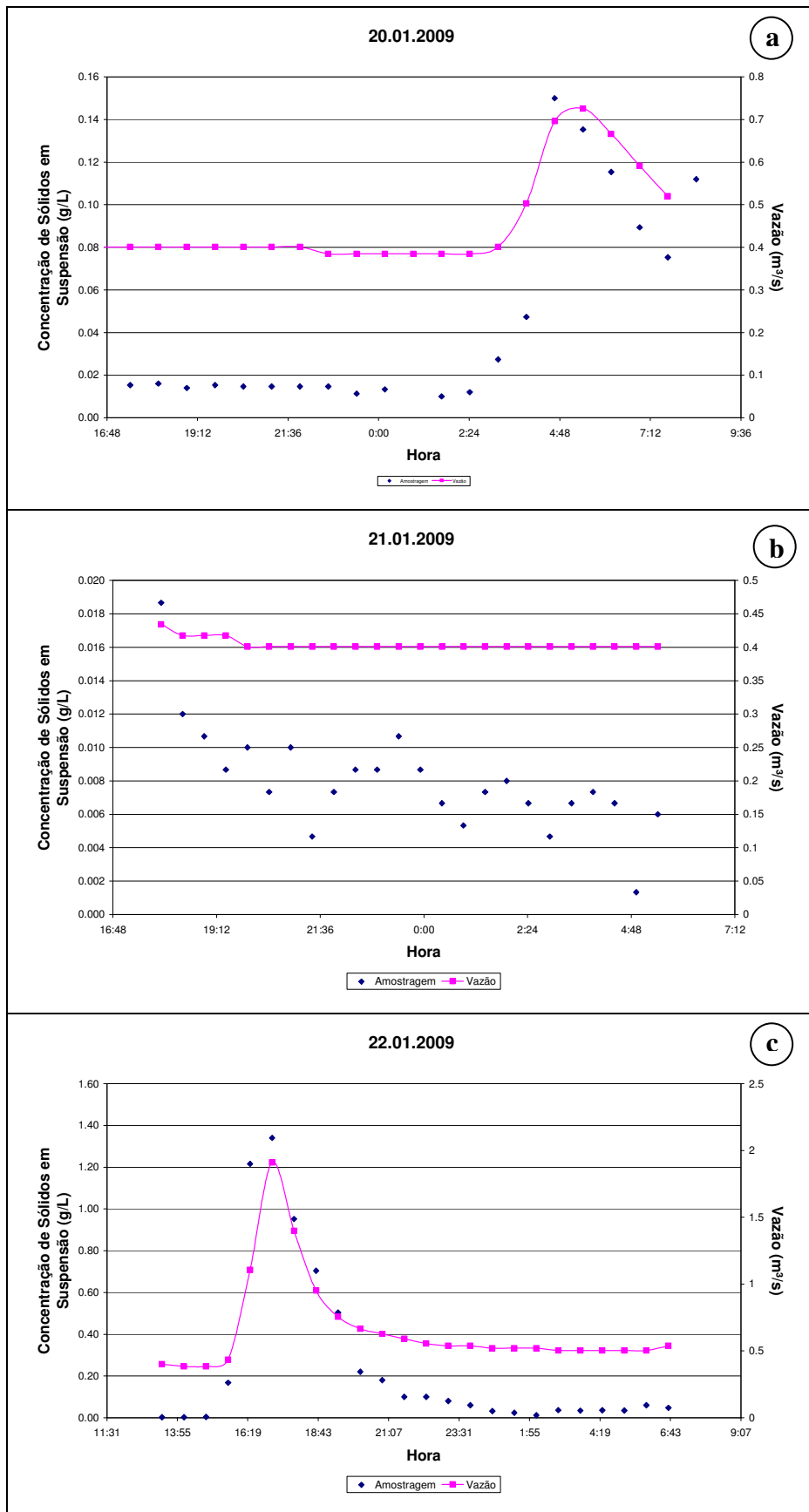


Figura 5.24 – Dados de Concentração de Sólidos em Suspensão (g/L) x Hora para os eventos amostrados – a) evento em 20.01.2009, b) evento em 21.01.2009 e c) evento em 22.01.2009.

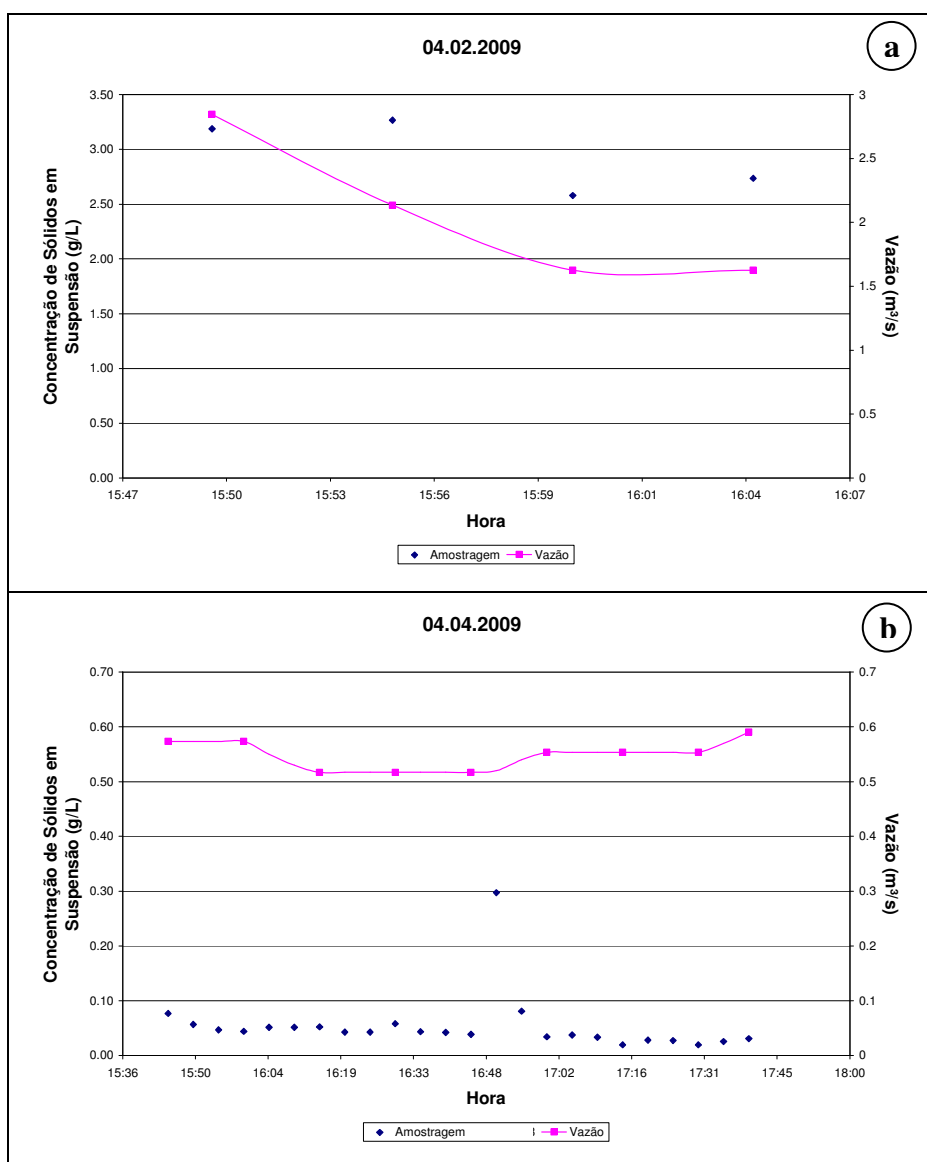


Figura 5.25 – Dados de Concentração de Sólidos em Suspensão (g/L) x Hora para os eventos amostrados – a) evento em 04.02.2009 e b) evento em 04.04.2009.

5.3.2.1 – Curva-Chave de Sedimentos

Utilizando a Curva Cota x Descarga elaborada, foi possível encontrar as vazões que corresponderiam à concentração de sedimentos em suspensão e assim representá-los graficamente. Foi possível descartar alguns dos valores encontrados por estarem com uma representação pouco coerente com os demais dados. Esses dados incoerentes podem ser causados por erros de medição. A Figura 5.26 mostra todos os valores utilizados para encontrar a curva-chave de sedimentos.

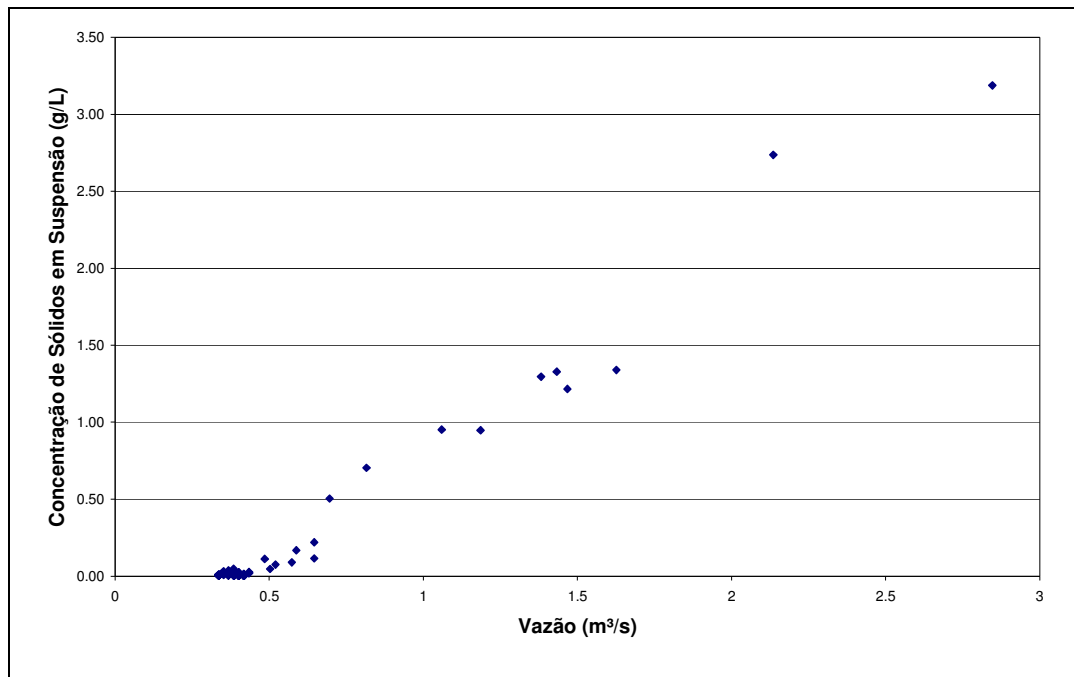


Figura 5.26 – Concentração de Sedimentos (g/L) x Vazão (m³/s).

Outra questão importante verificada ao analisar a Figura 5.26 é a existência de uma tendência para as vazões baixas e outra para as altas, o que levou à utilização de uma equação diferente para essas situações. Buscando encontrar as equações que representassem as tendências dos valores apresentados, foi feita regressão pelo método dos mínimos quadrados, para uma equação potencial, como indicado por Asselman (2000), utilizando a variável vazão (variável independente) e a descarga sólida ou Q_{ss} (variável dependente):

$$Q_{ss} = 107,76 \times Q^{5,81} \quad \therefore \text{para vazões inferiores à } Q=0,65(m^3/s) \quad 5.7$$

$$Q_{ss} = 75,33 \times Q^{2,27} \quad \therefore \text{para vazões superiores à } Q=0,65(m^3/s) \quad 5.8$$

Em que, Q_{ss} é a vazão sólida suspensa (ton/dia) e Q é a vazão (m³/s). Essas equações foram utilizadas para construir a curva-chave de sedimentos e assim foi possível fazer uma comparação com a encontrada por Bicalho (2006), que conseguiu coletar poucos dados em campo e em situação de baixa vazão.

- *Quantificação do Transporte Total de Sedimentos*

Buscando quantificar o total de sedimentos transportados durante um ano hidrológico, utilizou-se a formulação (Equação 5.9) que levava em consideração a vazão sólida medida em determinado instante (Q_{ssi}) e o intervalo de tempo para a próxima medição e desse

modo foi possível encontrar a quantidade de sedimento transportado em cada instante (S_{ii}) e por fim somar todo o sedimento transportado.

$$S_{ii} (ton) = \sum \frac{\Delta T(\text{min})}{1440} Q_{ssi} (ton / dia) \quad 5.9$$

É importante comentar que o intervalo de tempo entre cada medição (ΔT) foi 15 minutos já que o valor da Q_{ss} é baseado nos dados linigráficos que foram coletados com esse intervalo temporal.

- *Quantificação do Transporte Total de Sedimentos para diferentes intervalos de medições*

Na determinação do transporte total de sedimentos, as concessionárias de serviço público e empresas que trabalham com esse tipo de dados, normalmente, medem a cota em intervalos de tempo maiores e com horários marcados, como por exemplo, as 7 e 17 horas. Neste trabalho também foi analisado a possibilidade medições realizadas as 0, 6, 12 e 18 horas, para tentar verificar uma aproximação maior com o cálculo feito com o intervalo de tempo apresentado anteriormente.

5.3.2.2 – Correlação entre Turbidez e Concentração de Sedimento em Suspensão

Buscando avaliar outra forma automática de coletar informações acerca do transporte de sedimentos na bacia tentou-se elaborar uma curva que correlacione a turbidez, medida desde janeiro com o equipamento SL2000-TS, e a concentração de sedimentos em suspensão, obtidas com aproximadamente 65 amostras feitas com o amostrador ISCO-6712, após a instalação do turbidímetro, e analisadas em laboratório.

A Figura 5.27 mostra gráficos com os valores de Turbidez e Sólidos em Suspensão, no tempo, para cada um dos quatro eventos que foram registrados simultaneamente pelo amostrador e turbidímetro automático.

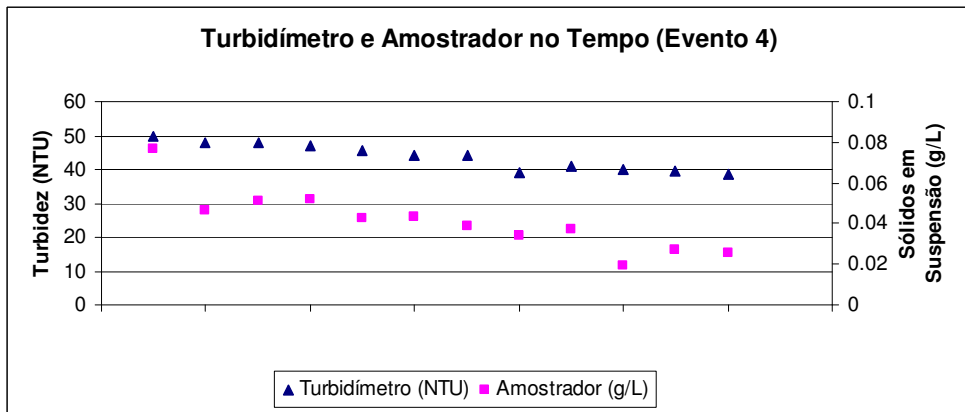
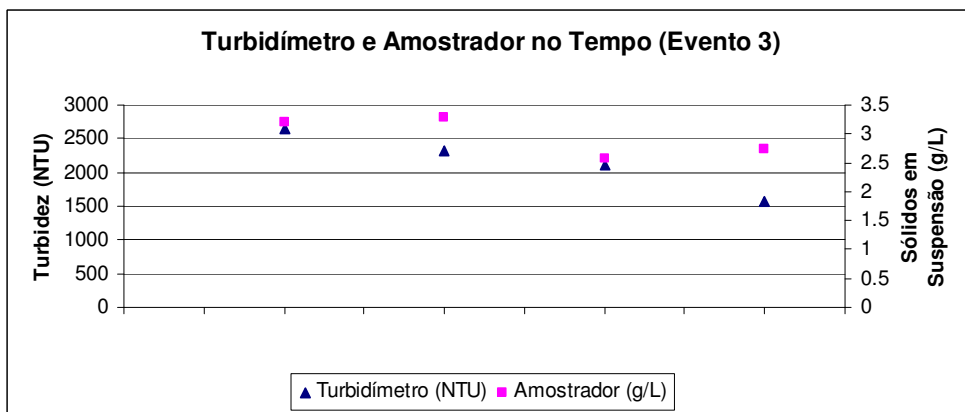
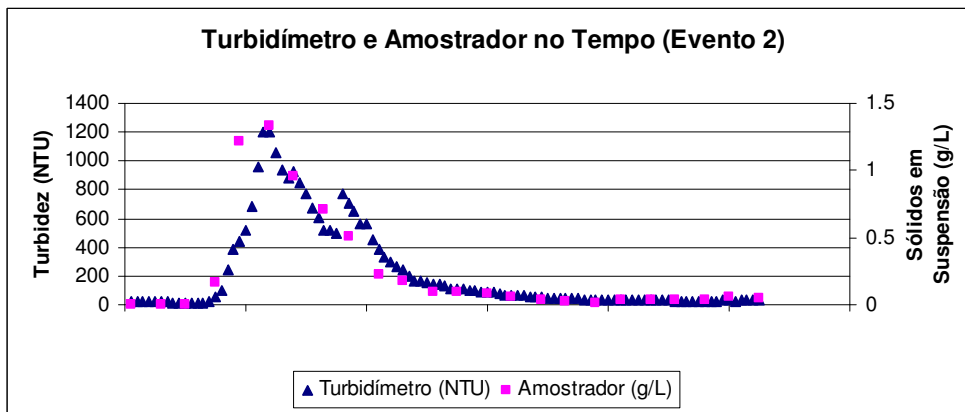
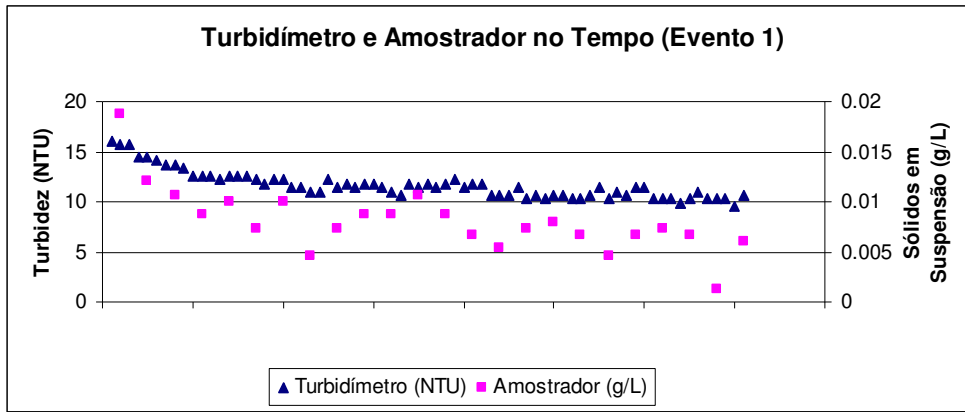


Figura 5.27 – Comparação, por evento, entre os dados de turbidez e sólidos em suspensão no tempo.

Para correlacionar os dados foram utilizadas duas metodologias, a primeira com os valores dos eventos 1, 2 e 3 para a correlação e o 4 para a verificação, escolha essa baseada apenas na cronologia dos eventos. A segunda metodologia consistiu na utilização apenas do evento 2 para levantar a correlação, já que este possui valores de vazões baixas e altas, e posteriormente verificou-se a correlação com os eventos 1, 3 e 4.

- *Construção da Curva de Correlação utilizando dados dos eventos 1,2 e 3*

Ao se *plotarem* os valores de sólidos em suspensão (g/L) e os de turbidez (NTU) pôde-se verificar a existência de duas tendências, Figura 5.28, uma para as vazões baixas e outra para as altas. Tendo os pontos para as duas tendências definidas se utilizou equações lineares para descrevê-las.

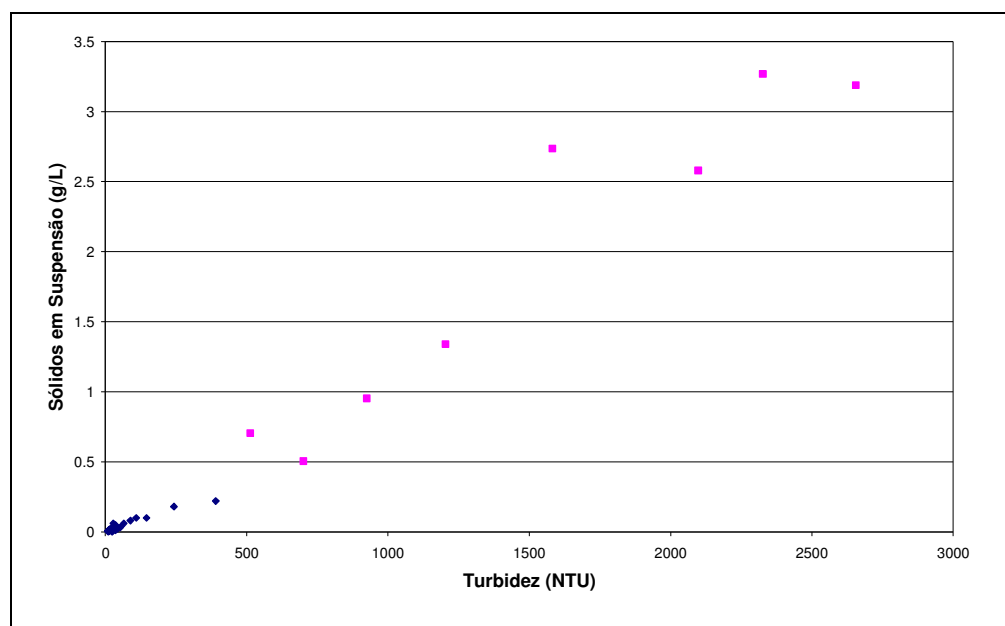


Figura 5.28 – Sólidos em Suspensão (g/L) X Turbidez (NTU) para a Correlação com dados dos eventos 1, 2 e 3 – Duas Tendências

Analisando a Figura 5.28 é possível atribuir que o ponto limite entre as tendências se encontra na concentração de sólidos em suspensão igual a aproximadamente 0,22 g/L e a turbidez (T) equivalente a 390 NTU.

- *Construção da Curva de Correlação utilizando apenas dados do evento 2*

Buscando verificar a possibilidade de encontrar correlação satisfatória utilizando apenas uma coleta de dados, que cubra tanto eventos de altas vazões quanto os de baixa se tentou correlacionar os dados de Sólidos em suspensão (g/L) e de turbidez (NTU) encontrados para o evento 2.

Para esse caso também foi verificada a existência de duas tendências, uma para as vazões baixas e outra para as altas. Também foram utilizadas equações lineares para descrevê-las.

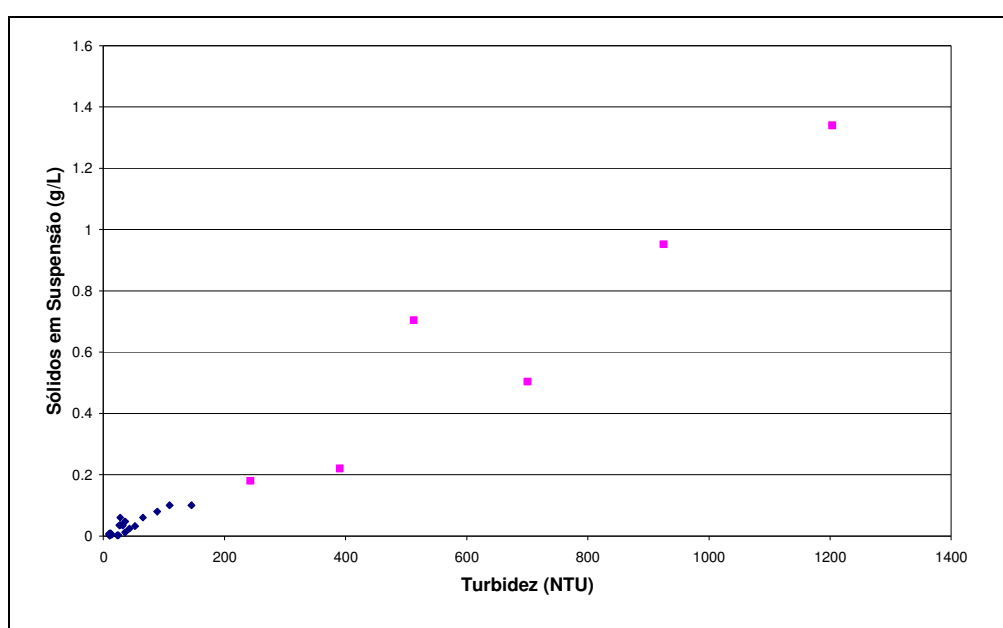


Figura 5.29 – Sólidos em Suspensão (g/L) X Turbidez (NTU) para a Correlação com dados do evento 2 – Duas Tendências

Ao analisar a Figura 5.29 inferiu-se que o ponto limite entre as tendências se encontra na concentração de sólidos em suspensão igual a aproximadamente 0,10 g/L e a turbidez (T) equivalente a 145,5 NTU.

5.3.3 – Dados Pluviométricos

A bacia do Capão Comprido tem 4 pluviógrafos instalados desde agosto de 2006, com coleta de dados até os dias atuais. Nesse período algumas lacunas de dados foram verificadas e podem ter sido causadas por fim da carga da bateria ou problema no

equipamento. As falhas em dados existentes foram preenchidas utilizando o método da ponderação regional, quando possível, e quando não, foi utilizada regressão linear.

Sabe-se que mais dois pluviógrafos foram instalados em dezembro de 2008 com o objetivo de verificar a variação espacial das chuvas em toda a área da bacia, já que os primeiros quatro foram instalados em linha e isso levantou questionamentos. Para isso foram selecionados, em cada posto, os valores de precipitação total em um período chuvoso entre os meses de janeiro e março, em que não ocorreram falhas perceptíveis de medição.

Analisando os dados, que estão apresentados na Tabela 5.1, percebe-se uma variabilidade pequena entre o total precipitado coletado em cada posto e além da variabilidade espacial, outros possíveis responsáveis por essa diferença podem ser problemas de medição do pluviômetro.

Tabela 5.1 – Precipitação total entre janeiro e março de 2009, por posto pluviométrico

Posto Pluviométrico	Precipitação Total (mm)	Precipitação Média Diária (mm)
Novo 01	326	5,73
Novo 02	356	6,24
Antigo 01	366	6,41
Antigo 02	424	7,43
Antigo 03	355	6,22
Antigo 04	408	7,15

Apesar da boa representatividade que os 4 postos pluviométricos antigos têm da distribuição das chuvas da bacia, o estudo também se propôs a espacializar os valores de precipitação total apresentados na Tabela 5.1, utilizando a ferramenta de interpolação que emprega o Método *Krigagem*, usando o *software Surfer*.

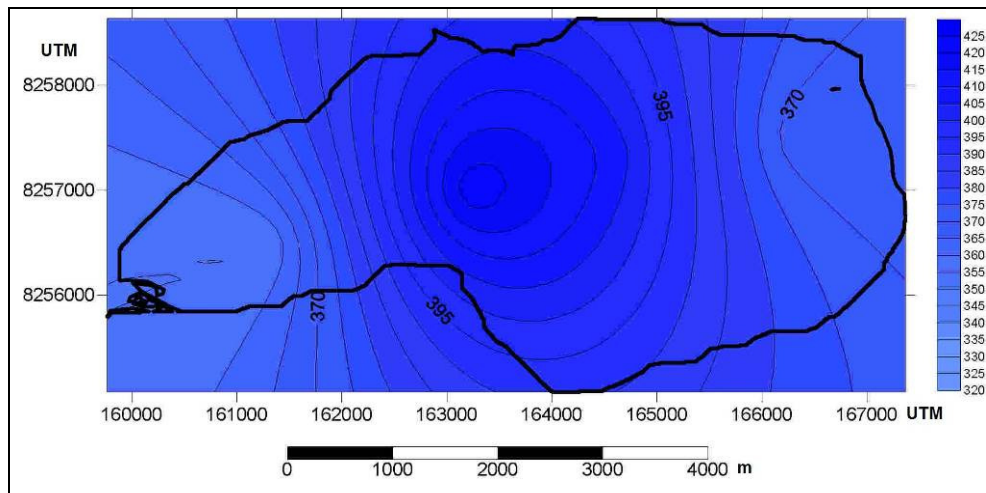


Figura 5.30 – Espacialização da precipitação dos 4 postos antigos.

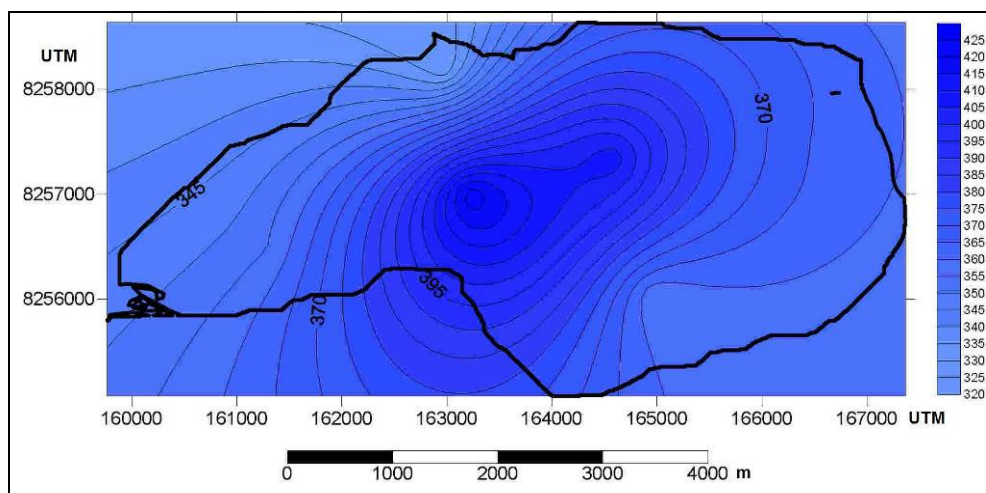


Figura 5.31 – Espacialização da precipitação dos 4 postos antigos juntos com os 2 novos.

Apesar das diferenças que podem ser observadas entre as isoietas nas duas figuras, é importante observar que as isoietas estão traçadas a cada 5 mm. No cálculo das precipitações médias diária e mensal, para cada posto, nos meses de janeiro a março de 2009, a diferença percentual foi de 29,88% e a menor de 0,21%.

Dessa forma, a precipitação média sobre a bacia foi determinada pelo método de *Thiessen* utilizando os quatros postos com a série completa.

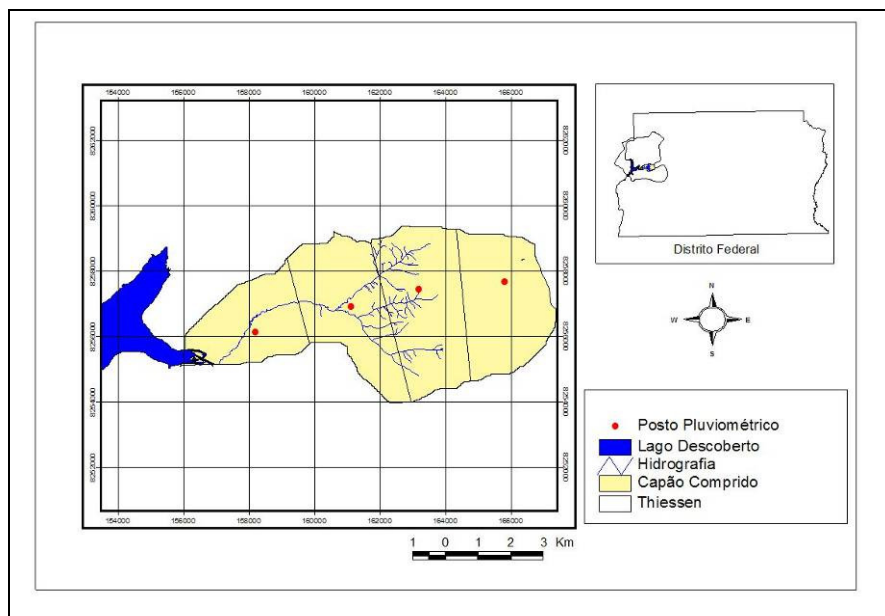


Figura 5.32 – Representação dos polígonos de *Thiessen*.

5.3.4 – Dados Planialtimétricos

Para compilação e interpretação dos pontos levantados foram utilizados os *softwares* topoGRAPH e AutoCAD. Esses programas foram utilizados para elaborar o perfil transversal da seção de controle e também fazer interpolações para ter um levantamento da área que circunda a seção.

A elaboração da planta da área foi feita utilizando os dados coletados para toda a seção transversal e mais três pontos circunvizinhos que foram extrapolados.

5.4 – MODELAGEM COMPUTACIONAL UTILIZANDO KINEROS2

Buscando responder a um dos objetivos deste estudo, foi feita modelagem computacional utilizando o modelo KINEROS2, existente na ferramenta *Automated Geospatial Watershed Assessment* (AGWA), que integra o modelo com ferramentas de geoprocessamento, pois, o mesmo é uma extensão para o *software Arcview*. Sabe-se que a utilização dessa ferramenta foi escolhida por ter uma implementação bem mais simples, pois o mesmo possui tabelas com valores de parâmetros mundiais de solo e cobertura vegetal. Ao utilizar esses valores se buscou mostrar a capacidade, ou não de representar a realidade por meio da modelagem sem obtenção de parâmetros em campo. É importante observar que a utilização de valores previamente definidos não impede que a ferramenta seja utilizada com parâmetros medidos em campo ou calibrados quando não existir medição, o que não é objeto deste estudo.

Como já foi dito, para utilizar o KINEROS2 integrado à extensão AGWA é necessário ter como dados de entrada, Modelo Digital de Elevação (MDE), *grid* de Cobertura do Solo, dados de solo e de precipitação. A seguir está apresentado, de forma mais detalhada, os dados de entrada para o Capão Comprido.

5.4.1 – Delineação e Discretização da Bacia Hidrográfica

Delimitar o contorno da bacia é o primeiro passo necessário. Posteriormente se definem os canais que formam o corpo hídrico e por fim, se discretiza a bacia em planos. Para que isso aconteça é necessário ter um Modelo Digital de Elevação (MDE) do terreno. No caso do Capão Comprido, existe o estudo realizado por CODEPLAN (1992) que apresentou mapas topográficos planialtimétricos do Sistema Cartográfico, em formato digital, na escala original de 1:10.000.

Dos mapas, em formato digital, apresentados por CODEPLAN (1992), extraíram-se as curvas de nível que foram transformadas para o formato TIN e posteriormente para o formato matricial, resultando assim no modelo digital de elevações (MDE).

Com o MDE preparado foi realizado o processamento do terreno com extensão AGWA, escolhendo como exutório a seção de controle estudada e como resultado, obteve-se toda a delimitação da bacia, a delineação do corpo hídrico além, da divisão da bacia em planos e canais, como pode ser visto na Figura 5.33. A bacia foi dividida em 24 trechos de canais e 82 planos.

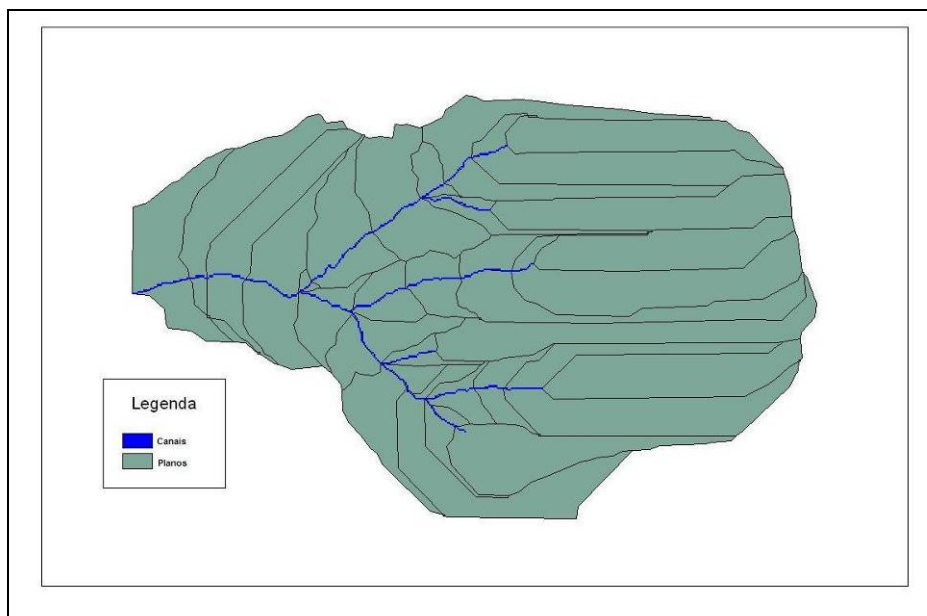


Figura 5.33 – Planos e canais definidos pelo *software* AGWA.

Um fato importante que merece ser citado é a consideração do local da seção de controle como sendo o exutório da simulação.

5.4.2 – Cobertura Vegetal e Parametrização do Solo

Com a etapa da delimitação e discretização da bacia concluída, foi possível entrar com os dados de cobertura vegetal e parametrização do solo. Para isso utilizou-se a distribuição dos tipos de solos apresentados por Reatto *et al.* (2003a) e mostrados na Figura 3.7, para adaptar à classificação, com todos os parâmetros do solo requisitados pelo modelo, apresentada no estudo de FAO/UNESCO (2003), já que, esta é plausível de interpretação pelo *software*. A Tabela 5.2 contém os tipos de solo definidos por Reatto *et al.* (2003a) e a respectiva tipologia na classificação apresentada por FAO/UNESCO (2003).

Importante comentar que a classificação apresentada por FAO/UNESCO (2003) para a região do Distrito Federal apresentava apenas um tipo de solo e como o estudo de Reatto *et al.* (2003a) era bastante completo, a adaptação foi considerada uma solução pertinente e foi feita correlacionando as classes de solo que mais se aproximavam, em cada um dos estudos.

Tabela 5.2 – Tipos de Solos existentes, definidos por Reatto *et al.* (2003a) e sua respectiva classificação por FAO/UNESCO (2003)

Tipo de Solo	Classificação FAO	Snum
Cambissolo Háplico	Ap1-3a	5389
Gleissolo Háplico	Fa2-3a	5419
Latossolo Vermelho	Fa6-3a	5424
Latossolo Vermelho - Amarelo	I-Fo-Lf-b	5524

Com relação à cobertura vegetal local e os parâmetros derivados desta, foi utilizada classificação (Figura 5.34) feita com o *software Arcview*, por Santos (2010). Nessa classificação existiam 4 tipos de cobertura que foram adaptados para os tipos passíveis de interpretação pela interface AGWA.

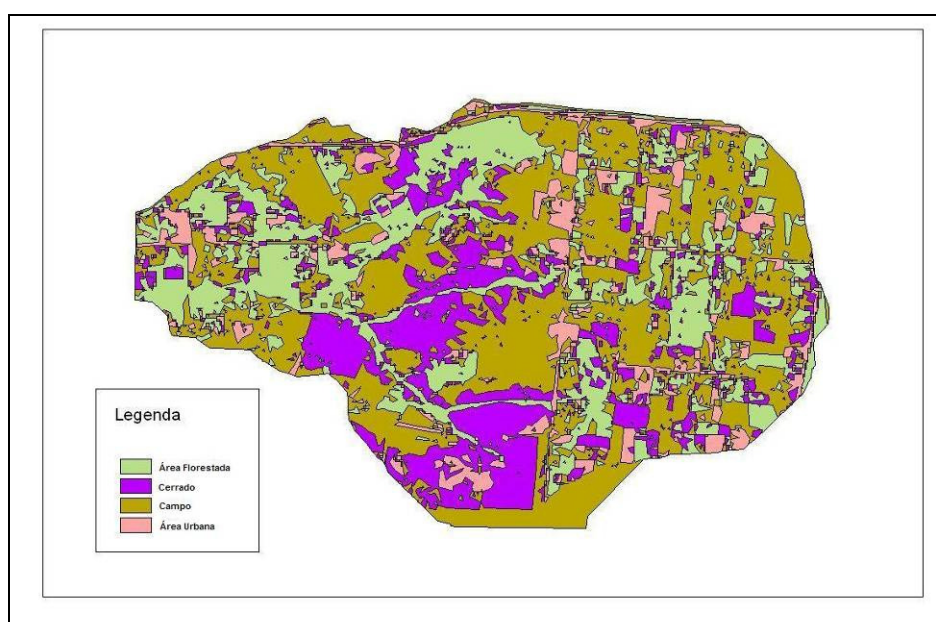


Figura 5.34 – Classificação da Cobertura vegetal e uso do solo no Capão Comprido (Adaptado de Santos (2010)).

Faz-se necessário comentar que os tipos de vegetação e uso de solo foram relacionados com tipos pré-existentes no *software* AGWA, utilizando os mais representativos.

5.4.3 – Precipitação

Foram escolhidos alguns eventos de precipitação que aconteceram durante o ano hidrológico estudado e esses utilizados como dados de entrada nesta etapa. Os valores de chuva foram considerados como coletados a cada 15 minutos, em um único local, com localização central na bacia, e com valores de precipitação igual à chuva média da bacia.

A Tabela 5.3 apresenta os valores precipitados, seus respectivos períodos e a saturação do solo para os eventos utilizados nas simulações.

Tabela 5.3 – Eventos de Precipitação utilizados na simulação com KINEROS2

Evento	Início	Final	Precipitação (mm)	Saturação (%)
01	10.11.08 às 16:45	10.11.08 às 20:45	78,7	30
02	26.11.08 às 16:30	27.11.08 às 00:45	41,1	50
03	27.11.08 às 13:45	27.11.08 às 20:00	50,0	80
04	22.01.09 às 15:45	22.01.09 às 18:00	31,0	60
05	14.02.09 às 16:30	14.02.09 às 22:30	35,1	75
06	23.03.09 às 11:00	23.03.09 às 13:00	33,8	80
07	03.04.09 às 20:45	04.04.09 às 05:00	39,4	70

A saturação do solo é um parâmetro bastante sensível no modelo. Para defini-la, em cada evento estudado, foram analisadas as características das precipitações antecedentes aos eventos e arbitrou-se valor representativo. É importante comentar que o evento 1 foi o primeiro evento chuvoso do ano hidrológico 2008-2009 e por esse motivo teve saturação considerada baixa. Já os eventos 03 e 06 aconteceram em situação de grande quantidade de chuva nos dias precedentes e por isso a saturação foi considerada elevada.

6 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho foi proposto elaborar diversos estudos na área hidrológica e hidrossedimentológica para a sub-bacia do Capão Comprido e neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos e as discussões levantadas.

6.1 – PLUVOMETRIA

Com os postos pluviométricos definidos e as falhas preenchidas, foi possível encontrar alguns valores importantes para a análise do ano hidrológico estudado, como a chuva total que teve um valor de 1474,09 mm, valor 3,38% superior ao verificado no ano hidrológico 2007-2008 e 8,99% superior ao 2006-2007. A precipitação média diária foi estimada em 3,82 mm.

Uma avaliação mensal da precipitação é apresentada na Figura 6.1 para o ano hidrológico estudado. Na Figura 6.2 é mostrado gráfico com a chuva média verificada em cada mês, tomando como base os dados pluviométricos coletados desde a instalação dos pluviógrafos, em 2006.

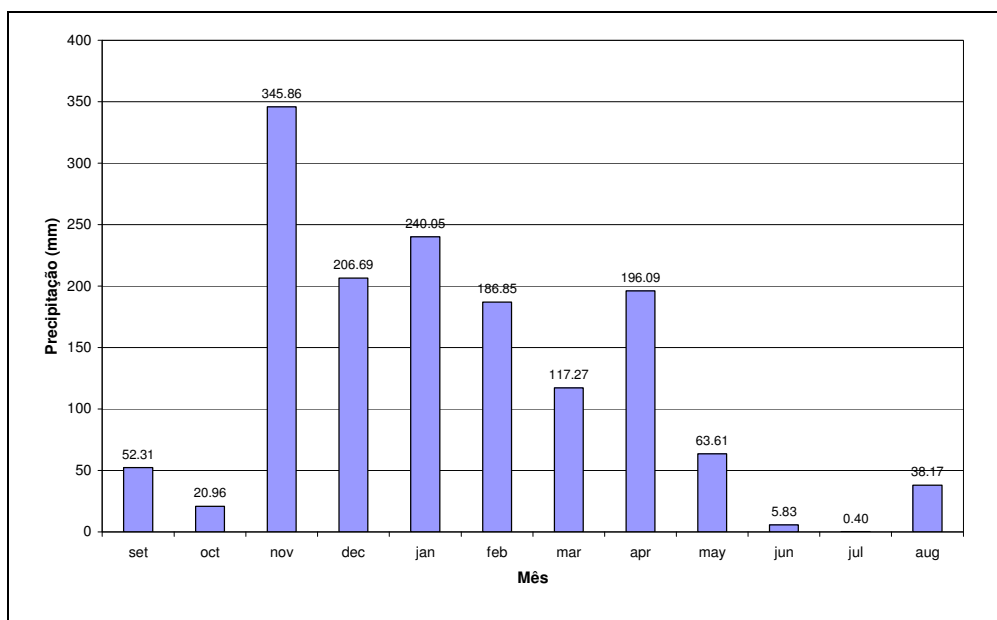


Figura 6.1 – Precipitação total mensal para o ano hidrológico 2008-2009.

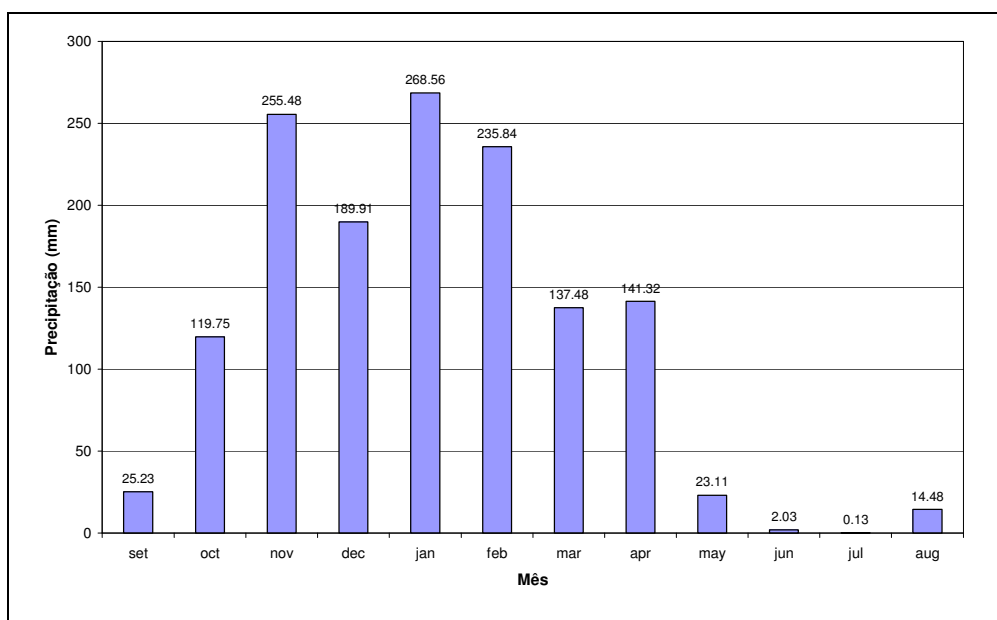


Figura 6.2 – Precipitação média por mês para o período de 2006-2009.

Ao analisar os dados apresentados nas Figuras 6.1. e 6.2 percebe-se que o ano hidrológico estudado pode ser considerada atípico já que o período chuvoso teve fim tardio, ao comparar com o período chuvoso médio entre 2006 e 2009. Como os dados foram

coletados durante apenas três anos, essa atipicidade influencia bastante na média, como pode ser notado na Figura 6.2. No entanto, dados regionais indicam que de fato ocorreram variações pluviométricas em abril e maio, bastante superiores ao normal.

6.2 – PLANIALTIMETRIA

A seção de controle estudada está apresentada na Figura 6.3 e tem seu perfil principal, inundável com maior frequência, com uma máxima elevação de 2,08 metros. É necessário sempre conhecer o perfil da seção estudada, para perceber as variações que podem acontecer nos períodos chuvosos. Também foi importante obter essa seção para poder extrapolar a curva-chave de descarga pela metodologia de *Stevens*.

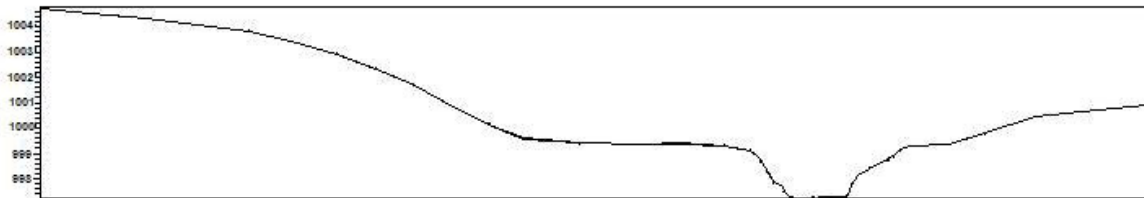


Figura 6.3 – Perfil transversal da seção de controle

A planialtimetria da área que circunda a seção de controle é apresentada na Figura 6.4 e como já foi dito foi realizada a partir de levantamento de toda a seção.

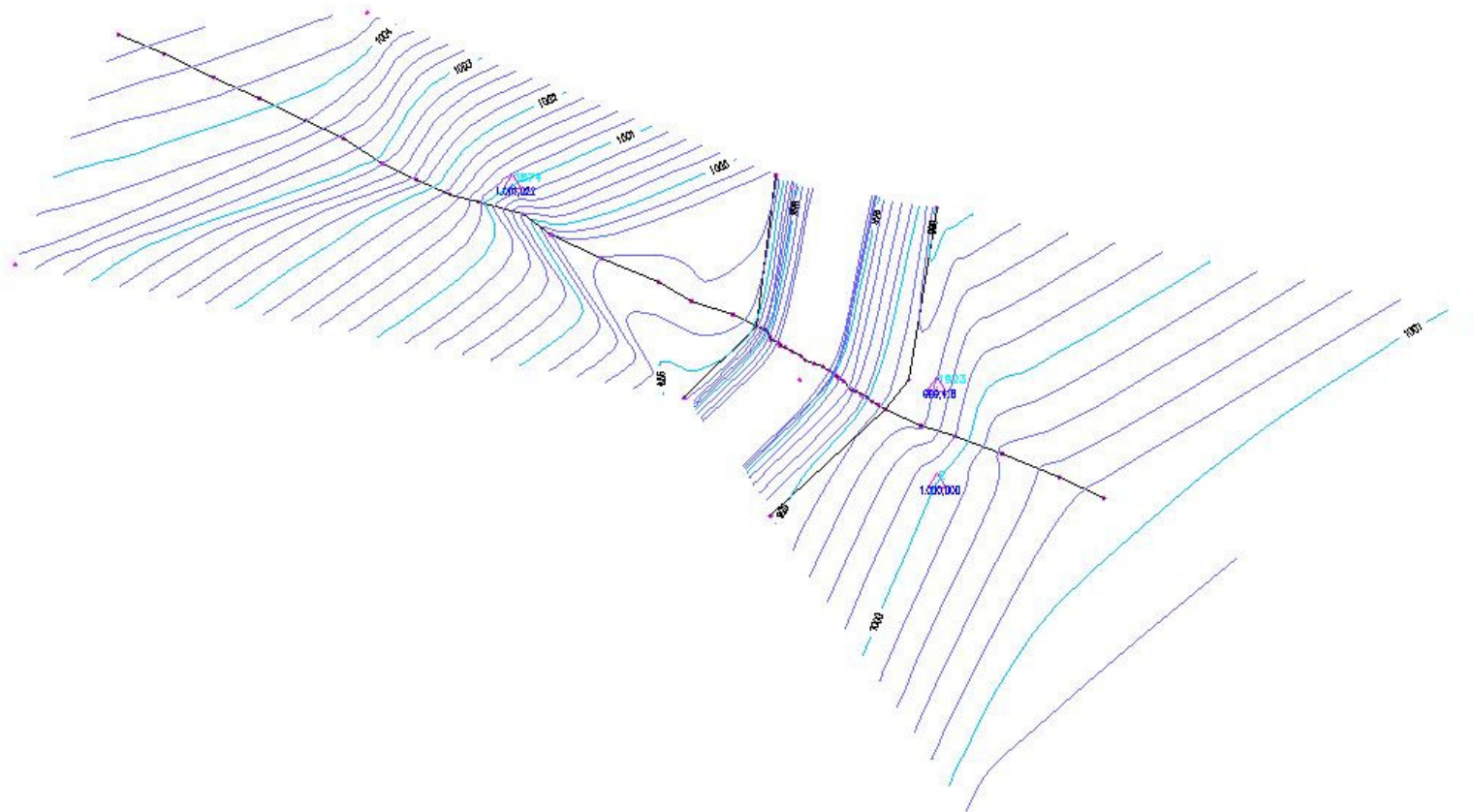


Figura 6.4 – Planta da área que circunda a seção de controle e pontos coletados

6.3 – FLUVIOMETRIA

Analisando a Figura 5.21 observa-se que, entre os métodos, a extrapolação por equação polinomial apresenta maiores desvios com o aumento da cota régua, quando comparado com o método de Stevens. Já a extrapolação pelo modelo potencial apresenta-se mais próximo aos valores obtidos pelo método de Stevens, que por ser baseado em parâmetros hidráulicos da calha do rio, sugere maior confiabilidade, principalmente em seções homogêneas. Por isso e por ser o tipo de equação indicado pela bibliografia, a potencial, equações 5.4 e 5.5, são as que levam a valores mais confiáveis e portanto elas foram utilizadas para construir a curva-chave para o período “1” e para o período “2” até a cota limite de 1,72. Acima dessa foi utilizada a equação 5.6 para a construção das curvas cota X descarga para as duas tendências.

As Figura 6.5 e 6.6 apresentam as curvas-chave de vazão para o período “1” e para o “2” até a cota máxima de 4 metros. A equação 5.4, até o valor da cota igual a 1,72 m, e a equação 5.6, acima dessa cota, descrevem a curva-chave que representa o período denominado “1”, que corresponde ao período entre março de 2006 e fevereiro de 2008. Para o período chamado “2”, de fevereiro de 2008 até maio de 2009, a equação 5.5 até o valor da cota de 1,72 e a equação 5.6, acima dessa cota, constituem-se na curva-chave ajustada.

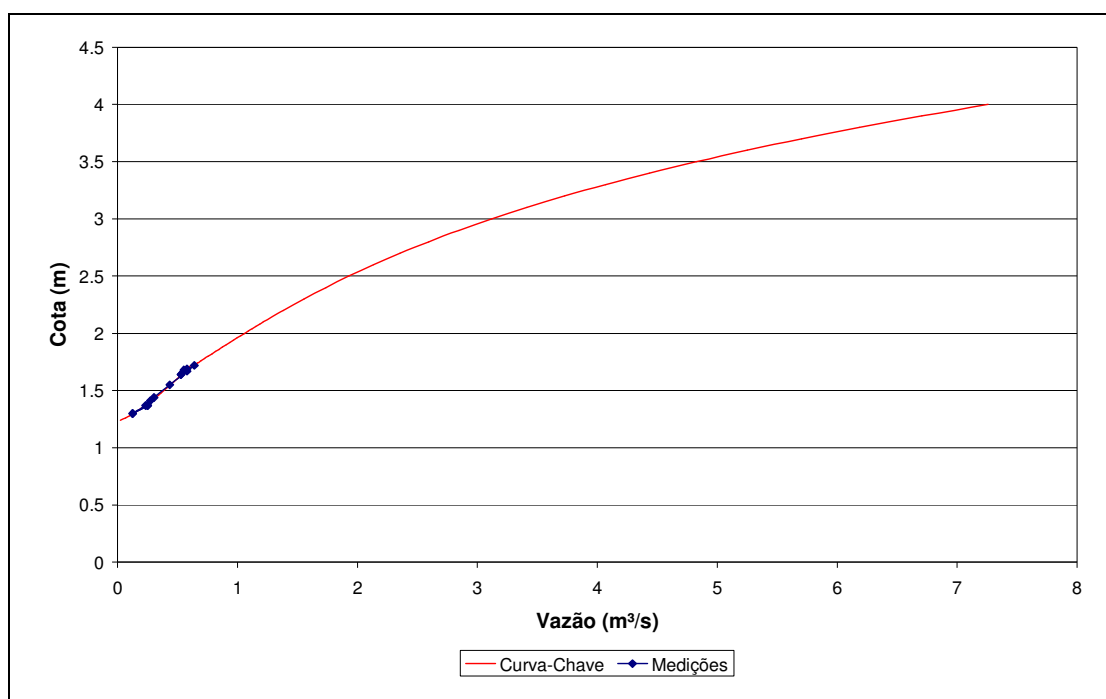


Figura 6.5 – Curva chave para o período “1”.

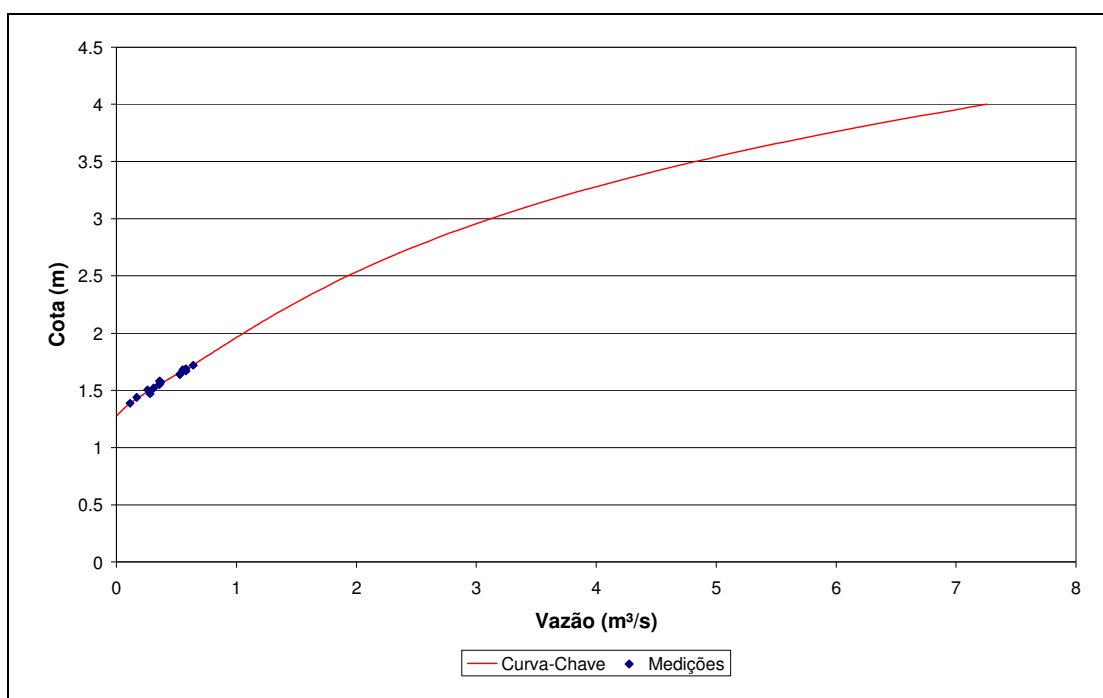


Figura 6.6 – Curva chave para o período “2”.

Buscando uma avaliação das curvas-chave propostas, utilizou-se o método racional em que a intensidade da precipitação (i), o pico da vazão (Q) e a área de drenagem (A) eram conhecidos e assim, encontrou-se o valor do coeficiente c , que para a bacia em questão deve estar entre 0,08 e 0,41, já que se trata de uma área com cobertura do solo caracterizada por cultivo agrícola.

$$Q = c \times i \times A \quad 6.1$$

Foi necessário encontrar a precipitação com a maior intensidade e o respectivo pico de vazão. Para a precipitação se levou em conta a média regional entre os 4 pluviômetros existentes na bacia. Para o período “1” se utilizou a precipitação do dia 13/11/2007, com intensidade igual a 68,20 mm/dia e o pico de vazão igual a 3,38 m³/s, enquanto que para o período “2” a maior intensidade de precipitação coletada foi no dia 10/11/2008, com o valor de 73,04 mm/dia, e vazão máxima equivalente a 4,87 m³/s.

Como resultado, foi estimado um valor de c igual a 0,261 para o período “1” e 0,351 para o período “2”, mostrando que os valores de vazão encontrados são bastante satisfatórios, já que o valor de c ficou dentro da faixa esperada.

Fragoso (2008) propôs uma curva-chave de vazão e a mesma não contemplou extrapolação por nenhuma metodologia consagrada e também não continha, em seus dados, coletas em vazões altas. Buscando comparar a proposição feita pela autora com a que é feita neste estudo foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 6.7 que contém as duas curvas-chaves de vazão, lembrando que o período da curva proposta por Fragoso (2008) é representado pelo período “1” proposto nesse estudo.

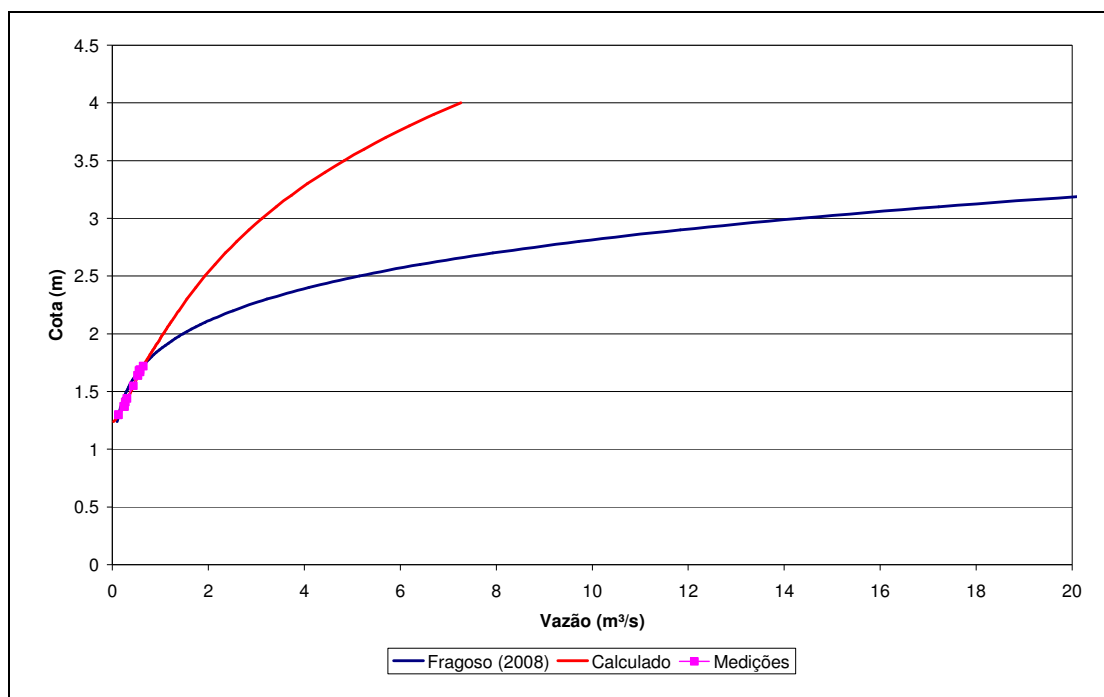


Figura 6.7 – Comparativo entre a curva-chave de vazão proposta e a de Fragoso (2008)

Analisando o gráfico nota-se que o ajuste para as vazões mais altas na curva proposta por Fragoso (2008) não é razoável. Ao verificar os dados percebe-se que até a vazão 0,61 m³/s a curva proposta pela autora está próxima da apresentada neste trabalho, mas a partir deste valor elas vão se separando de uma forma cada vez mais acentuada.

Como já foi dito anteriormente, existem dados linigráficos e medidos desde março de 2006 até a atualidade e assim, foi possível analisar um bom número de dados e retirar algumas informações, além de elaborar gráfico das vazões calculadas *versus* o ano hidrológico estudado.

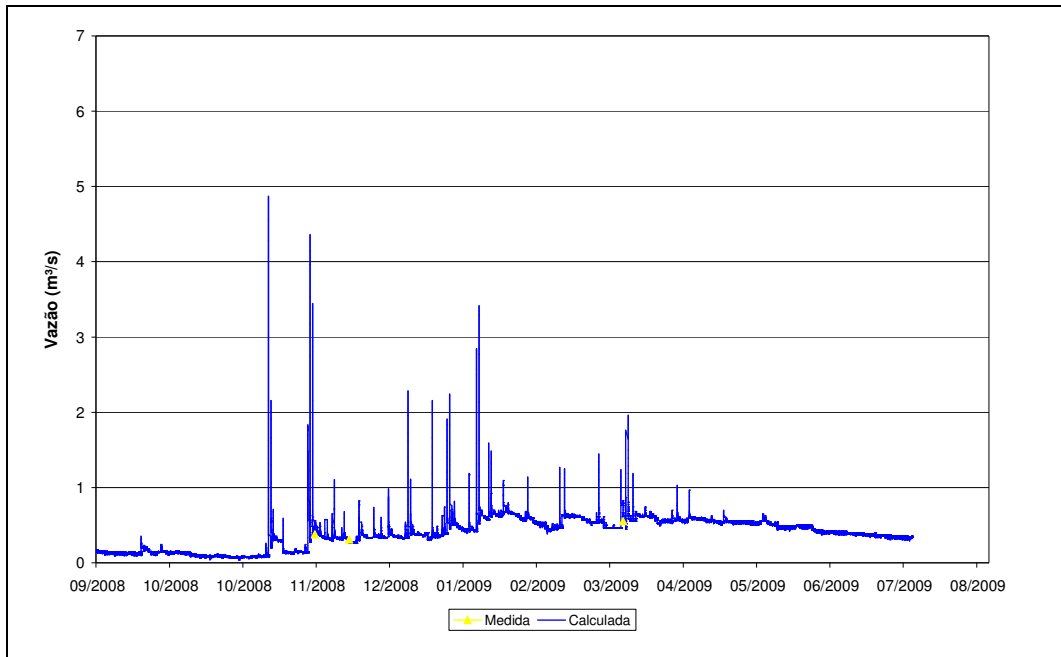


Figura 6.8 – Vazão Calculada (m^3/s) utilizando as cotas medidas e a curva-chave no período de setembro/2008 à agosto/2009

A vazão média desse corpo hídrico apresentou um valor de aproximadamente $0,39 m^3/s$ para o último ano hidrológico analisado.

Para visualizar a intensidade das chuvas e sua reação com a vazão é apresentado na Figura 6.9 o gráfico que mostra a vazão e a precipitação no tempo para o ano hidrológico estudado.

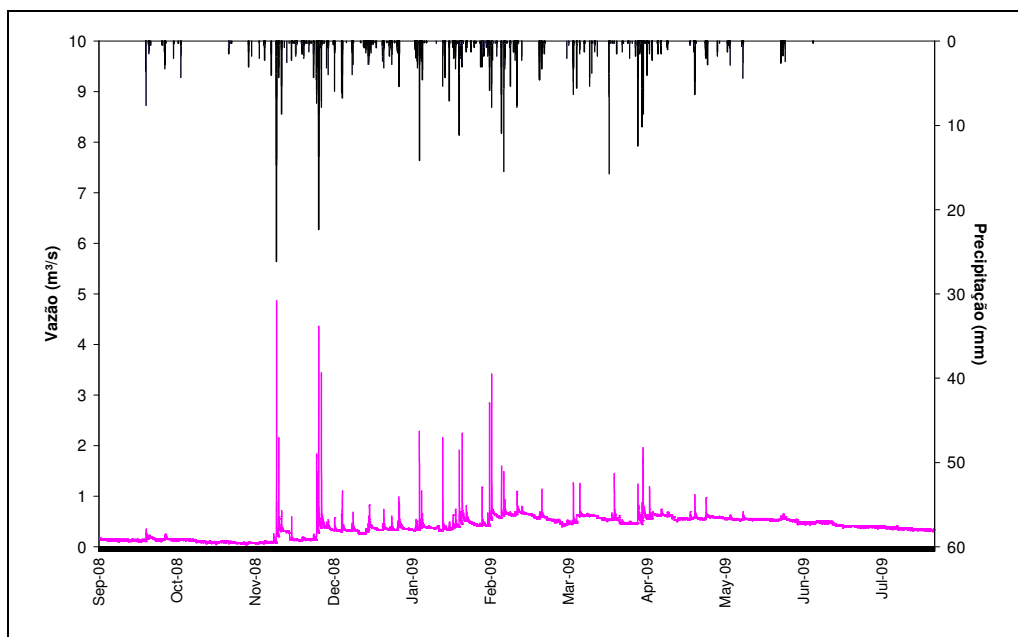


Figura 6.9 – Vazão (m^3/s) e Precipitação (mm) versus tempo (setembro/2008 à agosto/2009)

6.4 – HIDROSSEDIMENTOLOGIA

Com os dados da hidrossedimentológicos analisados foi possível calcular os resultados de carga de sedimentos em suspensão. É importante comentar que alguns dias após a finalização do trabalho de campo ocorreu um desbarrancamento de terra importante na margem do córrego, a montante da seção de controle (Figura 6.10). Em decorrência desse fato, uma grande quantidade de sedimentos foi lançada no corpo hídrico e o transporte ocorreu durante um longo intervalo de tempo.



Figura 6.10 – Desbarrancamento de encosta a montante da seção de controle.

Os cálculos hidrossedimentológicos por meio da curva-chave de sedimentos obviamente não acusaram esse desbarrancamento, já que não foram coletadas amostras após o evento. Porém as estimativas utilizando dados de turbidez e as equações de correlação entre turbidez e concentração de sedimentos mostram o aumento da carga em suspensão.

6.4.1 – Curva-Chave de Sedimentos

Para construir a curva-chave de sedimentos foi utilizada a equação 5.7, para dados de vazão inferiores a $0,65 \text{ m}^3/\text{s}$ e a equação 5.8 para os superiores. Como resultado obteve-se a curva apresentada na Figura 6.11. Analisando a curva nota-se uma clara elevação na vazão sólida de sedimento (Q_{ss}) quando acontecem altas descargas, o que já era esperado e é indicado pela bibliografia especializada.

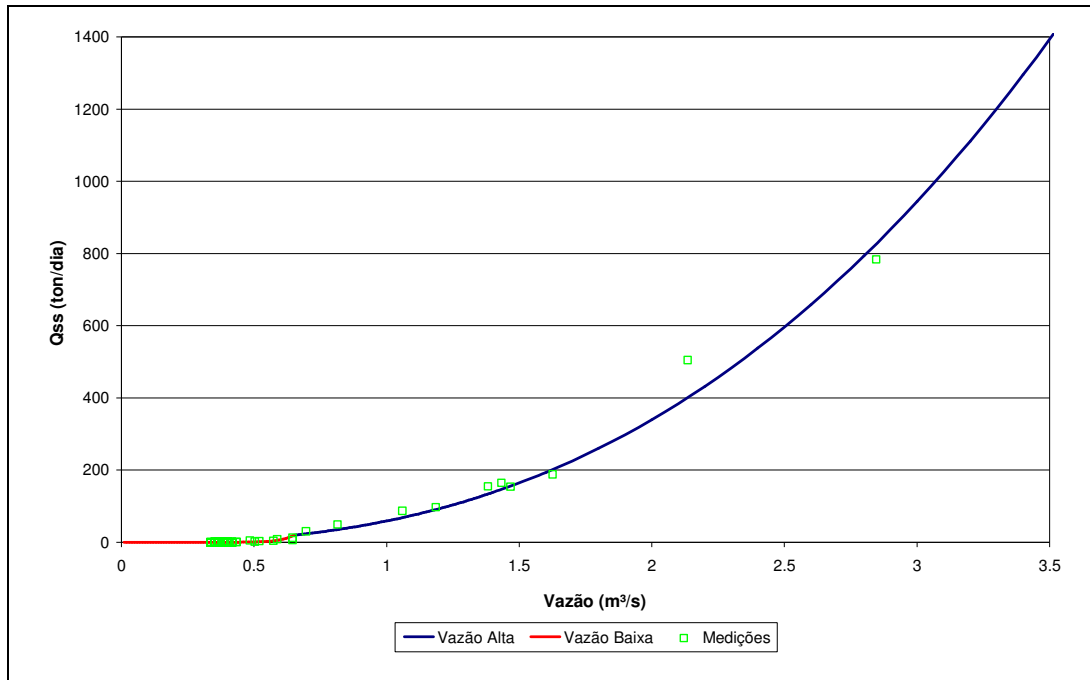


Figura 6.11 – Curva-Chave de Sedimentos para o Capão Comprido

A Figura 6.12 apresenta a Curva-chave de sedimento com escala maior e mostrando a parte inferior da curva, para que seja possível se ter uma melhor visualização. Esses valores representam a situação local com maior permanência, nesse intervalo.

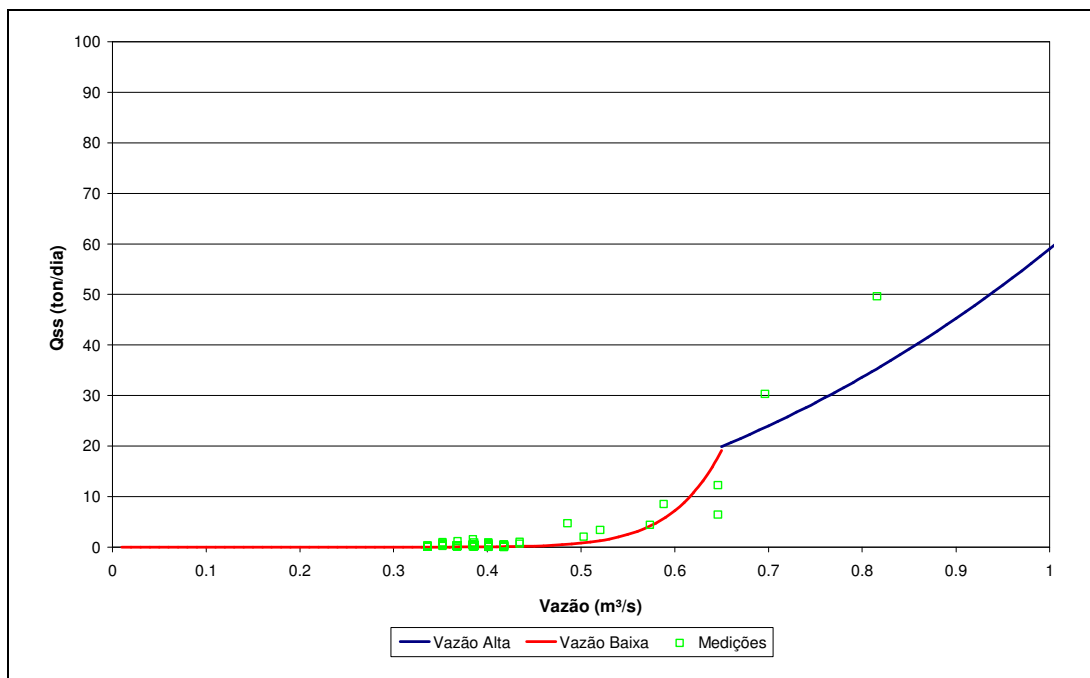


Figura 6.12 – Zoom na “parte baixa” da Curva-Chave de Sedimentos para o Capão Comprido

Analisando a Figura 6.12 percebe-se que a utilização de duas tendências diferentes para vazões baixas e altas foi uma solução interessante já que existe uma clara diferença após a vazão de 0,65 m³/s.

6.4.1.1 – Comparação com a Curva-Chave de Sedimento existente

Bicalho (2006) apresentou proposta de curva-chave de sedimento para a bacia em questão e a mesma pode ser considerada bastante limitada, já que, a autora conseguiu obter poucas amostras em campo e todas foram em situações de baixa vazão. Buscando comparar a proposição feita por pela autora com a que é feita neste estudo foi elaborado gráfico apresentado na Figura 6.13 que contém as duas curvas-chaves de sedimento.

Analisando a Figura 6.13 nota-se que a curva proposta por Bicalho (2006) subestima o transporte de sedimento durante os eventos de cheia, como era esperado, já que no seu estudo não conseguiu coletar informações representativas desse tipo de evento.

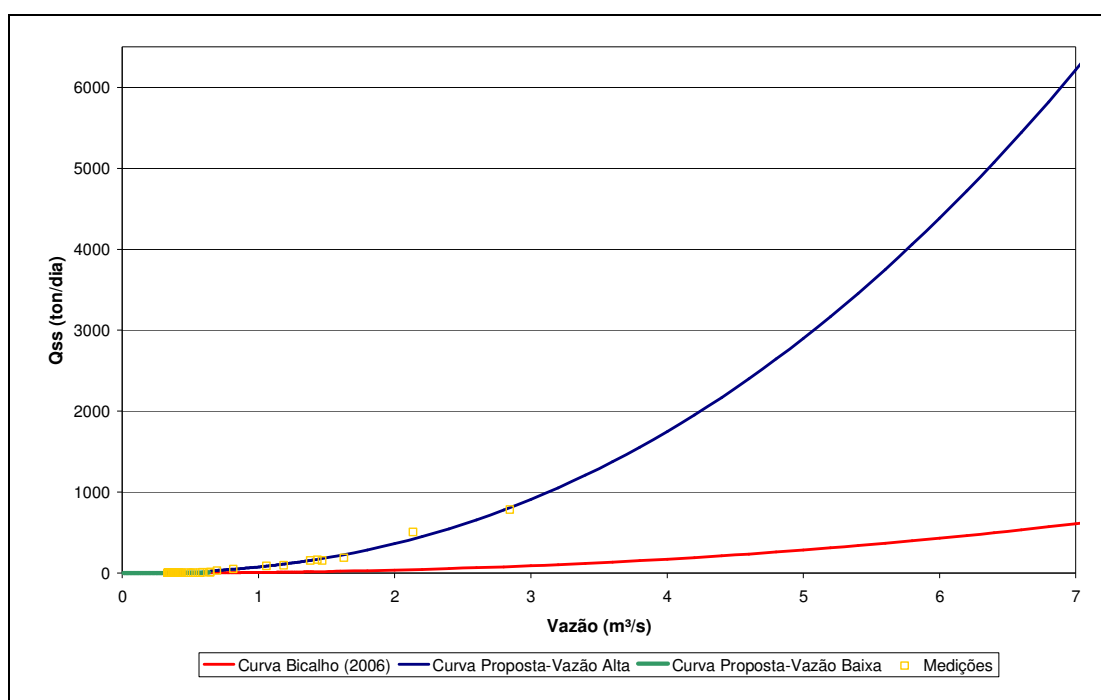


Figura 6.13 – Comparativo entre a Curva-Chave de Sedimento proposta e a de Bicalho (2006)

6.4.1.2 – Total de Sedimento transportado

As amostras de sedimentos utilizadas para elaborar a curva-chave foram coletadas durante o ano hidrológico que vai do início de setembro de 2008 até o fim de agosto de 2009. Desse modo foi possível calcular o sedimento total transportado em suspensão no ano

hidrológico em questão, que chegou ao valor de 1552,69 toneladas. É importante lembrar que esse valor não leva em consideração a carga gerada pelo desbarrancamento apresentado na Figura 6.10.

Ao se comparar com o total transportado estimado com base na curva-chave de sedimentos proposta por Bicalho (2006) percebe uma grande diferença, já que o valor encontrado é de 467,05 toneladas no ano, o que representa um resultado 69,91% inferior ao encontrado nesse estudo.

Tentando representar a situação que utiliza duas medições de cota por dia, uma realizada às 7 e a outra as 17 horas (metodologia de medição utilizada pela CAESB) obteve-se um valor de 1100,65 toneladas de sedimentos transportados no ano hidrológico estudado. Já considerando 4 medições diárias, realizadas às 0, 6, 12 e 18 horas apresentou um resultado de 1716,96 toneladas, que é bem próximo do valor calculado utilizando medições a cada 15 minutos.

Tabela 6.1 – Total de Sedimento Transportado por ano hidrológico utilizando diferentes intervalos de medição

Medição	Sedimento Transportado (ton)
15 minutos	1552,69
7 e 17 horas	1100,65
0, 6, 12 e 18 horas	1716,96

Analisando os dados percebe-se que a proposição com duas medições diárias subestimou o total de sedimento transportado em 29,11%. Já a proposta com quatro medições diárias obteve uma super-estimativa de 10,50%, que pode ser considerado um valor satisfatório.

6.4.2 – Correlação entre Turbidez e Concentração de Sedimento em Suspensão

A utilização de duas equações para definirem as tendências foi a solução encontrada e implementada para correlacionar turbidez e concentração de sedimento em suspensão para duas diferentes correlações, já que, existe notável diferença de tendência entre os dados encontrados com vazões baixas e altas, como pôde ser visto nas Figura 5.28 e 5.29 .

Utilizar uma única equação para a correlação pode acarretar erros consideráveis na carga total de sedimentos, pois apesar da pequena concentração de sedimentos nas vazões baixas, essas têm maior permanência em pequenas bacias.

Sabe-se que foi possível obter 4 eventos com dados de turbidez e concentração de sólidos em suspensão. Desses eventos três (1, 2 e 3) foram utilizados para correlacionar os dados e um para verificar (4). Posteriormente se propôs buscar correlacionar turbidez e concentração de sólidos em suspensão apenas com evento (2) que tinha dados de vazão baixa e alta, fazendo a verificar com os outros três eventos medidos (1, 3 e 4). A seguir estão apresentadas as duas correlações propostas.

6.4.2.1 – Correlação 1 - Utilizando dados dos eventos 1, 2 e 3

Com os pontos que representam os valores de turbidez e concentração de sedimentos definidos, para as duas tendências, se encontrou as equações lineares 6.2 e 6.3 para representar essas tendências, com divisor localizado em $T=390$ NTU.

$$C_{SS} = 0,0006 \times T + 0,0046 \quad \therefore \text{para } T < 390 \quad 6.2$$

$R^2 = 0,9239$
42 pontos correlacionados

$$C_{SS} = 0,0014 \times T - 0,1646 \quad \therefore \text{para } T > 390 \quad 6.3$$

$R^2 = 0,9084$
8 pontos correlacionados

Onde, C_{SS} (g/L) e T (NTU). Para verificar as equações foram comparados os valores da Concentração de Sólidos Suspensos, coletados nas amostras do evento 4, com os calculados utilizando as equações 6.2 e 6.3. O resultado, apresentado na Figura 6.14, pode ser considerado satisfatório, tendo em vista que, os valores calculados e observados foram próximos, mas, também é importante comentar que é preciso obter uma maior quantidade de amostras para construir uma correlação ainda mais representativa e confiável. A existência de pequenas diferenças entre os dados medidos e os estimados podem ser explicadas por imprecisão na medição da turbidez, já que o equipamento de medição está sujeito a variações por estar com seu sensor inserido no corpo hídrico.

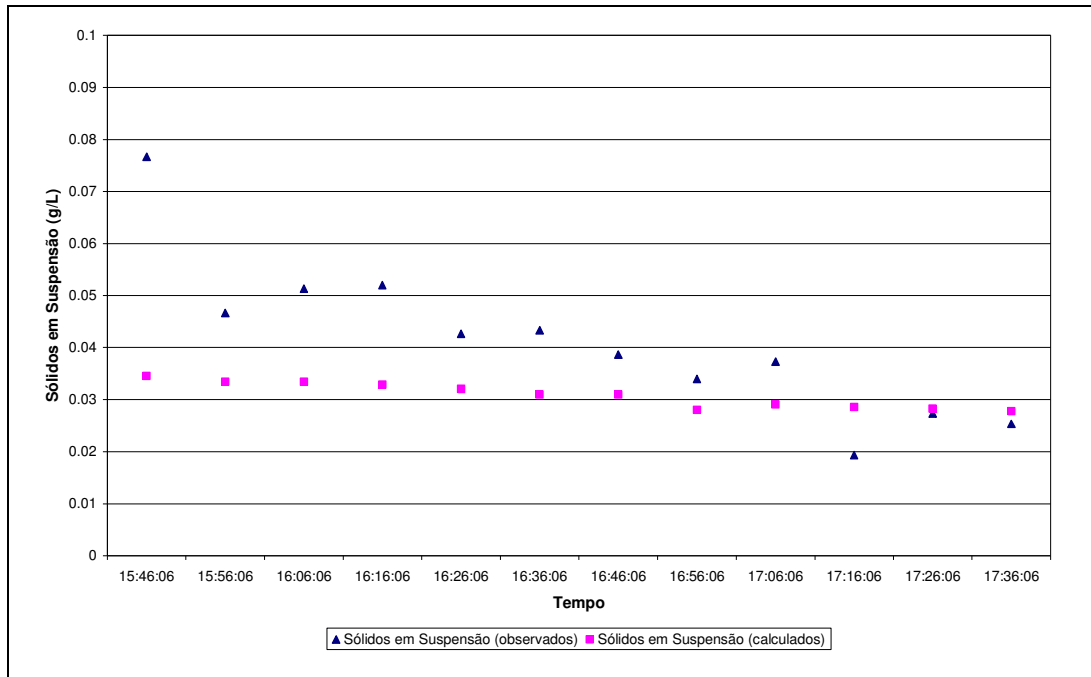


Figura 6.14 – Validação das equações de correlação através das amostras do evento 4.

6.4.2.2 – Correlação 2 - Utilizando dados do evento 2

A correlação entre valores de turbidez e concentração de sedimentos, utilizando dados de apenas o evento 2 também levou a duas equações para descrever as tendências existentes. As equações são lineares e o divisor entre as tendências está localizado no valor de turbidez igual a 145,5 NTU.

$$C_{SS} = 0,0008 \times T + 0,0002 \quad \therefore \text{para } T < 145,5 \quad 6.4$$

$$R^2 = 0,8272$$

16 pontos correlacionados

$$C_{SS} = 0,0012 \times T - 0,1348 \quad \therefore \text{para } T > 145,5 \quad 6.5$$

$$R^2 = 0,8949$$

6 pontos correlacionados

Em que, C_{SS} (g/L) e T (NTU). Compararam-se, separadamente, os valores da C_{SS} , coletados nas amostras dos eventos 1, 3 e 4, com os calculados, para o mesmo intervalo de tempo, utilizando as equações 6.4 e 6.5.

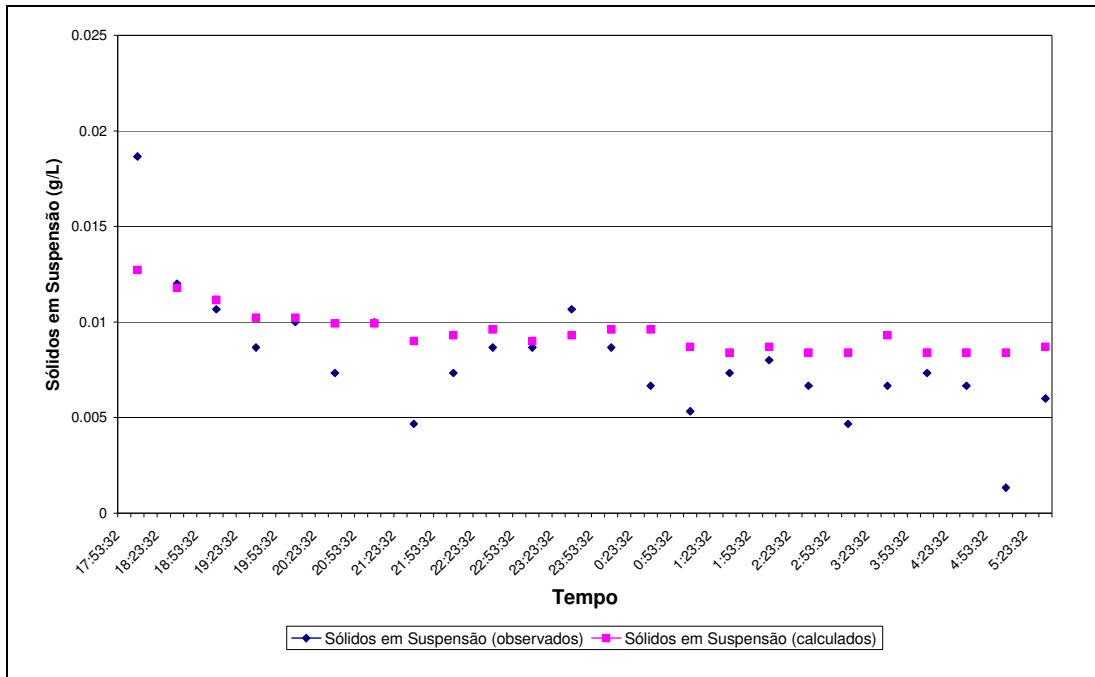


Figura 6.15 – Validação das equações de correlação através das amostras do evento 1.

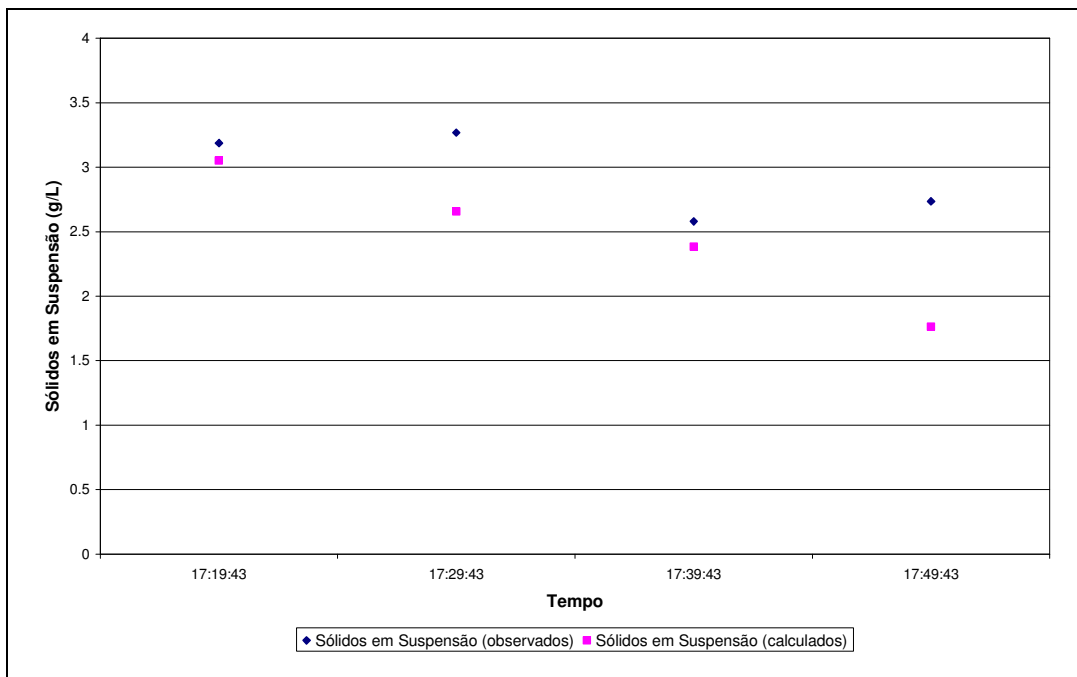


Figura 6.16 – Validação das equações de correlação através das amostras do evento 3.

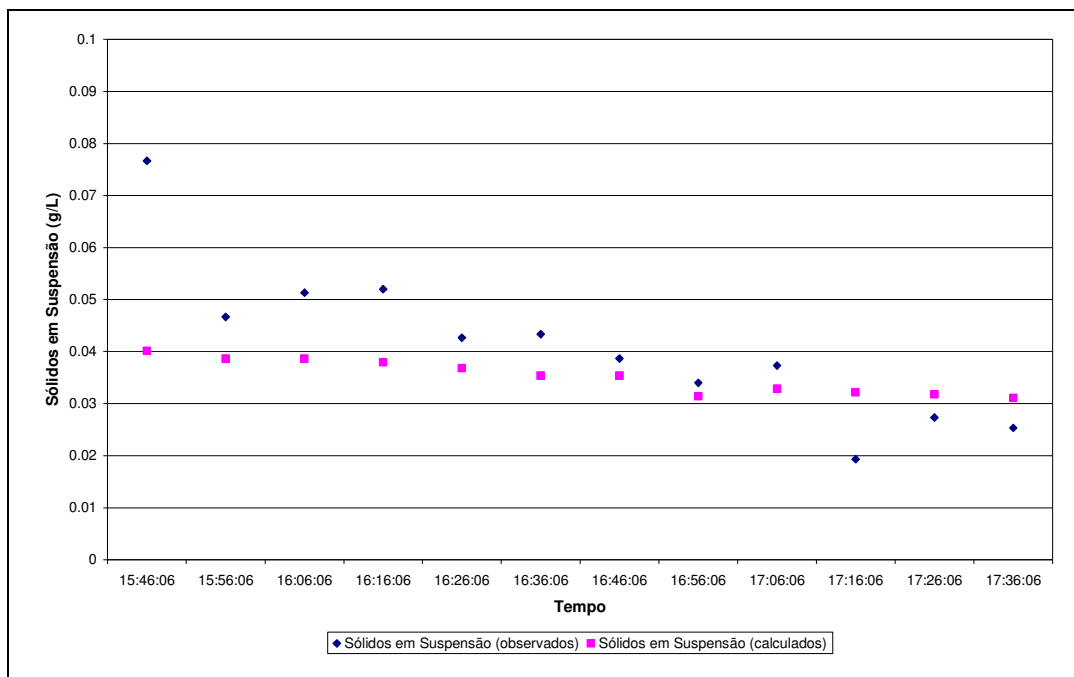


Figura 6.17 – Validação das equações de correlação através das amostras do evento 4.

Analisando as Figura 6.15, 6.16 e 6.17, pode-se considerar o resultado satisfatório, tendo em vista que os valores calculados e observados foram próximos, mesmo que a construção da correlação tenha sido feita apenas com valores encontrados durante única amostragem de campo. Deste modo, a utilização de poucos dados de campo contemplando situações com vazões altas e baixas se mostrou eficiente na representação da realidade e indicado para ser utilizado.

6.4.2.3 – Representação do desbarrancamento

Para ilustrar a capacidade de representar o desbarrancamento que a correlação entre turbidez e concentração de sólidos suspensos tem, foi *plotado* gráfico que contempla a concentração de sedimentos *versus* o tempo para as equações obtidas com os eventos 1, 2 e 3 (Equações 6.2 e 6.3) e também a concentração encontrada através da curva-chave de sedimentos, como pode ser visto na Figura 6.18.

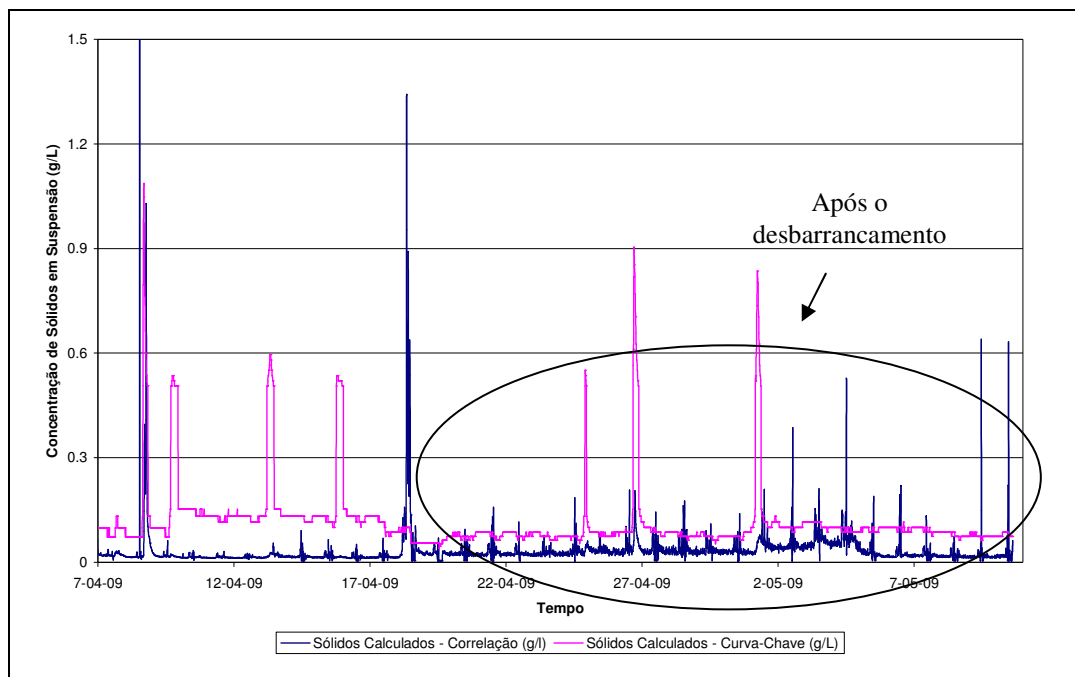


Figura 6.18 – Sólidos em suspensão calculados através da correlação e da curva-chave dando enfoque a parte que mostra a queda de barranco na encosta

Nota-se que no período destacado a seção recebeu sedimentos acima do normal por causa do desbarrancamento e a curva elaborada através da correlação entre turbidez e concentração de sólido em suspensão mostrou a existência de uma variação, tendo em vista que a turbidez nesse período se alterou. Obviamente, também se nota que a curva-chave de sedimentos não conseguiu perceber essa variação, já que, a mesma é diretamente ligada a vazão, que não se alterou com o desbarrancamento. É necessário lembrar que os valores dos dados não devem ser considerados, já que, não foi feita amostragem nesse período e por isso, os mesmos devem ter apenas um caráter ilustrativo.

6.5 – MODELAGEM UTILIZANDO KINEROS2

Com a modelagem dos 7 eventos utilizando o KINEROS2 através da extensão AGWA, foi possível encontrar resultados de fluxo e transporte de sedimento para a seção de controle estudada. Essas simulações tiveram como característica a utilização de parâmetros oriundos de tabelas e mapas de diversas regiões do mundo fornecidas pela ferramenta AGWA, como as características de solo apresentado por FAO/UNESCO (2003).

A Tabela 6.2 mostra os valores da vazão de pico (Q_p) e da descarga sólida de pico (Q_{ssp}) para cada um dos eventos. As Figura 6.19, 6.20, 6.21 e 6.22 apresentam os valores da vazão simulada e da vazão observada, encontrada através da curva-chave de descarga, e a

vazão sólida transportada simulada e observada, obtidas através da curva-chave de sedimentos, para os eventos 01, 03, 04 e 06.

Tabela 6.2 – Vazão de Pico(Q_p) e Descarga Sólida de Pico (Q_{ssp}) observada e calculada

Evento	Vazão de Pico Calculada (m³/s)	Vazão de Pico Observada (m³/s)	Descarga Sólida de Pico Calculada (ton/dia)	Descarga Sólida de Pico Observada (ton/dia)
01	12,21	4,87	123330,38	2154,20
02	0,00	1,83	0,00	275,48
03	12,68	4,36	121237,00	2394,68
04	0,07	1,91	364,50	305,75
05	0,00	1,09	0,00	75,64
06	2,26	1,45	12648,70	152,71
07	0,00	1,24	0,00	104,06

A simulação com os eventos 02, 05 e 07 teve como resultados vazão (Q) e descarga sólida (Q_{ss}) iguais a zero, por esse motivo os gráficos comparativos entre os valores simulados e os obtidos através da curva-chave de descarga e de sedimentos, para esses eventos, são apresentados apenas no Apêndice C.

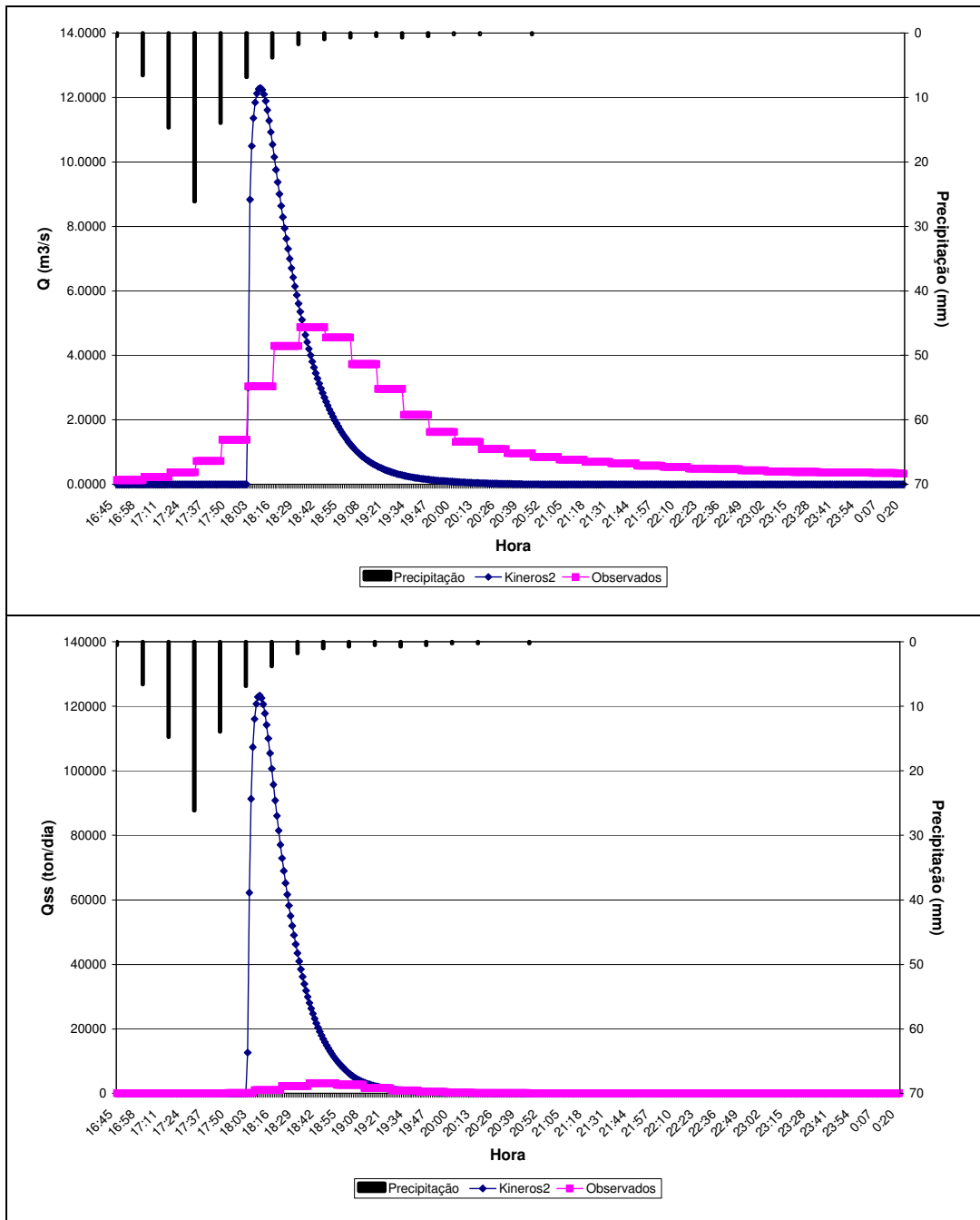


Figura 6.19 – Comparativo entre o resultado da simulação com o KINEROS2 e o valor observado para Vazão (m^3/s) e Descarga Sólida (ton/dia) – Evento 01.

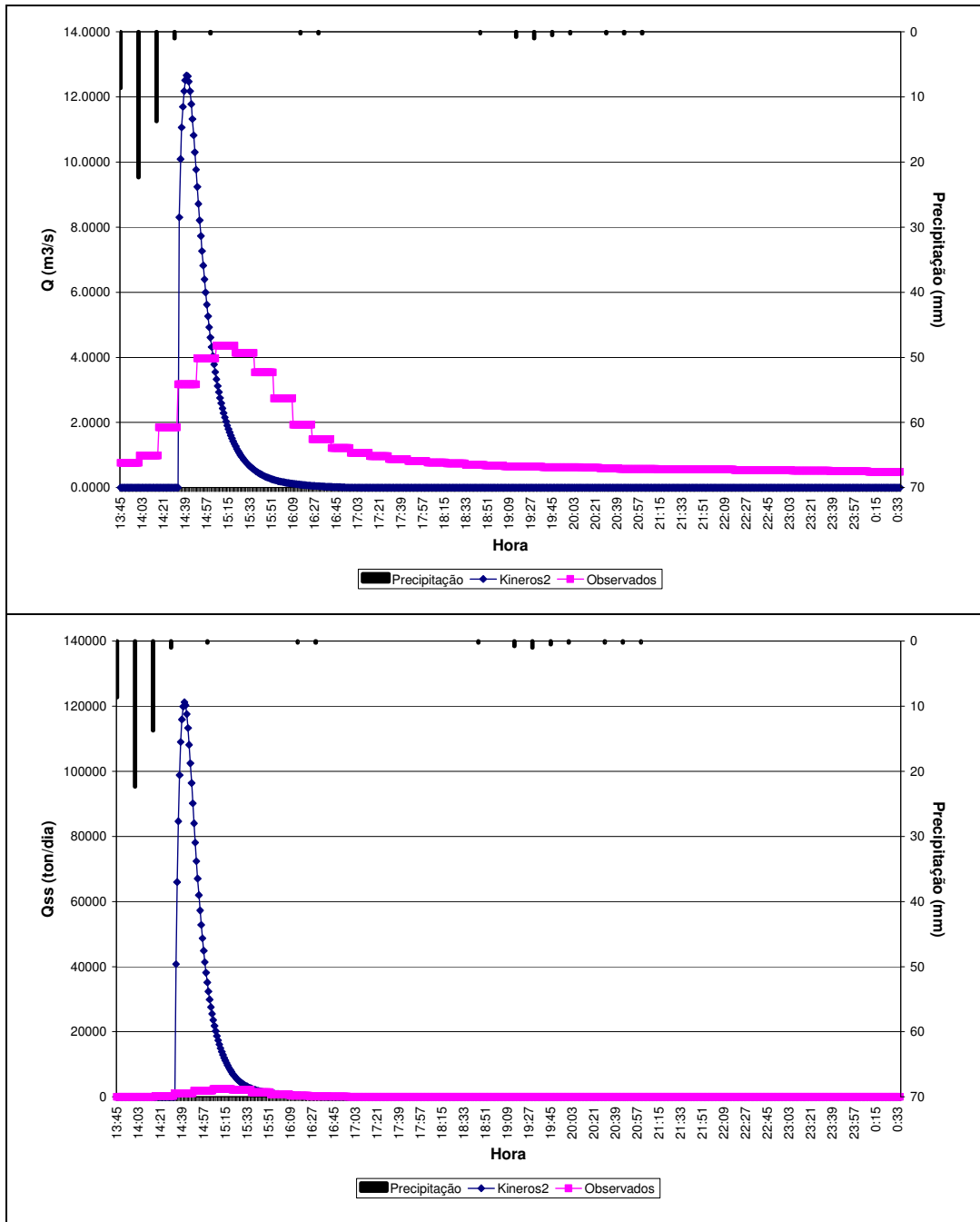


Figura 6.20 – Comparativo entre o resultado da simulação com o KINEROS2 e o valor observado para Vazão (m^3/s) e Descarga Sólida (ton/dia) – Evento 03.

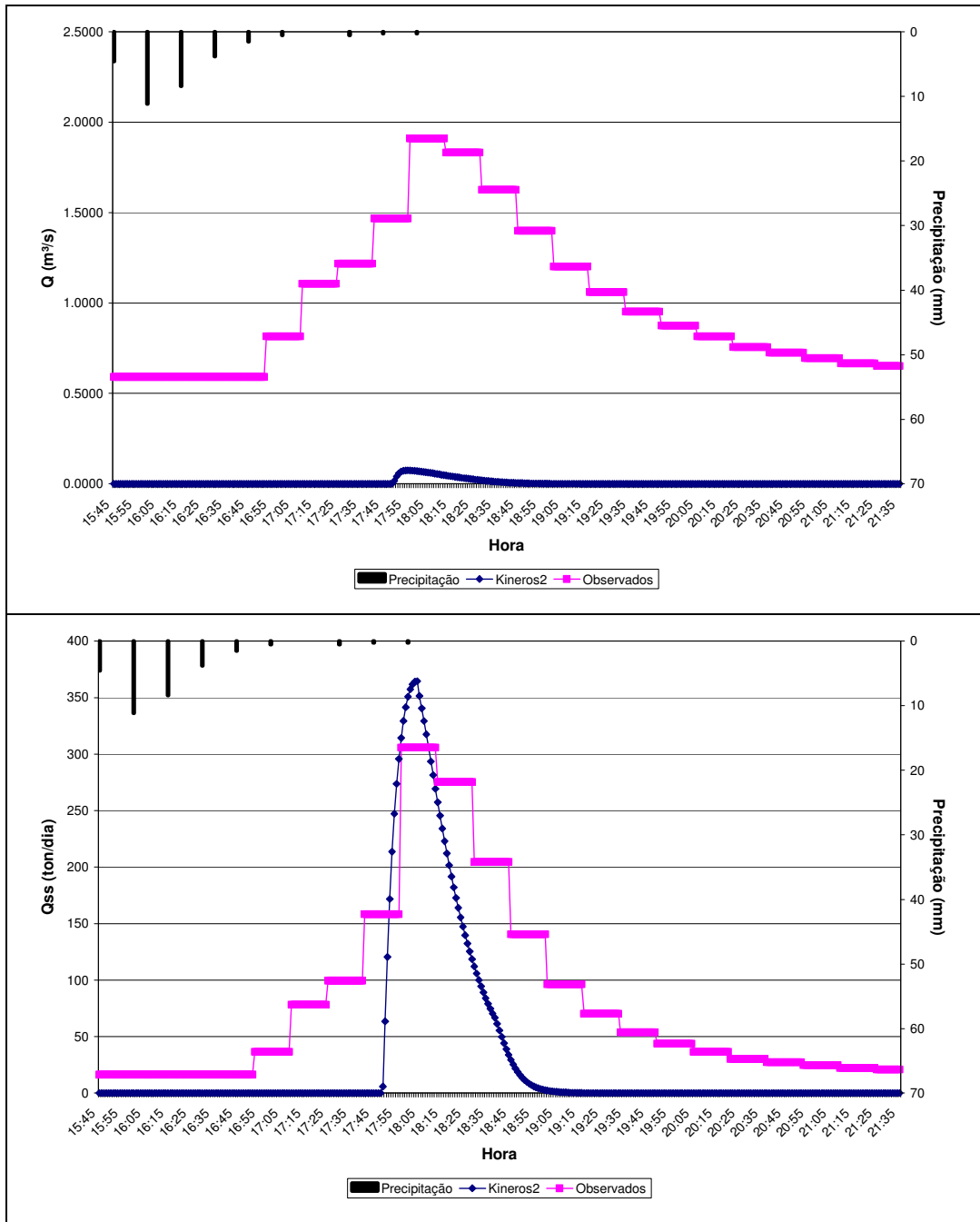


Figura 6.21 – Comparativo entre o resultado da simulação com o KINEROS2 e o valor observado para Vazão (m³/s) e Descarga Sólida (ton/dia) – Evento 04.

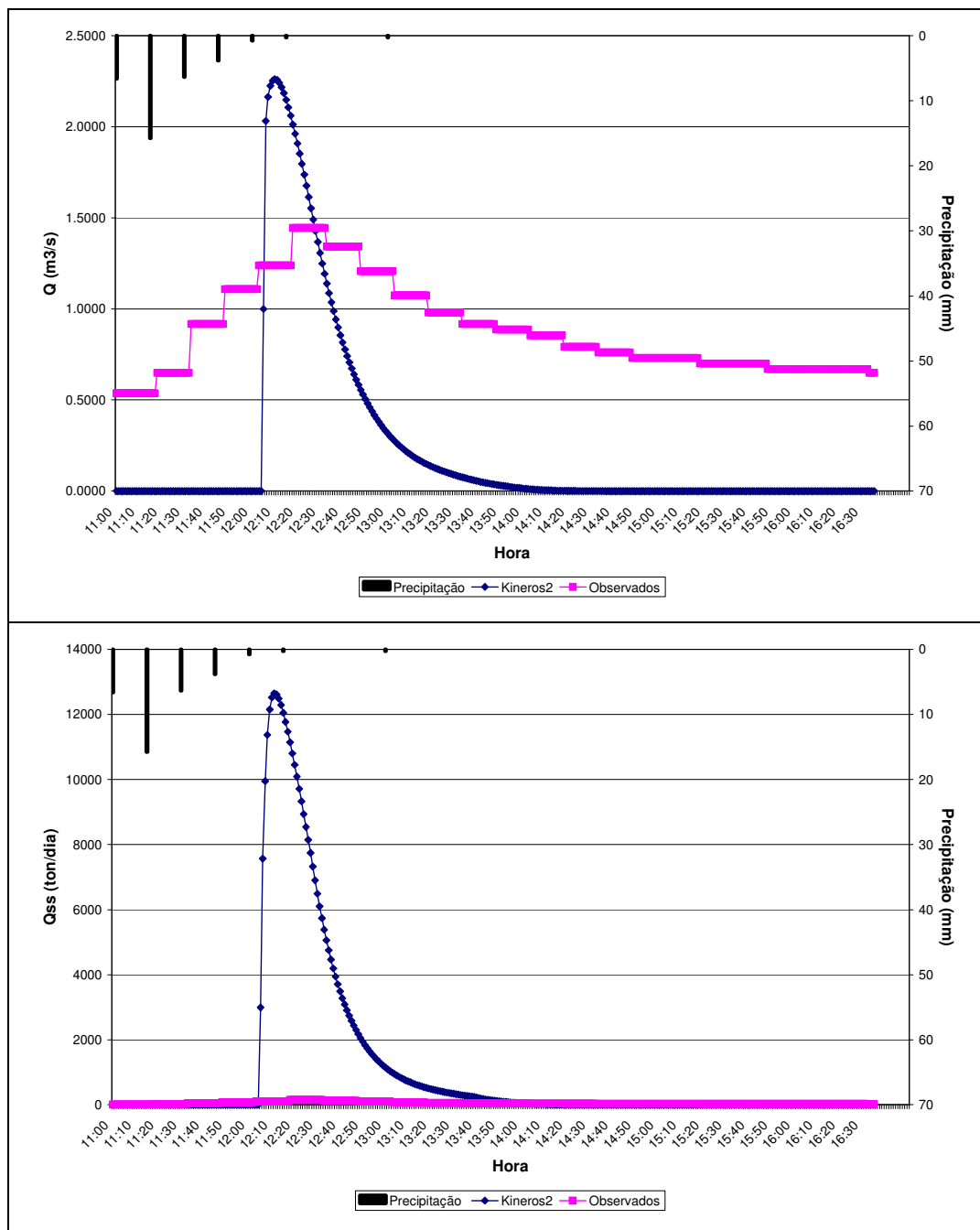


Figura 6.22 – Comparativo entre o resultado da simulação com o KINEROS2 e o valor observado para Vazão (m^3/s) e Descarga Sólida (ton/dia) – Evento 06.

Analisando os resultados apresentados, nota-se que a simulação com o modelo KINEROS2 apesar de simular a tendência de elevação da descarga com boa aproximação temporal, superestimou os valores de vazão para os eventos 01 e 03. Isso pode ser explicado pela alta intensidade desses eventos chuvosos e também pela alta sensibilidade que o modelo tem ao parâmetro “saturação do solo”, que para os eventos 03 e 06 foram adotados valores elevados em função da precipitação antecedente. O evento 06 foi o que foi melhor no que tange aos valores de vazão. Outro fato que deve ser observado é a rápida descida da onda

de cheia na simulação até o valor zero em todos os eventos e isso possivelmente ocorre em função da elevada infiltração simulada pelo modelo.

Para os eventos 02, 04, 05 e 07 foi percebida uma sub-estimativa da vazão pelo modelo, e apenas o evento 04 obteve resultado diferente de zero, porém bem abaixo da descarga (Figura 6.21). A explicação para esse fato pode ser a alta infiltração simulada. Como o parâmetro “saturação do solo” adotado não foi tão elevado nesses casos, toda a precipitação infiltrou-se. É importante comentar que esses eventos se caracterizam por terem a precipitação distribuída durante um longo intervalo de tempo e embora a bacia tenha respondido com uma elevação da vazão e do transporte de sedimento o modelo não foi capaz de simular isso, para esses eventos.

Com relação à Descarga Sólida (Qss), pode-se afirmar que o modelo superestimou os valores para os eventos 01, 03 e 06. Os valores calculados e observados estão com ordens de grandeza diferentes, o que mostra a necessidade de se implementarem parâmetros de solo que sejam confiáveis, que não foi o que ocorreu nesse estudo, já que, se utilizou parâmetros adaptados de FAO/UNESCO (2003). Para o evento 04, pode-se afirmar que o modelo representou de forma satisfatória a descarga sólida, como pode ser visto na Figura 6.21, porém, não se pode dizer que o tenha feito de forma correta, já que, a vazão nesse caso, foi sub-estimada e por isso a descarga sólida chegou a esses bons valores.

Em Lopes (2003) foi apresentado um extenso estudo utilizando o modelo KINEROS2 em uma pequena bacia na região semi-árida da Paraíba e o autor afirmou que apesar da robustez o modelo em questão não consegue representar bem a produção de sedimentos na bacia estudada, já que, o intervalo do parâmetro que representa a erosão causada pelo impacto da gota de chuva deveria ter um intervalo de variação menor, para uma melhor discretização em cada tipo de cobertura vegetal. Com relação aos dados de vazão, o modelo também não conseguiu representar bem a realidade, na maior parte das simulações.

A utilização do modelo KINEROS2 utilizado através da interface AGWA, sem calibração dos parâmetros, se mostrou uma alternativa interessante para ser implementada, já que, trata-se de um modelo robusto em uma interface mais simples e com uma entrada de dados prática já que, através dessa interface é possível utilizar informações contidas em dados

vetoriais geoespaciais obtidas em base de dados internacionais, porém, essas não são elaboradas em escalas muito boas.

Analisando os resultados percebe-se a necessidade da calibração de alguns parâmetros e de se fazer uma análise de sensibilidade para que os parâmetros mais sensíveis sejam identificados. Embora as simulações utilizando como entrada os dados existentes em bases internacionais tenha se mostrado ineficiente, principalmente para o transporte de sedimento, elas podem ser úteis para utilização, como condição inicial do modelo a ser posteriormente calibrado.

6.5.1 – Comparativo com Estudos Anteriores

Fragoso (2008) realizou modelagem na bacia, utilizando o AGNPS e não obteve bons resultados. Buscando comparar os resultados encontrados nesse estudo com os estimados por Fragoso (2008), encontrou as relações $Qp(calc)/Qp(obs)$ e $Qssp(calc)/Qssp(obs)$, já que o estudo da autora apresenta o resultado por essa métrica.

Tabela 6.3 – $Qp(calc)/Qp(obs)$ e $Qssp(calc)/Qssp(obs)$

Evento	Precipitação (mm)	$Qp(calc)/$ $Qp(obs)$	$Qssp(calc)/$ $Qssp(obs)$
01	78,74	2,51	57,25
03	50,04	2,91	50,63
04	30,99	0,04	1,19
06	33,78	1,56	82,83

Ao comparar os valores apresentados na Tabela 6.3 com os encontrados por Fragoso (2008), percebe-se a grande dificuldade que está apresentada na modelagem utilizando valores internacionais, como foi nesse estudo, já que a maior razão entre a vazão de pico calculada e observada, encontrada no estudo de Fragoso (2008) foi no valor de 0,75 e aconteceu em uma precipitação de aproximadamente 55 mm. Já com relação a razão entre a vazão sólida calculada e a observada, a dificuldade fica ainda mais clara, já que o maior valor encontrado por Fragoso (2008) foi aproximadamente 4,8 com uma precipitação de 28 mm. Ao comparar esses resultados nota-se que a utilização do modelo KINEROS2 com dados internacionais não pode ser considerada satisfatória, já que, por esse modelo ser mais robusto que o AGNPS, os resultados esperados deveriam ser melhores que os encontrados ao utilizar esse segundo modelo.

7 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Para este trabalho foi proposta a realização de diversos estudos hidrológicos e hidrossedimentológicos na sub-bacia do Capão Comprido, afluente do Lago Descoberto. A rede de monitoramento existente na sub-bacia foi complementada com novos equipamentos e foram coletados dados fluviométricos, pluviométricos, hidrossedimentométricos e topobatimétricos. Os dados foram analisados e por fim foram realizadas simulações do escoamento do transporte de sedimento utilizando o modelo KINEROS2.

A determinação e validação da curva-chave de descarga da seção estudada é extremamente importante para os estudos hidrológicos que foram e serão realizados na bacia desse córrego, por se tratar de bacia experimental do programa de pós-graduação. Utilizaram-se dados de diversas cotas linigráficas e se extrapolou a curva pela metodologia de *Stevens*. As curvas encontradas neste quando comparados com valores do coeficiente *c*, do método racional, levaram a valores com áreas cobertas por cultivo agrícola. A geração de duas curvas-chave para diferentes períodos demonstrou a necessidade de que a curva esteja sempre atualizada, sendo para isso fundamental o monitoramento freqüente da vazão em períodos chuvosos, independente de já se existir ou não medições com a mesma.

Outra curva-chave extremamente importante é a de sedimento e sua elaboração também se caracterizou pela necessidade da utilização de duas tendências diferentes para as vazões baixas e as altas, já que a quantidade de sedimento transportada está diretamente ligada à vazão. A curva obtida pode ser considerada representativa já que foi elaborada com mais de 200 amostragens em campo, porém deve-se sempre buscar novos dados para torná-la ainda mais representativa.

Com a curva-chave de sedimentos elaborada foi possível encontrar o total de sedimentos transportados em um ano hidrológico e posteriormente verificar a quantidade de medições diárias necessárias para se obter um resultado satisfatório, já que usualmente apenas duas medições por dia são realizadas, às 07 e 17 horas. No caso em estudo mostrou-se que esse tipo de medição levou a valores subestimados de carga total transportada e o que foi substancialmente melhorado com a utilização de quatro medições por dia. Sugere-se para

outros trabalhos, que sejam testados outros intervalos de tempo entre as amostragens para se encontrar o maior intervalo de tempo que ainda conduza a valores representativos de carga anual, já que com esse valor será possível planejar melhor o trabalho de amostragem em campo. Outro estudo recomendado é com relação a busca do intervalo de tempo máximo entre amostragens durante um evento, de modo a reduzir o trabalho de amostragem em eventos.

A comparação das curvas-chave de sedimentos e de vazão elaboradas neste estudo com as obtidas em estudos anteriores na bacia demonstram que as curvas podem apresentar erros muito grandes quando baseadas em poucos dados, como nos trabalhos de Bicalho (2006) e Fragoso (2008). Ao comparar o resultado do total de sedimento transportado no ano hidrológico utilizando a curva apresentada neste estudo e a apresentada por Bicalho (2006) verificou-se uma diferença de aproximadamente 70% .

A determinação da correta correlação entre turbidez e sólidos em suspensão é importante no monitoramento e gestão de bacias hidrográficas, já que a medição automática da turbidez durante todo o período do dia possibilita uma estimativa do transporte de sedimento de fácil aquisição viabilizando a estimativa para o período chuvoso. Pode-se afirmar que, com relação à turbidez e o transporte de sedimentos, o resultado apresentado neste estudo foi satisfatório, representando o passo inicial para se conseguir correlações melhores com a obtenção de mais amostras para gerar dados de sólidos em suspensão, principalmente durante eventos de cheias ainda maiores, já que, como afirmam Poletto e Merten (2006), 90% do fluxo de sedimentos em suspensão são transportados durante o período das cheias e por isso uma maior quantidade de dados deve ser coletada nesse período.

O estudo mostrou que, para este caso específico, a utilização de uma única equação para correlacionar turbidez e sedimento pode acarretar em erros consideráveis na carga total de sedimentos, pois apesar da pequena concentração nas vazões baixas, essas têm permanência muito elevada em pequenas bacias. Outro fato importante verificado foi à possibilidade de correlacionar satisfatoriamente essas duas variáveis, utilizando apenas um evento completo de amostragem, o que torna o trabalho bem menos dispendioso. No entanto, há de se estender o estudo para outras bacias buscando verificar se o fato é pontual ou regional

Outra sugestão para trabalhos futuros é que se verifique, em outros cursos de água do Distrito Federal, a validade dos procedimentos de amostragem utilizados neste trabalho, já que muitos desses córregos e rios possuem características semelhantes, como a alta declividade e predominância de latossolo vermelho.

A modelagem utilizando o KINEROS2 através da extensão do *Arcview* AGWA, com entrada de parâmetros adaptado de tabelas e mapas pré-existentes no *software* não pode ser considerada bem sucedida, mas se mostrou promissora, já que, dos 7 eventos estudados, a simulação conseguiu descrever a onda de cheia e o transporte de sedimentos em 4. Porém, nesses quatro os valores foram superestimados e nos outros três foi encontrado valor nulo. Isto demonstra que a utilização de valores internacionais não se adéqua a realidade do Brasil e por isso recomenda-se o aprimoramento da utilização do modelo KINEROS2 na bacia do Capão Comprido, com a implementação de parâmetros de entrada coletados em campo e com calibração de parâmetros mais sensíveis como a condutividade hidráulica saturada e os parâmetros relacionados à infiltração, com o objetivo de que através da modelagem se tenha condições de reproduzir com maior aproximação os eventos observados, para que o modelo possa ser testado e eventualmente utilizado para previsões.

Pode-se afirmar que a experiência adquirida em campo com a instalação de equipamentos e coleta de dados é de grande importância em estudos hidrossedimentológicos, devendo ser estimulada a ampliação de trabalhos no assunto de modo a se conhecer melhor o comportamento dos solos do cerrado em termos de produção de sedimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, M. G., e Burt, T. P. (1990). "Subsurface Runoff." Process studies in hillslopes hydrology, M. G. Anderson and T. P. Burt, eds., John Wiley & Sons, Chichester-Inglaterra, 539p.
- Anderson, M. P., e Woessner, W. W. (1991). *Applied Groundwater Modeling*, San Diego, California, EUA.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., e Williams, J. R. (1998). "Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development." *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Asselman, N. E. M. (2000). "Fitting and interpretation of sediment rating curves." *Journal of Hydrology*, 234, 228-248.
- Azevedo, L. G. T. d., Porto, R. L. L., e Filho, K. Z. (2002). "Modelos de Simulação e Rede de Fluxo." Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos, R. L. L. Porto, ed., Editora da UFRGS/ABRH, Porto Alegre, 419.
- Barnez, A. S. (2004). "Análise da Influência do Intervalo de Tempo de Registro de dados de Linígrafos e Pluviógrafos em Estudos Hidrológicos de Pequenas Bacias Hidrográficas," Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília, Distrito Federal.
- Bennett, J. P. (1974). "Concepts of Mathematical Modeling of Sediment Yield." *Water Resources Research*, 10(3), 485-492.
- Bertoni, J. C., e Tucci, C. E. M. (2004). "Precipitação." Hidrologia - Ciência e Aplicação, C. E. M. Tucci, ed., Editora da UFRG, ABRH, Porto Alegre, 943.
- Beven, K. J. (1985). "Distributed Models." Hydrological Forecasting, M. G. A. e T. P. Burt, ed., Wiley Chichester, 640.
- Beven, K. J. (2001a). "How far can we go in distributed hydrological modelling?" *Hydrology & Earth System Sciences*, 5(1), 1-12.
- Beven, K. J. (2001b). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*, John Wiley & Sons Chichester.
- Bicalho, C. C. (2006). "Estudo do Transporte de Sedimentos em Suspensão na Bacia do Rio Descoberto," Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília-DF.
- Bordas, M. P., e Semmelmann, F. R. (2004). "Elementos de engenharia de sedimentos." Hidrologia - Ciência e Aplicação, C. E. M. Tucci, ed., Editora da UFRGS / ABRH, Porto Alegre, 943.
- Campana, N. A., Monteiro, M. P., Koide, S., Brandão, C. C., e Neto, O. C. (1998). "Avaliação Qualitativa e Quantitativa dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal." Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal, I. SEMATEC, ed., Brasília-DF.
- Carvalho, G. B. B. d. (2004). "Modelo de avaliação econômica para a gestão da água: aplicação à bacia do rio Descoberto no Distrito Federal," Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília-DF.
- Carvalho, N. d. O. (1994). *Hidrossedimentologia Prática*, CPRM, Rio de Janeiro
- Carvalho, N. O., Salgado, J. C. M., Ross, J., Ruiz, N. C. P., Silva, L. F. A., Mesquita, J. B., Goulart Netto, A. A., e Silva, L. P. (2005). "Revisão dos estudos sedimentológicos do rio Madeira e Mamoré, RO." *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa/PB*, 439.
- Chevallier, P. (2004). "Aquisição e processamento de dados." Hidrologia - Ciência e Aplicação, C. E. M. Tucci, ed., Editora da UFRGS / ABRH, Porto Alegre, 943.

- Cho, J., Park, S., e Im, S. (2008). "Evaluation of Agricultural Nonpoint Source (AGNPS) model for small watersheds in Korea applying irregular cell delineation." *Agricultural Water Management*, 95(4), 400-408.
- Cobaner, M., Unal, B., e Kisi, O. (2009). "Suspended sediment concentration estimation by an adaptive neuro-fuzzy and neural network approaches using hydro-meteorological data." *Journal of Hydrology*, 367, 52 -61.
- CODEPLAN. (1984). *Atlas do Distrito Federal*, Companhia de Desenvolvimento do Planalto Central, Governo do Distrito Federal, Brasília-DF.
- CODEPLAN. (1992). "Mapas Topográficos Plani-altimétricos Digitais do Distrito Federal na escala de 1:10.000. ." GDF, Brasília.
- Coiado, E. M. (2001). "Uso do amostrador fixo programável na determinação da concentração dos sedimentos transportados em suspensão no rio Atibaia-SP." *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos* Aracajú-SE.
- Collischonn, B. (2006). "Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído," Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre.
- Collischonn, W. (2001). "Simulação Hidrológica de Grandes Bacias," Tese de Doutorado, UFRGS, Porto Alegre.
- Conti, G. N. (2002). "Estimativa da precipitação através de técnicas de sensoriamento remoto: Estudo de caso para o estado do Rio Grande do Sul," Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre.
- Córdova, J. R., e González, M. (1997). "Sediment yield estimation in small watersheds based on streamflow and suspended sediment discharge measurements." *Soil Technology*(11), 57-65.
- Devonec, E., e Barros, A. P. (2002). "Exploring the transferability of a land-surface hydrology model." *Journal of Hydrology*, 265(1-4), 258-282.
- DeVries, J. J., e Hromadka, T. V. (1992). "Computer Models for Surface Water." *Handbook of Hydrology*, D. R. Maidment, ed., McGraw Hill, 1424.
- Eckhardt, K., e Arnold, J. G. (2001). "Automatic calibration of a distributed catchment model." *Journal of Hydrology*, 251(1-2), 103-109.
- Engelund, F., e Hansen, E. (1967). *A Monograph on sediment transport in alluvial streams*, Teknisk Forlag, Copenhagen.
- FAO/UNESCO. (2003). "Digital Soil Map of the World an Derived Soil Properties, Version 3.6. CD-ROM information Division." Rome - Italy
- Fernandes, S. C. (2005). "Avaliação de imagens de satélite de alta e muito alta resolução espacial para a discriminação de classes de uso e ocupação do solo: aplicação ao caso da sub-bacia do córrego Capão Comprido no Distrito Federal," Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília.
- Ford, D., Pingle, N., e DeVries, J. J. (2002). "Hydrologic modelling system, HEC-HMS Applications Guide." U. A. C. o. Engineers, ed.
- Fragoso, M. M. A. (2008). "Estudo Hidrológico e de Transporte de Sedimentos em uma Bacia do Bioma Cerrado: Bacia do Córrego do Capão Comprido," UnB, Brasília.
- Freeze, R. A., e Cherry, J. A. (1979). "Groundwater." Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 604.
- Garrido, J. M. (2003). "Aplicação de modelo matemático de simulação com utilização de SIG à bacia do rio Jiquiriçá - BA," Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília.
- Gerits, J. J. P., Lima, J. L. M. P., e Broek, T. M. W. V. D. (1990). "Overland flow and erosion." *Process Studies in Hillslope Hydrology*, M. G. Anderson 2 T. P. Burt, eds., John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 539.
- Glysson, G. D. (1987). "Sediment-Transport Curves." USGS, Reston - Virginia.

- Goodrich, D. C., Unkrich, C. L., Smith, R. E., e Woolhiser, D. A. (2002). "KINEROS2 – A distributed kinematic runoff and erosion model." *2nd Federal Interagency Conf. on Hydrologic Modeling*, Las Vegas, NV.
- Govers, G. (1990). "Empirical relationships for the transport capacity of overland flow." *Jerusalém Workshop, Março-Abril, 1987. Publicação IASH*, 189, 45-63.
- Green, C. H., e van Griensven, A. (2008). "Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds." *Environmental Modelling & Software*, 23(4), 422-434.
- Hillel, D. (1998). "Environmental Soil Physics." Academic Press, London, 770.
- Jacon, G. e Cudo, K. J. (1989). *Hidrologia – Curva-Chave – Análise e Traçado*, Brasília.
- Kaiser, I. M. (2006). "Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos," Tese de Doutorado, USP, São Carlos.
- Knapp, B. J. (1980). "Infiltration and storage of soil water." Hillslope Hydrology, M. J. Kirkby, ed., John Wiley & Sons, Chichester, 389.
- Knebl, M. R., Yang, Z. L., Hutchison, K., e Maidment, D. R. (2005). "Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event." *Journal of Environmental Management*, 75(4), 325-336.
- Lenzi, M. A., e Marchi, L. (2000). "Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy)." *CATENA*, 39, 267-282.
- Lewis, J. (2002). "Turbidity-controlled Sampling for Suspended Sediment load Estimation." *Proceedings of the Oslo Workshop*, Oslo, 13-20.
- Lima, J. B. M. (2003). "Estudo de Redes de Monitoramento de Qualidade das Águas Superficiais – O Caso da Bacia do Rio Descoberto," Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília-DF.
- Lobo, G. A., Moretti, L. R., e Brighetti, G. (1999). "Sedimentometria em pequenas bacias hidrográficas." *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte - MG.
- Lopes, G. R., Távora, B. E., Santos, R. M. d., e Koide, S. (2009) "Estudo sobre Correlação entre Turbidez e Sólidos em Suspensão para Estimativa da Vazão Sólida em uma Pequena Bacia." *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Campo Grande- MS.
- Lopes, W. T. A. (2003a). "Efeitos da escala na modelagem hidrossedimentológica na região Semi-Árida da Paraíba," Dissertação de Mestrado, UFCG, Campina Grande.
- Machado, R. E. (2002). "Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento," Tese de Doutorado, USP, Piracicaba.
- Meyer, L. D., e Wischmeier, W. H. (1969). "Mathematical simulation of the process of soil erosion by water." *American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, 754-758.
- Miller, S. N., Semmens, D. J., Goodrich, D. C., Hernandez, M., Miller, R. C., Kepner, W. G., e Guertin, D. P. (2007). "The Automated Geospatial Watershed Assessment tool." *Environmental Modelling & Software*, 22(3), 365-377.
- Minella, J. P. G., Merten, G. H., Reichert, J. M., e Clarke, R. T. (2008). "Estimating Suspended Sediment Concentrations from turbidity measurements and the calibration problem." *Hydrological Processes*(22), 1819-1830.
- Mol, J. M. D. (2005). "Estimativa de precipitação por meio de sensoriamento remoto," Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília.

- Nascimento, A. C., Campana, N. A., e Eid, N. J. (2000). "Reconstituição de vazões mínimas, estudo de caso: Bacia do Capão Comprido." *Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste*, Brasília-DF.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., e Williams, J. R. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*, Agricultural Research Service.
- Ogden, F. L., Garbrecht, J., DeBarry, P. A., e Johnson, L. E. (2001). "GIS and distributed watershed models II: Modules, Interfaces and Models." *Journal of Hydrologic Engineering*, 515 - 523.
- Picouet, C., Hingray, B., e Olivry, J. C. (2001). "Empirical and conceptual modelling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: the Upper Niger river basin." *Journal of Hydrology*, 250, 19-39.
- Poleto, C., e Merten, G. H. (2006). "Rede de Monitoramento e Coleta de Amostras." *Qualidade dos Sedimentos*, ABRH, ed., Porto Alegre, 397.
- Ramirez, M. R., e Souza, J. M. d. (2007). "Sistema Gerenciador de Banco de Dados em Sistemas de Informações Geográficas." *Geomática - Modelos e Aplicações Ambientais*, M. S. P. Meirelles, G. Camara, and C. M. d. Almeida, eds., Embrapa Informações Tecnológicas, Brasília, 593.
- Reatto, A., Martins, É. d. S., Cardoso, E. A., Spera, S. T., Jr., O. A. d. C., Guimarães, R., Farias, M. F. R., e Silva, A. V. d. (2003a). *Levantamento de reconhecimento de solos de alta intensidade do alto curso do rio Descoberto DF/GO, escala 1:100000*, Brasília-DF.
- Reatto, A., Martins, É. d. S., Cardoso, E. A., Spera, S. T., Jr., O. A. d. C., Guimarães, R., Farias, M. F. R., e Silva, A. V. d. (2003b). "Relação entre as Classes de Solos e as Principais Fitofisionomias do Alto Curso do Rio Descoberto, Distrito Federal e Goiás." Planaltina-DF.
- Refsgaard, J. C. (1997). "Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models." *Journal of Hydrology*, 198(1-4), 69-97.
- Roloff, G., Jr, C. B., e Souza, M. L. P. (2007). "Modelo SWAT: Potencial de uso como auxiliar na gestão de pequenas bacias hidrográficas sem dados históricos." *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, São Paulo.
- Römken, M. J. M., Prasad, S. N., e Whisler, F. D. (1990). "Surface sealing and infiltration." *Process Studies in Hillslope Hydrology*, M. G. Anderson and T. P. Burt, eds., John Wiley & Sons Chichester, 539.
- Santos, C. A. G., Silva, R. M. d., e Aguiar, L. M. C. (2007). "Estimativa da produção de sedimentos na bacia experimental Jatobá a partir de técnicas de modelagem e geoprocessamento." *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, São Paulo.
- Santos, I. d., Fill, H. D., Sugai, M. R. v. B., Buba, H., Kishi, R. T., Marone, E., e Lautert, L. F. (2001). *Hidrometria Aplicada*, IDT, Curitiba.
- Santos, R. M. d. (2010). "Recarga de águas subterrâneas em ambiente do Cerrado: Estudo com base em simulação hidrológica e abordagem multimétodos a nível de bacia experimental." Monografia de Qualificação de Doutorado ainda não Publicada, UnB, Brasília
- Scharffenberg, W. A., e Fleming, M. J. (2006). *Hydrologic Modeling System Hec-HMS User's Manual*, U. S. Army Corps of Engineers.
- Scott, A. N., Burns, I. S., Levich, L., Hernandez, M., Goodrich, D. C., Semmens, D. J., Kepner, W. G., e Miller, S. N. (2006). "Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA) - A GIS-Based Hydrologic Modeling Tool: Documentation and User Manual." USAD-ARS-Southwest Watershed Research Center, Tucson.

- Semmens, D., Goodrich, D. C., Unkrich, C. L., Smith, R. E., Woolhiser, D. A., e Miller, S. N. (2005). "Kineros2 and the agwa modeling framework." The GWADI International Modeling Workshop, UNESCO on-line publication, 30.
- Setti, A. A., Lima, J. E. F. W., Chaves, A. G. d. M., e Pereira, I. C. (2000). "Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos." Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, Brasília, 207.
- Shiklomanov, I. A. (1998). "World Water Resources Appraisal an Assessment for the 21st Century." UNESCO, ed., 76.
- Silberstein, R. P. (2006). "Hydrological models are so good, do we still need data?" *Environmental Modelling & Software*, 21(9), 1340-1352.
- Silva, J. X. d. (2007). "Geoprocessamento em Estudos Ambientais: Uma Perspectiva Sistêmica." *Geomática - Modelos e Aplicações Ambientais*, M. S. P. Meirelles, G. Camara, and C. M. d. Almeida, eds., Embrapa Informações Tecnológicas, Brasília, 593.
- Silveira, A. L. d., Louzada, J. A., e Beltrame, L. F. (2004). "Infiltração e armazenamento no solo." *Hidrologia - Ciência e Aplicação*, C. E. M. Tucci, ed., Editora da UFRGS / ABRH, Porto Alegre, 943.
- Silveira, A. L. L. d. (1993). "Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica." *Hidrologia - Ciência Aplicada*, C. E. M. Tucci, ed., Editora da UFRGS / ABRH, Porto Alegre, 943.
- Singh, R., Tiwari, K. N., e Mal, B. C. (2006). "Hydrological studies for small watershed in India using the ANSWERS model." *Journal of Hydrology*, 318(1-4), 184-199.
- Smith, R., Corradini, C., e Melone, F. (1993). "Modeling Infiltration for Multistorm Runoff Events " *Water Resources Research* 29(1), 133-144.
- Smith, R. E., e Goodrich, D. C. (2000). "Model For Rainfall Excess Patterns on Randomly Heterogeneous Areas." *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(4), 355-362.
- Smith, R. E., Goodrich, D. C., Woolhiser, D. A., e Unkrich, C. L. (1995). "KINEROS - A kinematic runoff and erosion model." *Computer Models of Watershed Hydrology*, H. R. Water Resources Pub., ed., Singh, V. J., 697-732.
- Solar. (2008). "Relação SL2000-TS – Turbidez e Sólidos Suspensos – Manual de Instruções." Florianópolis - SC.
- Souto, A. R., e Crestana, S. (2000). "Identificação das áreas potenciais de produção de sedimentos com o modelo AGNPS e técnicas de SIG em uma microbacia hidrográfica." *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 4(3), 429-435.
- Sui, D. Z., e Maggio, R. C. (1999). "Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects." *Computers, Environment and Urban Systems*, 23(1), 33-51.
- Tripathi, M. P., Panda, R. K., e Raghuwanshi, N. S. (2003). "Identification and Prioritisation of Critical Sub-watersheds for Soil Conservation Management using the SWAT Model." *Biosystems Engineering*, 85(3), 365-379.
- Tucci, C. E. M. (1998). "Modelos Hidrológicos." Editora UFRGS / Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre - Brasil, 669.
- Tucci, C. E. M. (2004). "Escoamento Superficial." *Hidrologia - Ciência e Aplicação*, C. E. M. Tucci, ed., Editora da UFRGS/ ABRH Porto Alegre, 943.
- Tucci, C. E. M., e Beltrame, L. F. S. (2004). "Evaporação e Evapotranspiração." *Hidrologia - Ciência Aplicada*, C. E. M. Tucci, ed., Editora da UFRGS, ABRH, Porto Alegre, 943.
- Tucci, C. E. M., e Clarke, R. T. (1997). "Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: Revisão." *RBRH*, 2(1), 135 - 152.

- Wagener, T., Boyle, D. P., Lees, M. J., Wheater, H. S., V.Gupta, H., e Sorooshian, S. (2001). "A framework for development and application of hydrological models." *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 13-26.
- Wallace, J. S., e Oliver, H. R. (1990). "Vegetation and Hydroclimate." Process studies in hillslope hydrology, M. G. Anderson and T. P. Burt, eds., John Wiley & Sons Ltd., Chinchester, 539.
- Wanderley, R. M. (2000). "Modelo advectivo-dispersivo de transporte de solutos em solo não-saturado utilizando os métodos das características e dos elementos finitos," Dissertação de Mestrado, UnB, Brasília.
- Wood, E. F., Sivalapan, M., e Beven, K. (1988). "Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologically modeling." *Journal of Hydrology*, 102, 29-47.
- Woolhiser, D. A., Smith, R. E., e D.C.Goodrich. (1990). "KINEROS, A Kinematic Runoff an Erosion Model: Documentation and User Manual. ." U. S. D. o. Agriculture, ed., Agricultural Research Service, 130.
- Woolhiser, D. A., Smith, R. E., e Giraldez, J. (1996). "Effects of Spatial Variability of Saturated Hydraulic Conductivity on Hortonian Overland Flow." *Water Resources Research*, Vol. 32(3), 671-678.
- Young, R. A., Onstad, C. A., Bosch, D. D., e Anderson, W. P. (1989). "AGNPS: A nonpointsource pollution model for evaluating agricultural watersheds." *Journal of Soil and Water Conservation*, 44(2), 168-173.

APÊNDICES

APÊNDICE A – VAZÃO CALCULADA *versus* TEMPO DESDE 2006 ATÉ 2008, SEPARADAS POR ANO HIDROLÓGICO

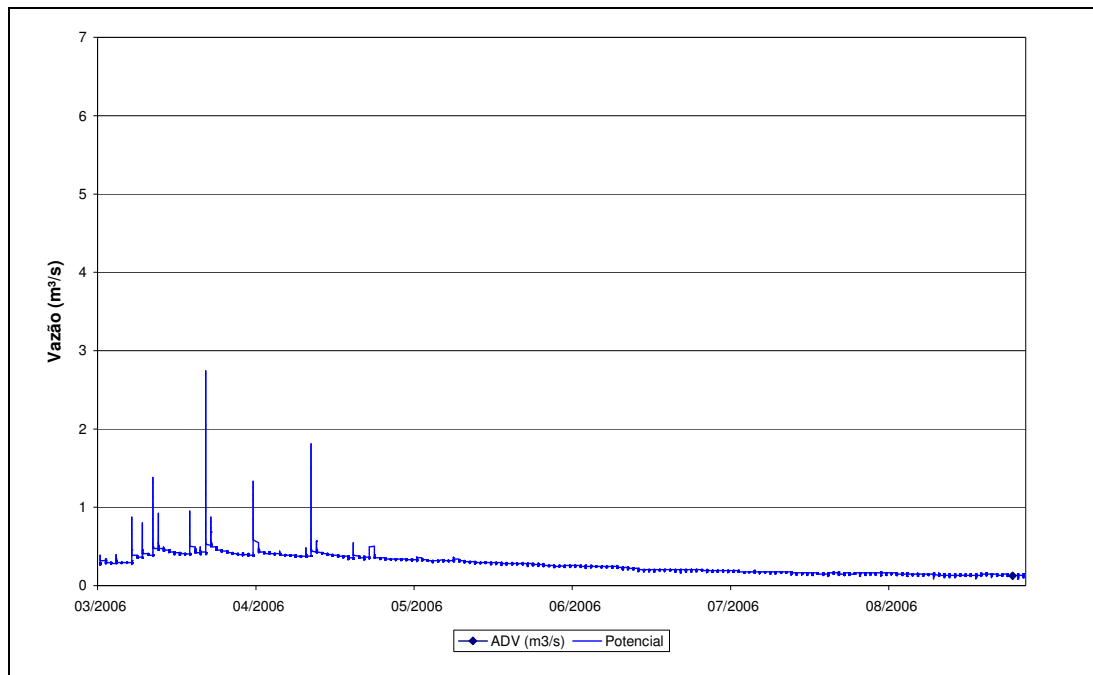


Figura A. 1 – Vazão Calculada (m^3/s) *versus* tempo (março/2006 à agosto/2006)

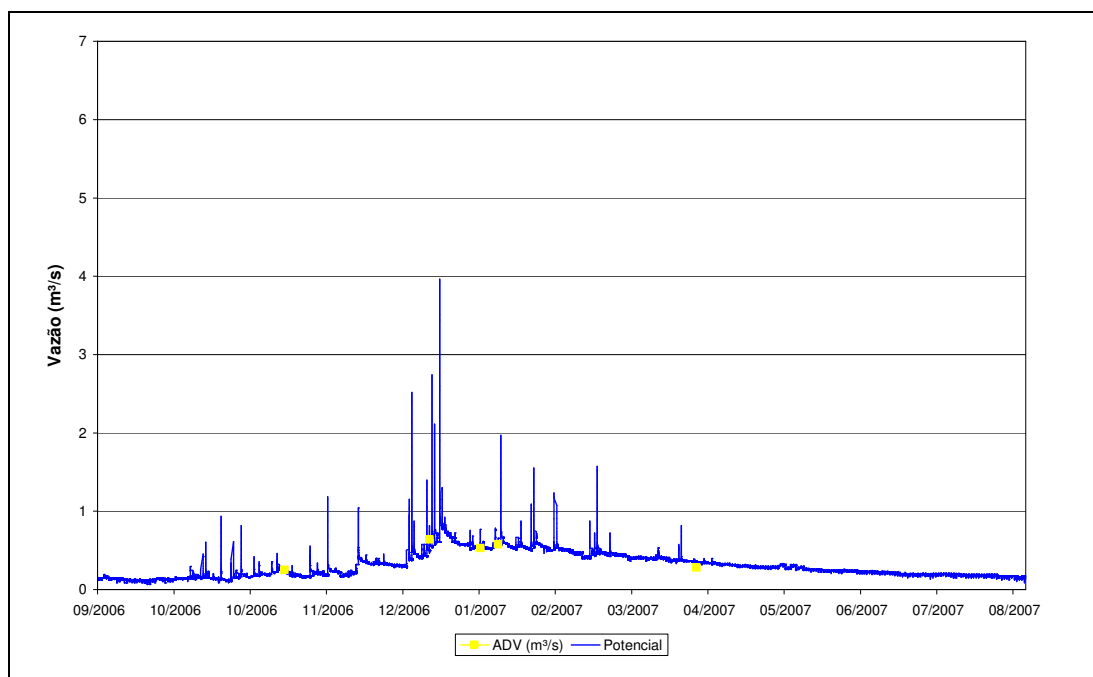


Figura A. 2 – Vazão Calculada (m^3/s) *versus* tempo (setembro/2006 à agosto/2007)

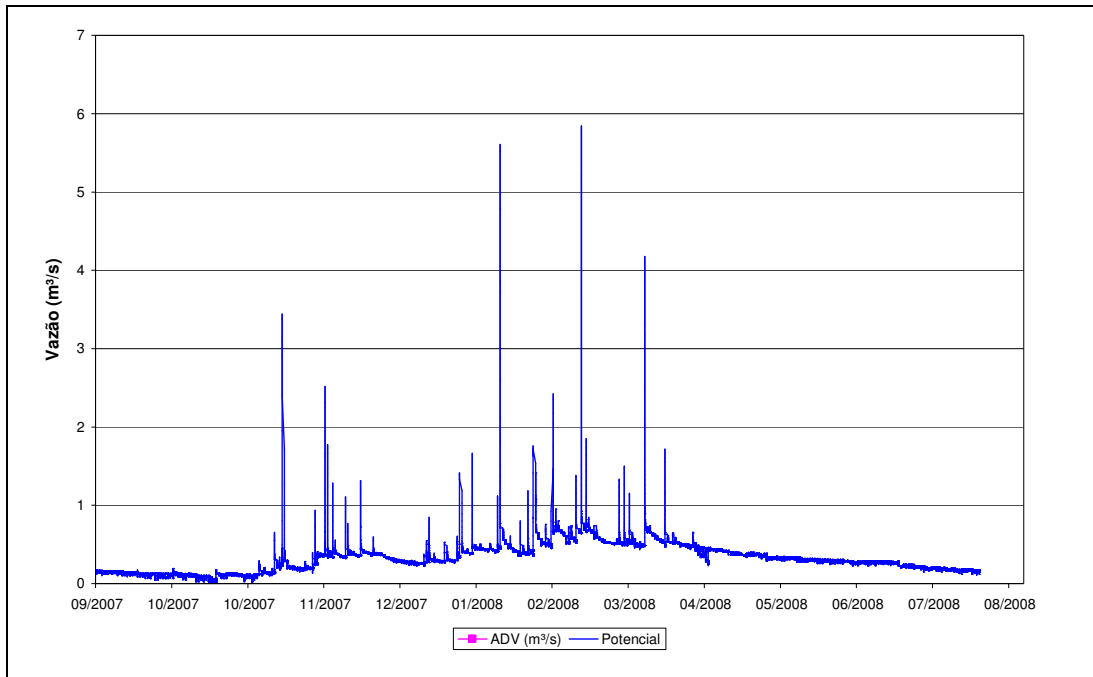


Figura A. 3 – Vazão Calculada (m^3/s) versus tempo (setembro/2007 à agosto/2008)

APÊNDICE B – PRECIPITAÇÃO DISTRIBUÍDA MEDIDA DESDE 2006 ATÉ 2008, SEPARADAS POR ANO HIDROLÓGICO

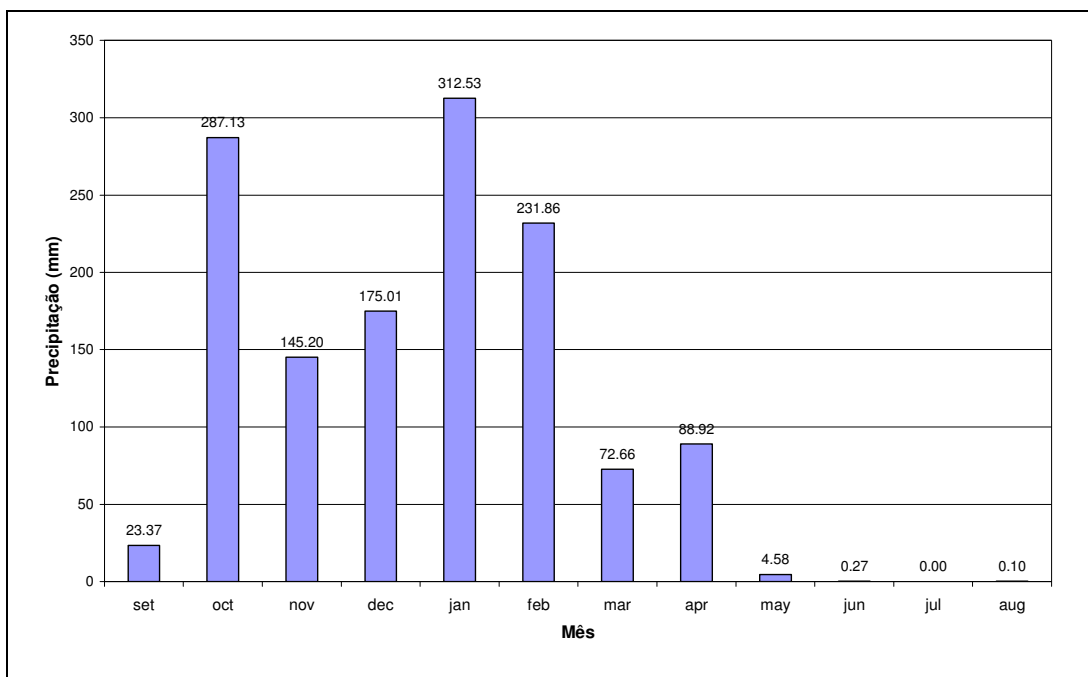


Figura B. 1 – Precipitação distribuída na bacia no ano hidrológico 2006-2007

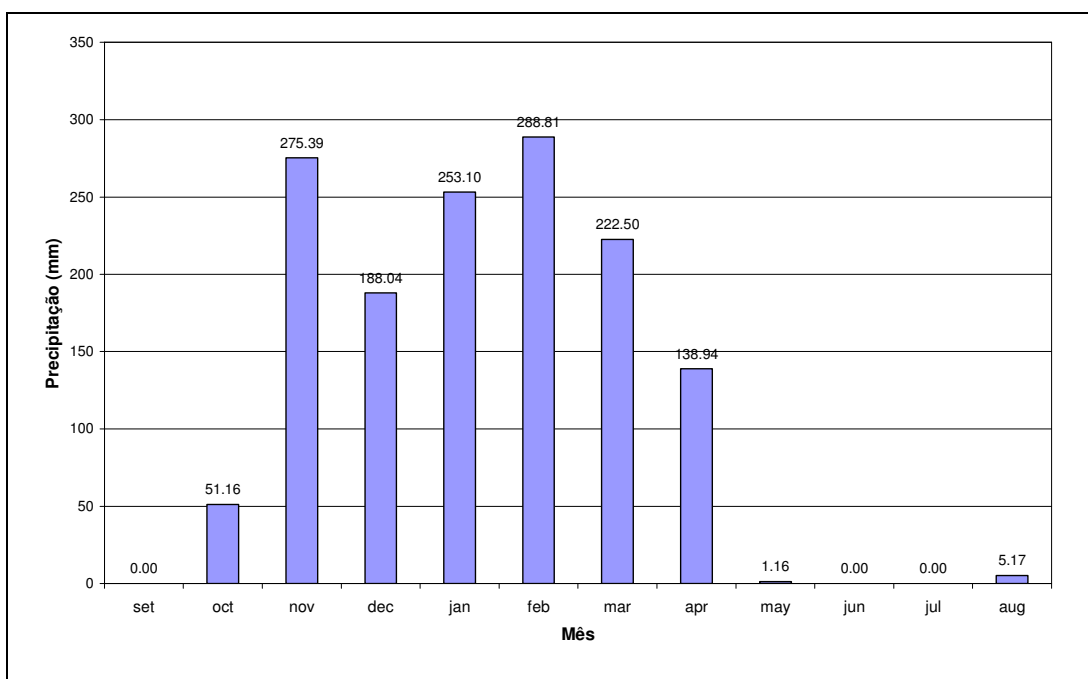


Figura B. 2– Precipitação distribuída na bacia no ano hidrológico 2007-2008

APÊNDICE C – PRECIPITAÇÃO DISTRIBUÍDA MEDIDA DESDE 2006 ATÉ 2008, SEPARADAS POR ANO HIDROLÓGICO

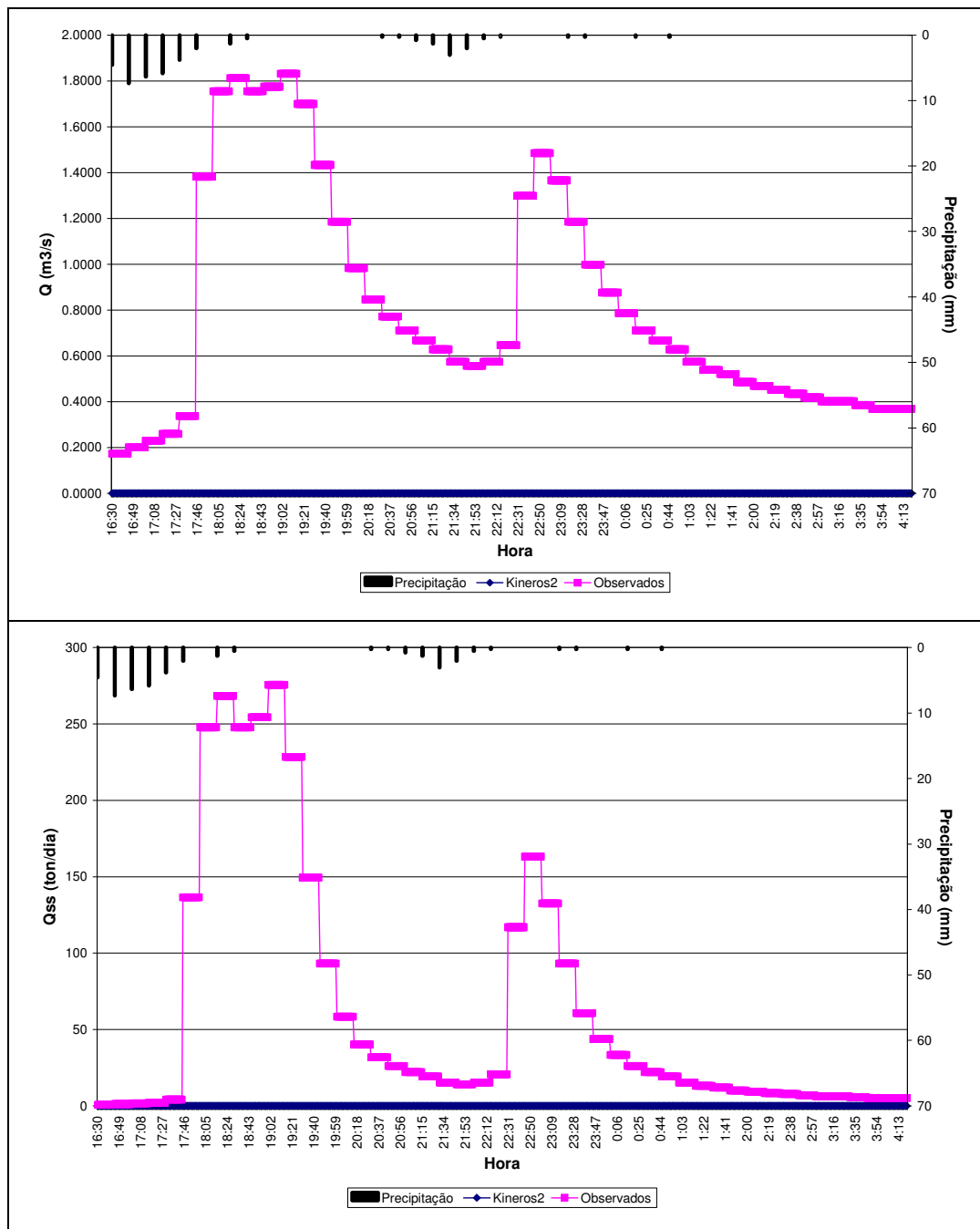


Figura C.1– Comparativo entre o resultado da simulação com o KINEROS2 e o valor observado para Vazão (m³/s) e Descarga Sólida (ton/dia) – Evento 02.

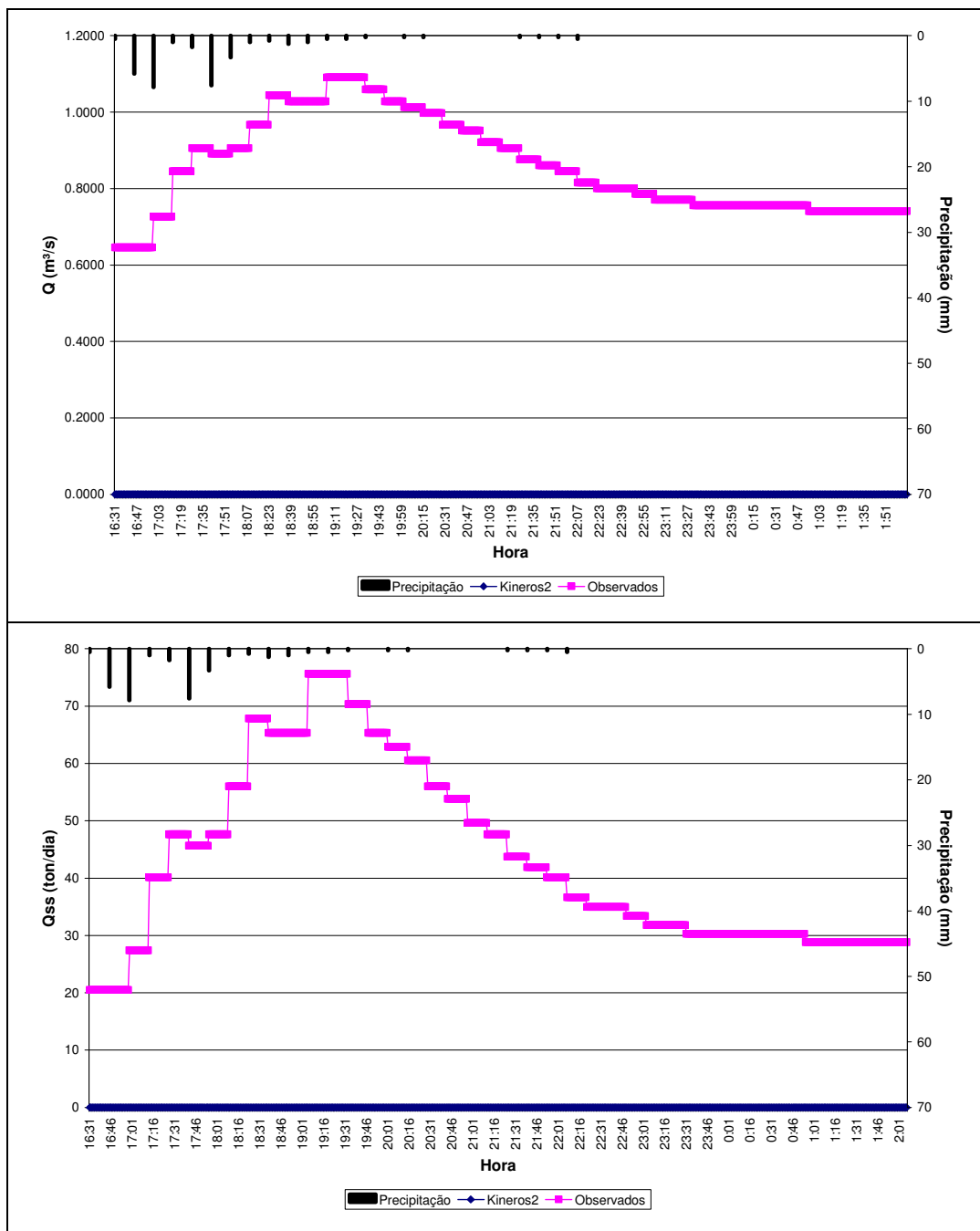


Figura C.2– Comparativo entre o resultado da simulação com o KINEROS2 e o valor observado para Vazão (m³/s) e Descarga Sólida (ton/dia) – Evento 05.

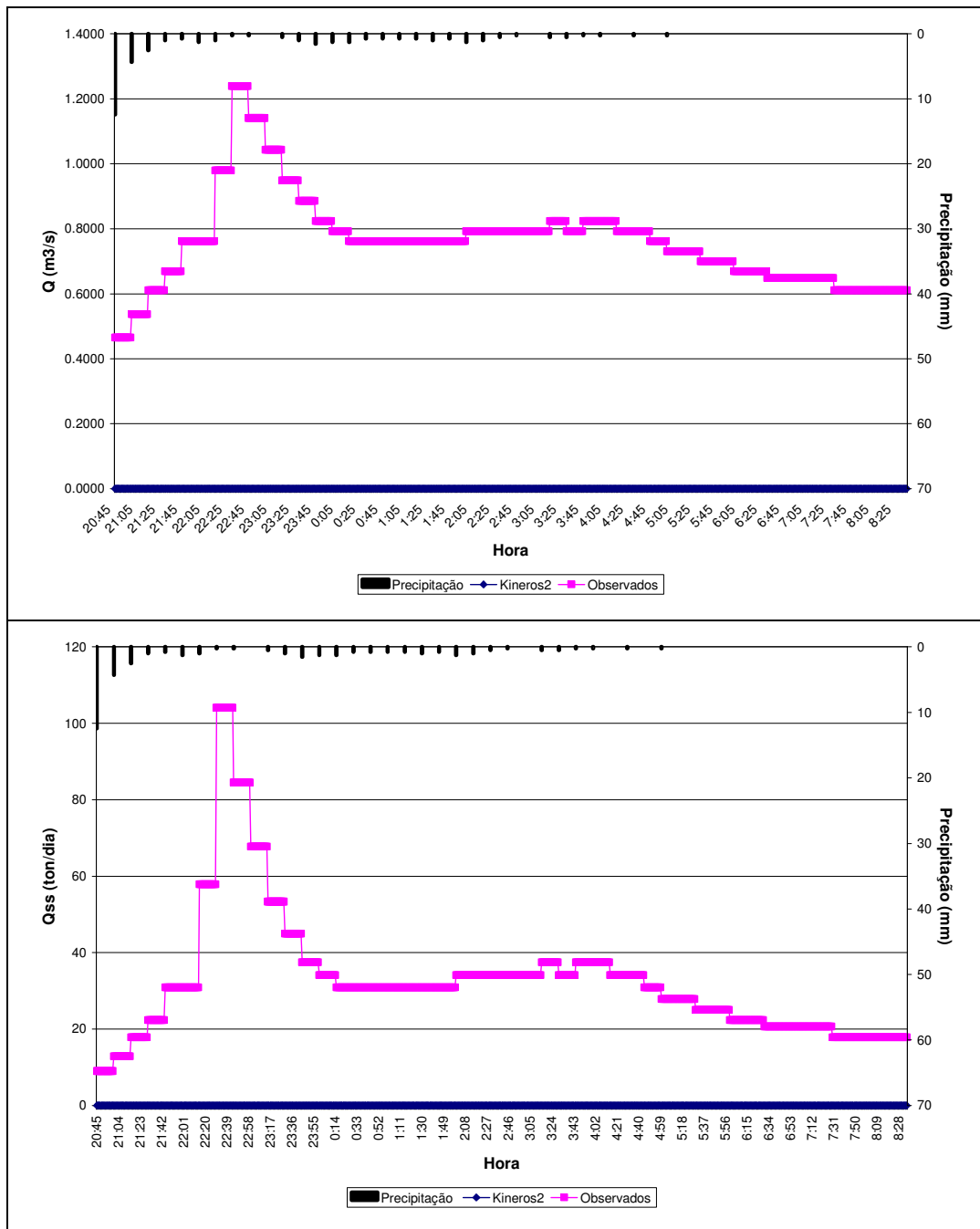


Figura C.3– Comparativo entre o resultado da simulação com o KINEROS2 e o valor observado para Vazão (m³/s) e Descarga Sólida (ton/dia) – Evento 07.