

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

SUELEN OLIVEIRA ALPINO RODRIGUES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO CÓRREGO SUJO, TERESÓPOLIS
(RJ): Relação Chuva-Vazão Utilizando Arc Hydro.**

Orientador: Prof. Dr. André de Souza Avelar

Rio de Janeiro
2013

SUELEN OLIVEIRA ALPINO RODRIGUES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO CÓRREGO SUJO, TERESÓPOLIS
(RJ): Relação Chuva-Vazão Utilizando Arc Hydro.**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciência (M. Sc.).

Orientador: Prof. Dr. André de Souza Avelar

Rio de Janeiro
2013

A457m

ALPINO RODRIGUES, SUELEN OLIVEIRA
MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO CÓRREGO SUJO,
TERESÓPOLIS (RJ): Relação Chuva-Vazão Utilizando
Arc Hydro. / SUELEN OLIVEIRA ALPINO RODRIGUES. --
Rio de Janeiro, 2013.
129 f.

Orientador: ANDRÉ DE SOUZA AVELAR.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal
do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências,
Departamento de Geografia, Programa de Pós
Graduação em Geografia, 2013.

1. HIDROLOGIA. 2. MODELAGEM HIDROLÓGICA.
3. ARC HYDRO. I. AVELAR, ANDRÉ DE SOUZA , orient.
II. Título.

SUELEN OLIVEIRA ALPINO RODRIGUES

**MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO Córrego Sujo, TERESÓPOLIS
(RJ): Relação Chuva-Vazão Utilizando Arc Hydro.**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciência (M. Sc.).

Aprovada em ___ / ___ / ____

Orientador

Prof. André de Souza Avelar, D. Sc. - IGEO/UFRJ

Prof^a. Ana Luiza Coelho Netto, D. Sc. - IGEO/UFRJ

Prof. Manoel do Couto Fernandes, D. Sc. - IGEO/UFRJ

Prof. Otávio Miguez da Rocha Leão, D. Sc. - IGEO/UERJ/FFP

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela realização de mais um sonho, por ter me ajudado desde as etapas seletivas, por ter me sustentado, fortalecido e me guardado a todo o momento. "Que darei eu ao Senhor por todos os benefícios que me tem feito?" (Salmos 116:12).

Aos meus pais, Ana Alpino e Jorge Alpino, ao meu esposo Leonardo Rodrigues e ao meu irmão Sullivan Alpino, por todo amor, incentivo, apoio, compreensão e por suas orações. Vocês são verdadeiros presentes de Deus para minha vida.

Ao professor André de Souza Avelar por todo apoio durante a pesquisa, pela paciência, pelos ensinamentos que tanto acrescentaram à minha formação acadêmica, pelo exemplo de pesquisador dedicado e por sua generosidade.

À professora Ana Luíza Coelho Netto por ter me recebido no GEOHECO e pelo apoio a essa pesquisa.

Aos membros da banca da qualificação que contribuíram muito com o avanço da pesquisa e aos membros da banca examinadora da dissertação por terem aceitado o convite.

Aos amigos e companheiros de pesquisa: Paula Coelho e Vitor dos Santos pela amizade inesquecível, pelo apoio durante as dificuldades no campo, pela ajuda nas medições de vazão todo mês. Ao Leonardo Brum, meu veterano da UERJ/FFP, que me incentivou muito e sempre esteve pronto a ajudar, inclusive me ensinou a medir vazão. À Ingrid Araújo por seu incentivo e colaboração e pela ajuda com o Arc Hydro. Agradeço também aos companheiros do GEOHECO que auxiliaram nos campos cansativos de georreferenciamento, além de várias ajudas ao longo da pesquisa: Ana Carolina Facadio, Anderson Sato, Maria Isabel Martinez, Sônia Mena, Leonardo Corrêa, Leonardo Barbosa, Joana Fraga, Carlos Eduardo Menezes e Roberta Pereira. Ao Jorge Vieira e Daniele Mendonça que foram fundamentais na logística dos campos. À Engenheira Karina Menezes pela ajuda com o Auto Cad. À Yasmin e Yohana Riguetto por ajudarem na digitação de muitos dados de campo. À Ana Paula Araujo pelo apoio e companheirismo.

Aos observadores de campo Lessandro, Queli, Sandra e Carina pela leitura diária dos instrumentos e à estagiária e moradora do Vale Alpino Amanda Carneiro que auxiliou nas campanhas de georreferenciamento.

Aos órgãos de fomento Capes, CNPq e FAPERJ pelo apoio financeiro.

Aos colegas do DRM – RJ que me incentivaram muito principalmente na fase final da pesquisa, em especial à diretora de mineração Débora Tocci, ao Coordenador Paulo Vicente, ao Geógrafo Pedro Hugo Xaubet. Aos geógrafos Gabriela Vianna e Nilton Costa pelas palavras de ânimo e pela ajuda com o Arc Gis. Além de todos os outros que de alguma forma me ajudaram e me incentivaram nessa jornada.

Ao Júlio Cesar Mello Di Paola, diretor técnico da Empresa Ampla Energia e Serviços S.A., por autorizar o uso da base cartográfica da Ampla e pelas informações técnicas a respeito dessa base.

A todos vocês: muito obrigada!

“Se a ciência é a reunião de fatos, teorias e métodos reunidos nos textos atuais, então os cientistas são homens que, com ou sem sucesso, empenharam-se em contribuir com um ou outro elemento para essa constelação específica.”

Thomas S. Kuhn

Resumo

ALPINO RODRIGUES, Suelen Oliveira. Modelagem Hidrológica da Bacia do Córrego Sujo, Teresópolis (RJ): Relação Chuva-Vazão Utilizando Arc Hydro. Dissertação (Mestrado em Geografia na Área de Concentração de Planejamento e Gestão Ambiental) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

Na presente pesquisa foi elaborada uma modelagem hidrológica baseada na relação entre a chuva e a vazão na bacia do Córrego Sujo, que possui uma área de 53 km² e está localizada no município de Teresópolis, região serrana do estado do Rio de Janeiro. Entre os objetivos da pesquisa estavam: analisar a distribuição das chuvas em diferentes escalas durante o período monitorado; estabelecer as relações entre a infiltração e o escoamento superficial dos diversos usos e coberturas vegetais, e avaliar o modelo hidrológico frente aos dados de campo. Para isso, foi feito um mapeamento de uso do solo e cobertura vegetal na escala 1:10.000 do ano de 2012. Foram elaboradas curvas-chave a partir de medições de vazão, além da confecção de hidrógrafas contendo as respostas de variação do nível do rio durante eventos de chuva ocorridos nos anos de 2010 e 2012. Os registros de precipitação e altura limimétrica foram obtidos a partir de estações pluvio-fluviométricas instaladas em três pontos da bacia (alto, médio e baixo curso). O Arc Hydro foi utilizado na geração de linhas de drenagem, na identificação dos diferentes níveis de acumulação de fluxo e na delimitação de áreas de contribuição da bacia, viabilizando o cálculo do volume escoado que convergiria para cada estação fluviométrica. Os resultados da análise de precipitação revelaram uma heterogeneidade na distribuição das chuvas nas três estações pluviométricas, sendo mais expressivas as precipitações registradas na estação do médio curso. As curvas-chave refletiram a relação da altura linimétrica com a vazão em todas as estações do ano, no entanto, como não ocorreram medições em dias de chuvas significativas, seu uso ficou comprometido nessas situações. O mapeamento de uso e cobertura evidenciou que a maior parte da área da bacia é coberta por gramínea e que o uso predominante é exercido pela agricultura, além do avanço da área de plantação de eucalipto em comparação com

estudos anteriores. A utilização do Arc Hydro mostrou-se satisfatória em todas as etapas da modelagem. Os modelos gerados foram considerados, em parte, satisfatórios, principalmente mediante as limitações encontradas, mostrando a importância no avanço do monitoramento da bacia para a melhor calibração do modelo. As conclusões do trabalho indicam a necessidade de pesquisas futuras que visem elucidar as questões encontradas neste trabalho.

Palavras-chave: Arc Hydro, Hidrologia e modelagem hidrológica.

Abstract

ALPINO RODRIGUES, Suelen Oliveira. Respostas Modelagem Hidrológica da Bacia Bacia do Córrego Sujo, Teresópolis (RJ): Relação chuva-vazão utilizando Arc Hydro. Dissertação (Mestrado em Geografia na Área de Concentração de Planejamento e Gestão Ambiental) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

In the research was developed a hydrological modeling based on the relationship between rainfall and stream flow in the Córrego Sujo watershed, which has an area of 53 km² and is located in Teresopolis, Mountain Region of the State of Rio de Janeiro. The objectives of the research were: to analyze the distribution of rainfall at different scales during the monitored period, establish relationships between infiltration and runoff in different uses and vegetation cover, and assess the hydrological model against field data. For this, we made a mapping of land use and vegetation cover on 1:10.000 scale of the year 2012. Key-curves were elaborated from flow measurements, in addition to making hydrograph containing the answers of the level variation of river during rain events that occurred in the years 2010 and 2012. The records of precipitation and water-level were obtained from stations monitoramente installed at three points of the basin (high, medium and low course). Arc Hydro was used in the generation of drainage lines, in identifying the different levels of flow accumulation and in the delimitation of areas of contribution of the basin, allowing the calculation of the volume disposed which should converge on each fluviometric station. The results of the analysis of precipitation showed a heterogeneous distribution of rainfall in the three rainfall stations, being more expressive rainfall recorded at the station of the middle course. The key-curves reflected the relationship of the water-level with flow in all seasons of the year, however, as there were no measurements on days of significant rainfall, its use was compromised in these situations. The mapping revealed that the greater part of the area of the basin is covered with grass and that the predominant use is exerted by agriculture, beyond advancement of the planting area of eucalyptus compared to

previous studies. The use of the Arc Hydro was satisfactory in all stages of modeling. The models were considered partly satisfactory, mainly by the limitations found, showing the importance of the continuous monitoring of the basin to better calibration of the model. The conclusions of the study indicate the need for further research aimed at elucidating the issues found in this work.

Keywords: Arc Hydro, Hydrology and hydrologic modeling.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	16
2 OBJETIVOS	19
2.1 Geral.....	19
2.2 Específicos.....	19
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 Bacia Hidrográfica.....	20
3.1.1 <i>Classificação e Análise das Bacias Hidrográficas</i>	21
3.1.2 <i>Mecanismos Relacionados à Hidrologia</i>	25
3.2 Hidrologia e Ciclo Hidrológico.....	27
3.3 Modelagem Ambiental.....	30
3.3.1 <i>Conceituação de Modelo e Modelagem Hidrológica</i>	30
3.3.2 <i>Uso de SIG e Outras Tecnologias em Modelagem Hidrológica</i>	32
4 ÁREA DE ESTUDO.....	38
4.1 Localização.....	38
4.2 Caracterização da Área de Estudo de Acordo com o Projeto Rio de Janeiro da CPRM (2001).....	39
4.2.1 <i>Geologia</i>	39
4.2.2 <i>Caracterização Geoambiental</i>	40
4.2.3 <i>Geomorfologia</i>	40
4.3 Caracterização da Área de Estudo com Base em Estudos Realizados no Município de Teresópolis e na Bacia do Córrego Sujo.....	41
4.3.1 <i>Clima</i>	41
4.3.2 <i>Uso do Solo e Cobertura Vegetal</i>	42
4.3.3 <i>Pedologia</i>	47
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	49
5.1 Base de Dados Utilizada na Modelagem.....	49
5.1.1 <i>Elaboração do Modelo Digital de Terreno (MDT)</i>	49
5.1.2 <i>Precipitação</i>	55
5.1.3 <i>Vazão</i>	57
5.1.4 <i>Mapeamento do Uso do Solo e Cobertura Vegetal e Parâmetros Hidrológicos</i>	60
5.2. Utilização da ferramenta Arc Hydro (versão 1.4).....	62
5.2.1 <i>Ferramentas do Arc Hydro</i>	64
5.3 Elaboração da Modelagem Hidrológica.....	69
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	72

6.1 Precipitação Mensal e Anual.....	72
6.2 Relação entre Altura Linimétrica e Precipitação.....	76
6.3 Precipitação e Altura Linimétrica Diária.....	80
6.4 Medição de Vazão.....	87
6.5 Mapa de Uso do Solo e Cobertura Vegetal.....	93
6.6 Modelagem Hidrológica no Arc Hydro.....	96
6.6.1 Comparação do Modelo Hidrológico em Diferentes Eventos de Chuva e Escoamento.....	103
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	124

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 3.1	Representação esquemática e tridimensional de uma bacia de drenagem Fonte: http://www.abagr.p.cnpm.embrapa.br/areas/hidrografia.htm . Acesso em 04/06/2013.....	21
Figura 3.2	Desenho esquemático dos critérios de classificação de Horton e Strahler. Fonte: Christofletti (1980).....	23
Figura 3.3	Movimentos e mudanças de estado da água no ciclo hidrológico: Ev = evaporação (oceanos, rios, lagos e durante a precipitação); ET= evapotranspiração (solos e plantas); Cd = condensação do vapor e formação de nuvens; P = precipitação; It = interceptação pela vegetação; I = infiltração; ES _p = escoamento superficial; ES _s = escoamento subsuperficial ou subterrâneo; NF = nível freático. Fonte: Coelho Netto (1994).....	28
Figura 3.4	Elementos para obtenção do hidrograma ou da curva chave. O fluxo basal no hidrograma representa a água do rio proveniente da água subterrânea, enquanto o escoamento direto corresponde à água superficial em resposta a eventos de chuva. Fonte: adaptado de Karmann, 2000.....	30
Figura 4.1	Mapa de localização da Bacia do Córrego Sujo.....	38
Figura 4.2	Precipitação média acumulada mensal e temperatura média em Teresópolis, entre os anos de 1961-1990. Fonte: INMET (2009).....	41
Figura 4.3	Mosaico da paisagem e característica geomorfológica geral da bacia (a, b e c) e a presença da agricultura nos fundos de vale (a e c). Fonte: GEOHECO/UFRJ – Dezembro/2008.....	43
Figura 4.4	Mapa de uso e cobertura vegetal da bacia do Córrego Sujo no ano de 1999. Fonte: Araujo, 2006.....	44
Figura 4.5	Mapa de uso e cobertura vegetal da bacia do Córrego Sujo no ano de 2006. Fonte: Araujo, 2006.....	45
Figura 4.6	Draga removendo a vegetação da margem direita do Córrego Sujo. Fotografia tirada durante a medição da vazão do mês de abril de 2012.....	47
Figura 4.7	Solos da bacia do Córrego Sujo: SB7, Perfil 1 – Latossolo Bruno Distrófico (LBd) e Perfil 2 - Cambissolo Háplico Distrófico (CXbd); SB8, Perfil 3 - Neossolo Litólico Eutrófico (Rle); SB9, Perfil 4 – Chernossolo Argilúvico Órtico (Mto). Fonte: Oliveira, 2007.....	47
Figura 4.8	Modelo de parcela hidro-erosiva do tipo Gerlach. Fonte: Menezes, 2009.....	48
Figura 5.1	Base cartográfica utilizada na pesquisa.....	51
Figura 5.2	MDT gerado a partir das curvas de nível na escala de 1:10.000 da bacia do Córrego Sujo com um <i>buffer</i> de 500 metros.....	53
Figura 5.3	Resultado da transformação do MDT da figura 5.2 em formato raster (sem o <i>buffer</i>).....	54
Figura 5.4	Mapa de localização das estações pluvio-fluviométricas instaladas na bacia do Córrego Sujo.....	55
Figura 5.5	Estação Sorvete, baixo curso (A) e Estação CPRM, médio curso (B).....	56
Figura 5.6	Pluviômetro com dispositivo de <i>datalogger</i> instalado na estação baixo curso.	56
Figura 5.7	Medição da vazão com o micromolinete hidrométrico da Global Water: (a) alto curso, (b) médio curso e (c) baixo curso da bacia do Córrego Sujo.....	58
Figura 5.8	Esquema de cálculo da seção média.....	58

Figura 5.9	Imagem do receptor GNSS utilizado.....	61
Figura 5.10	Interface do Arc Hydro com os demais programas. Fonte: modificado de Maidment, 2002.....	63
Figura 5.11	Relação entre as feições e camadas no Arc Hydro. Fonte: modificado de Maidment, 2002.....	64
Figura 5.12	Barra de ferramentas do Arc Hydro.....	64
Figura 5.13	MDT e direção do fluxo. e direção do fluxo. Fonte: modificado de Maidment, 2002.....	65
Figura 5.14	Cálculo das direções de fluxo. Fonte: modificado de Maidment, 2002.....	66
Figura 5.15	Esquerda – GRID do MDT; Direita – Resultado do GRID de direções de fluxo. Fonte: modificado de Maidment, 2002.....	66
Figura 5.16	Esquerda – Representação física; Direita – Rede de fluxos. Fonte: modificado de Maidment, 2002.....	66
Figura 5.17	Ilustração da ferramenta <i>Combine Rasters do Arc Gis 9.3</i> . (combine images do ArcGis 9.3).....	70
Figura 5.18	Seção molhada da Estação Sorvete. Medição realizada em 25 de fevereiro de 2010.....	71
Figura 5.19	Seção molhada da Estação CPRM. Medição realizada em 25 de fevereiro de 2010.....	71
Figura 6.1	Precipitação acumulada mensal de toda a série de dados registrados nas Estações do alto, médio e baixo curso da bacia do Córrego Sujo.....	73
Figura 6.2	Acumulado anual de chuva nas estações CPRM, Sorvete e Gilberto.....	74
Figura 6.3	Comparação do total de chuva mensal nas estações do alto, médio e baixo curso da bacia do Córrego Sujo.....	75
Figura 6.4	Relação entre a Precipitação e a altura linimétrica da Estação Sorvete.....	77
Figura 6.5	Relação entre a Precipitação e a altura linimétrica da estação médio curso “CPRM”.....	78
Figura 6.6	Relação entre a Precipitação e a altura linimétrica da estação alto curso “Gilberto”.....	79
Figura 6.7	Distribuição diária da precipitação – Estação Médio Curso – CPRM. Período: março a maio de 2010.....	81
Figura 6.8	Distribuição diária da precipitação – Estação baixo curso – Sorvete. Período: março a maio de 2010.....	82
Figura 6.9	Distribuição diária da precipitação – Estação baixo curso – Sorvete. Período: Janeiro a abril de 2012.....	83
Figura 6.10	Variação do nível d’água – Estação médio curso – CPRM. Período: março a maio de 2010.....	84
Figura 6.11	Variação do nível d’água – Estação baixo curso – Sorvete. Período: março a maio de 2010.....	85
Figura 6.12	Variação do nível d’água – Estação baixo curso – Sorvete. Período: Janeiro a Abril de 2012.....	86
Figura 6.13	Curvas-Chave da Estação Gilberto dos anos de 2009/2010 (adaptado de Brum, 2010) e do ano de 2012.....	90

Figura 6.14	Curvas-Chave da Estação CPRM dos anos de 2009/2010 (adaptado de Brum, 2010) e do ano de 2012.....	91
Figura 6.15	Curvas-Chave da Estação Sorvete do ano de 2009 (adaptado de Brum, 2010) e do ano de 2012.....	92
Figura 6.16	Mapa de uso do solo e cobertura vegetal da bacia do Córrego Sujo em 2012.	95
Figura 6.17	Resultado gerado pela ferramenta direção de fluxo (<i>Flow Direction</i>).....	97
Figura 6.18	Resultado gerado pela ferramenta acumulação de fluxo (<i>Flow Accumulation</i>)...	98
Figura 6.19	Comparação entre utilização de diferentes porcentagens de área mínima para a definição dos fluxos da bacia do Córrego Sujo. O formato que está no mapa já é o vetorial realizado pela ferramenta “ <i>Stream Definition</i> ”.....	100
Figura 6.20	Resultado do uso da ferramenta <i>Catchment Grid Delineation</i> em formato raster e os polígonos resultantes da transformação para o formato vetorial....	101
Figura 6.21	Áreas de Contribuição geradas pela ferramenta <i>Batch Watershed Delimitation</i>	102
Figura 6.22	Análise da Hidrógrafa 1 – Modelagem do volume escoado na chuva de 30/03/2010 para a área da bacia do Córrego Sujo.	109
Figura 6.23	Análise da Hidrógrafa 2 – Modelagem do volume escoado na chuva de 05/04/2010 para a área da bacia do rio Córrego Sujo.....	110
Figura 6.24	Análise da Hidrógrafa 2 A – Modelagem do volume escoado na chuva de 05/04/2010 (a) para a área da bacia do Córrego Sujo.....	111
Figura 6.25	Análise da Hidrógrafa 2 B – Modelagem do volume escoado na chuva de 05/04/2010 (b) para a área da bacia do Córrego Sujo.....	112
Figura 6.26	Análise da Hidrógrafa 3 – Modelagem do volume escoado na chuva de 06/04/2010 para a área da bacia do Córrego Sujo.....	113
Figura 6.27	Análise da Hidrógrafa 4 – Modelagem do volume escoado na chuva de 11/04/2010 para a área da bacia do Córrego Sujo.....	114
Figura 6.28	Análise da Hidrógrafa 5 – Modelagem do volume escoado na chuva de 09/05/2010 para a área da bacia do Córrego Sujo.....	115
Figura 6.29	Análise da Hidrógrafa 6 – Modelagem do volume escoado na chuva de 12/04/2010 para a área da bacia do Córrego Sujo.	116
Figura 6.30	Análise da Hidrógrafa 7– Modelagem do volume escoado na chuva de 29/01/2012 para a área da bacia do Córrego Sujo.....	117
Figura 6.31	Análise da Hidrógrafa 8 – Modelagem do volume escoado na chuva de 23/02/2012 para a área da bacia do Córrego Sujo.....	118
Figura 6.32	Análise da Hidrógrafa 8 – Modelagem do volume escoado na chuva de 15/03/2012 para a área da bacia do Córrego Sujo.	119
Figura 6.33	Análise da Hidrógrafa 9 – Modelagem do volume escoado na chuva de 16/03/2012 para a área da bacia do Córrego Sujo.....	120
Figura 6.34	Análise da Hidrógrafa 10 – Modelagem do volume escoado na chuva de 24/03/2012 para a área da bacia do Córrego Sujo.....	121

LISTA DE TABELAS

		Página
Tabela 4.1	Alterações na dinâmica da paisagem (ARAÚJO, 2009).....	46
Tabela 5.1	Parâmetros Hidrológicos.....	62
Tabela 5.2	Valores usados para a geração da drenagem.....	67
Tabela 5.3	Fórmulas utilizadas na modelagem.....	70
Tabela 6.1	Distribuição das áreas de uso do Solo e Cobertura Vegetal na Bacia do Córrego Sujo nos anos de 1999, 2006 e 2012.....	94
Tabela 6.2	Itens presentes nas tabelas dos cálculos da modelagem.....	104

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com o entendimento da dinâmica hidrológica tem chamado cada vez mais a atenção de pesquisadores em todo o mundo, principalmente porque o Homem passa a reconhecer que as transformações e as respostas da natureza muitas vezes resultam em eventos destrutivos e críticos para a sociedade. Há indícios de que estes eventos têm se intensificado nos últimos anos, com causas ainda discutíveis, porém com consequências catastróficas.

O interesse mundial no estudo de fenômenos hidrológicos críticos tem resultado em crescentes investimentos econômicos em equipamentos que auxiliem o monitoramento e o estudo da dinâmica de bacias hidrográficas. Nesse contexto, vem sendo crescente o avanço tecnológico nas áreas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento. Com isso, muitos trabalhos voltados para estudos hidrológicos sob o enfoque geográfico têm se aproveitado das possibilidades dessas tecnologias para avaliar e também prever variados fenômenos que se expressam na paisagem.

A modelagem ambiental construída a partir de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) surge como uma ferramenta agilizadora desses trabalhos, pois como afirma Francisco (1995) “os SIGs podem recuperar, transformar e manipular interativamente os dados, podendo ser utilizados para simular os processos que ocorrem no meio ambiente ou, também, antecipar os possíveis resultados das decisões a serem tomadas em um projeto de planejamento”.

Frente a esses recursos, esta pesquisa pretende aplicar os procedimentos de geotecnologias no estudo hidrológico, por meio de uma modelagem hidrológica da bacia do Córrego Sujo, município de Teresópolis - RJ; tendo em vista a grande influência que a dinâmica fluvial exerce tanto na transformação daquela paisagem quanto em seu aspecto socioeconômico. O estudo inclui também a comparação do modelo com mensurações hidrológicas em campo.

A modelagem hidrológica poderá contribuir com os estudos ambientais já em curso nessa bacia, a fim de gerar subsídios ao planejamento e gestão de seus recursos, tendo em vista a afirmativa de Tucci (1998) de que a modelagem hidrológica é uma técnica extremamente útil para a equacionalização dos processos,

representação, entendimento e simulação do comportamento de uma bacia hidrográfica.

Os estudos sobre o balanço hídrico bacia do Córrego Sujo, realizados por Brum (2010), mostram que a água é um recurso de fundamental importância para a comunidade local, além de ser relevante para a região metropolitana do Rio de Janeiro, que consome grande parte da produção agrícola gerada nessa bacia hidrográfica. O mesmo autor alerta para a importância do conhecimento do comportamento hidrológico dessa bacia e também aponta para a ocorrência de conflitos pelo uso da água, em especial, devido à irrigação, principalmente nas áreas de cabeceira de drenagem em períodos de estiagem.

Além dos conflitos entre usuários de água, outro aspecto que demanda maiores conhecimentos a respeito da hidrologia na região é a própria localização geográfica. Caracterizada por seu domínio montanhoso com vertentes íngremes, solos pouco espessos e localização propícia à formação de chuva, a região serrana do estado do Rio de Janeiro apresenta-se vulnerável a enchentes e a movimentos de massa, que podem ser intensificados por intervenções humanas como desmatamento e ocupação irregular. Um exemplo dessa vulnerabilidade pôde ser verificado no evento hidrológico-erosivo extremo ocorrido em janeiro de 2011 nessa região, ocasionando perdas de vida, prejuízos econômicos, além de significativas mudanças naquela paisagem.

O interesse no uso da modelagem hidrológica se deve pela sua possibilidade em auxiliar o entendimento das respostas chuva-vazão mediante um estudo dos fatores que contribuem para essa relação. Neste sentido, a modelagem hidrológica que este trabalho propõe será baseada no entendimento sistêmico dos processos chuva, infiltração, escoamento superficial e vazão, além das características topográficas e de uso e cobertura vegetal. Através destes resultados será verificada a correlação destes parâmetros com a modelagem realizada no software Arc Hydro 1.4 que ocorre por meio de dados espaço-temporais para recursos hídricos e opera em ambiente SIG.

Dessa forma, pretende-se gerar informações que poderão conduzir a um sistema de previsão dessas respostas e ao conhecimento ainda maior da hidrologia

da área em estudo; considerando não apenas o potencial da modelagem, mas também suas limitações, como aponta Rennó & Soares (2000):

“Aprender a modelar, é antes de tudo, aprender a observar, a notar detalhes, a esmiuçar, a questionar. Mas também, é ter consciência da limitação. A hidrologia é, sem dúvida, uma disciplina fascinante e essencial para os dias de hoje, dada a necessidade cada vez maior de se explorar os recursos hídricos. Hoje, essa exploração ainda vem sendo feita sem nenhum critério. A modelagem hidrológica surge como uma ferramenta capaz de antecipar acontecimentos e apontar alternativas que conduzam a manutenção da capacidade produtiva do ambiente”.

Esta dissertação se insere como parte de um projeto do Laboratório de Geo-Hidroecologia da UFRJ (GEOHECO), que visa o entendimento da dinâmica hidrológica e dos diferentes usos da água da bacia do Córrego Sujo, atrelado à coleta sistemática de amostras de água e solo para análises químicas e biológicas visando à qualificação e a quantificação dos contaminantes na bacia. Esta pesquisa se desdobra em projetos financiados através da FAPERJ, CT-HIDRO e CNPq.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Elaborar uma modelagem às respostas hidrológicas em determinados eventos de chuva na bacia hidrográfica do Córrego Sujo, mediante a relação existente entre a precipitação, o uso e a cobertura da terra e as características topográficas do terreno na dinâmica fluvial.

2.2 Específicos

- Analisar a distribuição, a intensidade e frequência das chuvas, nas escalas horária, diária e mensal, quantificando as entradas de água na bacia a partir dos dados de precipitação registrados pelas estações do GEOHECO e da CPRM situadas em três pontos da bacia: baixo, médio e alto curso;
- Avaliar as relações chuva-escoamento superficial frente aos diversos usos e coberturas vegetais encontradas no mapeamento na escala 1:10.000 do ano de 2012;
- Avaliar se o modelo hidrológico elaborado através da ferramenta Arc Hydro é consistente frente aos dados obtidos em campo. Para tanto, será importante considerar se a escala 1:10.000 e a série temporal utilizadas são adequadas, bem como ter conhecimento dos erros entre o modelo e a mensuração em campo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica pode ser definida como uma área da superfície terrestre que recebe e distribui água, sedimentos e substâncias dissolvidas para uma saída comum, em um determinado ponto de um canal fluvial (COELHO NETTO, 1994). Ela deve ser entendida como um sistema que compreende um volume de materiais, predominantemente sólidos e líquidos, próximo à superfície terrestre, delimitada interna e externamente por todos os processos que, a partir do fornecimento de água pela atmosfera, interferem no fluxo de matéria e de energia de um rio ou de uma rede de canais fluviais (RODRIGUES e ADAMI, 2005). Essa classificação ressalta a importância de incluir, dentro do conceito de bacia hidrográfica, os espaços de circulação, armazenamento, e de saídas das águas e do material por ela transportado, que mantêm relações com os canais fluviais. Isso porque as encostas, topos, fundos de vales, canais, corpos d'água subterrânea, sistemas de drenagem urbano, e áreas irrigadas, dentre outras unidades espaciais, estão interligados e fazem parte da bacia hidrográfica (COELHO NETTO, 1994). Por permitir a integração dos processos entre a encosta e os processos fluviais, a bacia hidrográfica é muito utilizada para estudos de análise ambiental.

Segundo Silveira (2001), a bacia hidrográfica compõe-se basicamente de dois subsistemas: um conjunto de superfícies – que são as vertentes – e uma rede de drenagem formada por cursos d'água que confluem até resultar um leito único no exutório. Nesse sistema, conforme o referido autor, as vertentes podem ser consideradas como fontes produtoras, tanto pelos sedimentos produzidos a partir delas quanto pelo escoamento de água nelas gerados. Existe, portanto, uma direta relação de interdependência entre a vertente e o curso d'água: a vertente evolui em função da disposição do talvegue (nível de base para a intensificação dos processos morfogenéticos), o que implica diretamente no compartimento do canal (CASSETI, 1991).

As bacias hidrográficas servem para compartimentação topográfica do relevo, permitindo a classificação das sub-bacias que compõem o sistema hidrográfico, segundo sua dinâmica geomorfológica. Em termos de dinâmica hidrológica essas

sub-bacias podem possuir diferentes significados para o escoamento das águas, de acordo com parâmetros controladores da eficiência do processo de drenagem, tais como gradiente e densidade e eficiência de drenagem.

A bacia hidrográfica, conforme Coelho Netto (1994), caracteriza-se como um sistema aberto, por receber impulsos energéticos das forças climáticas atuando em sua área e das forças tectônicas subjacentes, e perde energia por meio da água, dos sedimentos e dos solúveis exportados pela bacia no seu ponto de saída. A autora ainda conclui que as alterações externas no suprimento de energia e massa, levam a um autoajuste das formas e dos processos, de modo a ajustar essas mudanças.

As entradas e saídas de água em uma bacia hidrográfica estão sujeitas aos fatores controladores para essa dinâmica. A precipitação constitui-se em um fator essencial no ciclo hidrológico, seu volume, distribuição temporal e intensidade são algumas características que afetam a natureza e a magnitude do trabalho Geomorfológico em bacias de drenagem (COELHO NETTO, 1994). De uma maneira geral, a água é considerada, na análise de bacias hidrográfica, como um fator dinâmico no sistema. A figura 3.1 representa uma bacia hidrográfica.



Figura 3.1 – Representação esquemática e tridimensional de uma bacia de drenagem Fonte: <http://www.abagrp.cnpem.embrapa.br/areas/hidrografia.htm>. Acesso em 04/06/2013.

Para estudos sobre bacias hidrográficas é fundamental a sua delimitação para definir a sua área de abrangência, ela pode também ser desmembrada em várias outras sub-bacias, dependendo do ponto de saída considerado ao longo do seu canal coletor (COELHO NETTO, 1994).

3.1.1 Classificação e Análise das Bacias Hidrográficas

A drenagem fluvial é composta por um conjunto de canais de escoamento inter-relacionado que formam a bacia hidrográfica. A quantidade de água que atinge

os cursos fluviais está na dependência do tamanho da área ocupada pela bacia, da precipitação total, e de seu regime, e das perdas devido à evapotranspiração e infiltração (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Segundo Christofolletti (1980), as bacias hidrográficas podem ser classificadas, de acordo com o escoamento global, nos tipos:

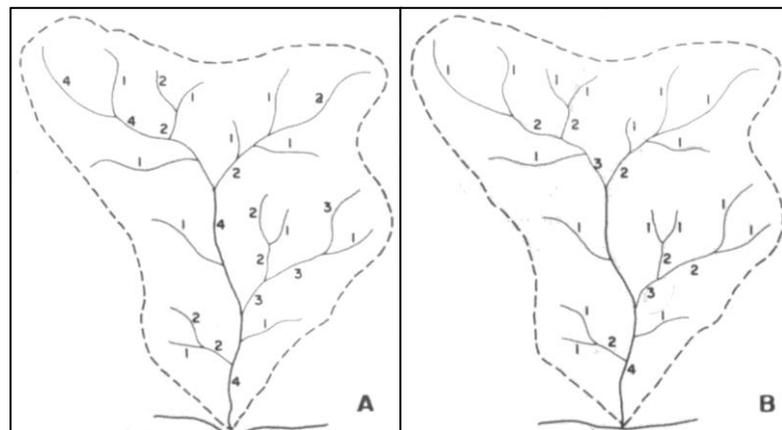
- a) *Exorreicas*, quando o escoamento das águas se faz de modo contínuo até o mar ou oceano.
- b) *Endorreicas*, quando as drenagens são internas e não possuem escoamento até o mar, desembocando em lagos ou dissipando-se nas areias do deserto, ou perdendo-se nas depressões cársticas.
- c) *Arreicas*, quando não há nenhuma estruturação em bacias hidrográficas, como nas áreas desérticas, onde a precipitação é negligenciável e a atividade dunária é intensa, obscurecendo as linhas e os padrões de drenagem;
- d) *Criptorreicas*, quando as bacias são subterrâneas, como nas áreas cársticas. A drenagem subterrânea acaba por surgir em fontes ou integrar-se em rios subaéreos.

Baseando-se em Christofolletti (1980) e em outros estudos seguem alguns parâmetros a serem considerados na análise de bacias hidrográficas:

- a) *Hierarquia de canais:*

O canal fluvial é o resultado da escavação feita pelos fluxos de água, possuindo bordas e fundos definidos. A hierarquia de canais consiste no processo de se estabelecer a classificação de determinado curso de água no conjunto total da bacia hidrográfica na qual se encontra. Segundo a hierarquia de canais proposta por Strahler (1952), os menores canais, sem tributários, são considerados como de primeira ordem, estendendo-se desde a nascente até a confluência; os canais de segunda ordem surgem da confluência de dois canais de primeira ordem, e só recebem afluentes de primeira ordem; os canais de terceira ordem surgem da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e de primeira ordem; os canais de quarta ordem surgem da confluência de

dois canais de terceira ordem, podendo receber tributários das ordens inferiores. E assim, sucessivamente, conforme ilustrado na figura 3.2.



Hierarquia de canais: (A) critério de Horton e (B) critério de Strahler.

Figura 3.2 – Desenho esquemático dos critérios de classificação de Horton e Strahler. **Fonte:** Christofolletti, 1980.

b) Desnivelamento da Bacia de Drenagem

É definida como sendo a diferença entre a maior cota de seu divisor e a cota de sua desembocadura.

c) Área da bacia

É toda área drenada pelo conjunto do sistema fluvial, projetada pelo plano horizontal (CRISTOFOLETTI, 1980). Determinados os contornos da bacia, a sua área pode ser obtida por planimetria em mapas com escalas razoavelmente grandes (1/50000 ou 1/25000) e expressa em quilômetros quadrados ou hectares. Também é possível determinar a área da bacia por cálculos matemáticos através do SIG – Sistemas de Informações Geográficas.

Deve ressaltar, quanto à obtenção da área por planimetria, que de acordo com Fernandes (2004) nem sempre a escala vai garantir uma melhor interpretação da relação entre a superfície real e a planimétrica, e sim a característica das feições de entrada. O autor resalta ainda a importância na confiabilidade da base cartográfica para esse tipo de relação.

Quanto ao tamanho da área de drenagem sobre as características dos escamentos fluviais, Maksoud (1957) afirma que, em média, o valor do deflúvio máximo de enchente que pode ocorrer em qualquer curso de água, expresso em

função da área de drenagem, varia inversamente com o tamanho da bacia contribuinte. Segundo o mesmo autor, as bacias maiores são relativamente mais aptas a sustentar o escoamento fluvial durante os períodos de estiagem que as bacias de menor tamanho. Quanto maior a bacia, menor a amplitude de variação dos deflúvios e maior a uniformidade do escoamento fluvial.

d) *Densidade de Drenagem*

A densidade de drenagem é obtida a partir da relação entre o somatório do comprimento dos canais e a área das bacias de drenagem. Podendo ser calculada pela fórmula: $Dd = Lt/A$, onde Dd é a densidade de drenagem (km/km^2); Lt é o comprimento total dos canais (km) e A é a área da bacia considerada (km^2). Esse índice pode variar de $0,5 \text{ km}/\text{km}^2$ em bacias com drenagem pobre a $3,5 \text{ km}/\text{km}^2$, ou mais, em bacias bem drenadas. (VILLELA e MATTOS, 1975). Segundo Cardoso *et.al* (2006), esse índice fornece uma indicação da eficiência da drenagem da bacia, pois indica o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem, e seu estudo aponta para a maior ou menor velocidade com que a água deixa a bacia hidrográfica. Esses dados ajudam, portanto, no planejamento do uso da bacia hidrográfica.

Segundo Villela e Mattos (1975), a densidade de drenagem varia inversamente com a extensão do escoamento superficial. Isso significa que uma bacia que possua, com relação a sua área, um número grande de cursos d'água, a extensão média dos terrenos através dos quais se dá o escoamento superficial é pequena e o deflúvio atinge rapidamente os rios, havendo, provavelmente, picos altos de enchentes e deflúvios de estiagem baixos.

Em um mesmo ambiente climático, a densidade de drenagem é afetada pelo comportamento hidrológico das rochas. Christofolletti (1980) esclarece que nas rochas onde a infiltração é mais difícil, há melhores condições para o escoamento superficial, gerando possibilidades para a esculturação de canais, e, por conseguinte, densidade de drenagem mais elevada. Maksoud (1957), ainda ressalta que, em geral, as maiores densidade de drenagem são associadas a bacias com terrenos de declive mais acentuado, onde há maior incisão de leitos fluviais.

e) *Gradiente Topográfico*

É a diferença entre a maior cota e a menor cota da bacia, dividida pelo seu comprimento. O Comprimento da bacia é definido como sendo a maior distância medida, em linha reta, entre a foz e determinado ponto situado ao longo do perímetro.

f) *Índice de Eficiência de Drenagem (IED)*

O IED é definido por Coelho Netto *et al.* (2007) como um valor proporcional à capacidade do relevo em drenar a água de superfície de uma bacia e por envolver parâmetros morfométricos de área e comprimento de drenagem possui respostas diferentes quando assumidos os diferentes tipos de observações. Desta forma, esse índice indica a capacidade de escoamento da água na bacia hidrográfica. O cálculo é representado pela seguinte equação: $IED = Gt \times Dd$, onde Gt é o valor do gradiente topográfico e Dd é a densidade de drenagem.

3.1.2 *Mecanismos relacionados à hidrologia*

A paisagem, ao longo do tempo, passa por alterações, sejam elas causadas por fatores naturais ou pela atividade humana. Com relação aos mecanismos naturais que interferem nessas mudanças, podemos citar os seguintes fatores:

a) *Características da chuva:*

A intensidade da chuva é um importante fator quanto à infiltração. Isso por que chuvas mais intensas tendem a causar impactos no solo que não apresenta uma cobertura vegetal capaz de produzir sua interceptação. Por outro lado, chuvas com longa duração levam à saturação do solo.

b) *Condições de uso do solo e da cobertura vegetal*

A cobertura vegetal tem como uma de suas funções dentro da bacia hidrográfica interceptar parte da precipitação pelo armazenamento de água nas copas, de onde volta para a atmosfera por evapotranspiração após ou durante as chuvas. Quando a chuva excede a demanda da vegetação, ela chega ao topo do solo por meio do fluxo de tronco ou pelo fluxo de atravessamento. O primeiro ocorre quando a água da chuva atinge o solo através do escoamento pelo tronco, já o

segundo é devido à passagem de água por meio das copas. Uma outra parte da chuva é armazenada pela serrapilheira, encontrada principalmente em áreas florestadas por ser formadas por detritos orgânicos que caem da vegetação.

A cobertura vegetal densa favorece a infiltração, pois dificulta o escoamento superficial da água (MARTINS, 1976). Isso devido a vários fatores como a própria interceptação que contribui para a diminuição do impacto das chuvas sobre o topo do solo, evitando sua compactação pelo impacto da gota formando crostas que são facilmente erodidas com o aumento da quantidade de água nesse sistema. Além disso, a vegetação também é fonte de matéria orgânica para a formação da serrapilheira que exerce um papel importante na estocagem de água no topo do solo e amortece o impacto das gotas.

À medida que a cobertura vegetal se torna mais densa a erosão tende a diminuir. Em áreas urbanas, onde ocorreu a devastação da vegetação e o surgimento de construções civis e pavimentação, a quantidade de água infiltrada reduziu de maneira significativa, causando efeitos catastróficos devido ao aumento do escoamento superficial e redução da recarga da água subterrânea (KARMANN, 2003). Nas áreas rurais, também há um decréscimo na infiltração devido ao desmatamento em geral, exposição de encostas pela plantação em terraceamento, além da compactação do solo provocada pelo pisoteio de animais em áreas extensas onde há a criação de gado (KARMANN, 2003).

c) *Condições de textura, estrutura, profundidade e umidade antecedente:*

Esses fatores correspondem à capacidade de armazenamento de água pelo solo antes de chegar à saturação. De maneira geral, solos profundos e bem drenados, com textura mais grosseira e com grande quantidade de matéria orgânica terão alta capacidade de infiltração. Já os solos mais rasos e argilosos, tenderão à uma capacidade de infiltração mais baixa. A umidade antecedente tem como grande característica, diminuir a capacidade de infiltração do solo contribuindo para sua saturação.

d) *Atividade biogênica no topo dos solos*

Baseado em Coelho Netto (1994), podemos afirmar que a fauna escavadora e as raízes dos vegetais contribuem com o aumento da porosidade do solo, o que leva a um aumento da sua capacidade de infiltração.

e) *Morfologia das encostas*

De maneira geral, relevos acentuados tendem a favorecer o escoamento superficial e a dificultar a infiltração, enquanto superfícies suavemente onduladas permitem o escoamento superficial mais lento, favorecendo a infiltração (KARMANN, 2003). De maneira mais específica, devemos considerar que de acordo com a declividade, do comprimento e da forma da encosta, ela poderá ter maior ou menor suscetibilidade à erosão do solo. No entanto, para a elaboração de uma análise mais confiável, esses fatores devem ser estudados de maneira conjunta com aqueles referentes à cobertura da encosta.

3.2 Hidrologia e Ciclo Hidrológico

Hidrologia é a ciência que trata de estudos da água na natureza. É parte da Geografia Física e abrange, em especial, propriedades, fenômenos e distribuição da água na atmosfera, na superfície terrestre e no subsolo (PINTO, 1976).

O ciclo hidrológico deve ser o ponto de partida para qualquer estudo relativo à água, pois caracteriza-se pela transformação da água em diferentes estados físicos e sua distribuição na atmosfera, na superfície e terrestre e em subsuperfície.

Coelho Netto (1994) descreve o ciclo hidrológico da seguinte forma: parte da água estocada na superfície terrestre é transferida para a atmosfera por evaporação e por evapotranspiração; em seguida, o vapor de água, ao alcançar determinados níveis de altitude e temperatura e/ou encontrarem partículas que sirvam como núcleos higroscópicos, condensa-se. Quando atingem uma massa crítica, as microgotículas não conseguem se manter suspensas e precipitam na forma líquida (chuvas) ou sólida (gelo ou neve), que, antes de atingir a superfície, podem ser parcialmente evaporadas e/ou interceptadas pela vegetação. A água fica armazenada na copa das árvores e na serrapilheira de onde retorna à atmosfera por

evaporação e/ou evapotranspiração. Em regiões glaciais, a água volta à atmosfera por sublimação.

A água da chuva ao atingir o solo infiltra, percola e escoam superficialmente ou subsuperficialmente de acordo com a saturação e características físicas do solo. A água infiltrada e estocada no solo pode ser absorvida pelas plantas e devolvida à atmosfera por evapotranspiração. A água que não retorna à atmosfera abastece os reservatórios subsuperficiais, estes, em muitos casos, alimentam rios e garantem sua perenidade mesmo em períodos de estiagem. Em tempos diferentes, a água infiltrada tem como destino final os corpos de água superficiais, atingindo os oceanos, rios e lagos, que sofrem evaporação e permitem o reinício do ciclo (figura 3.3).

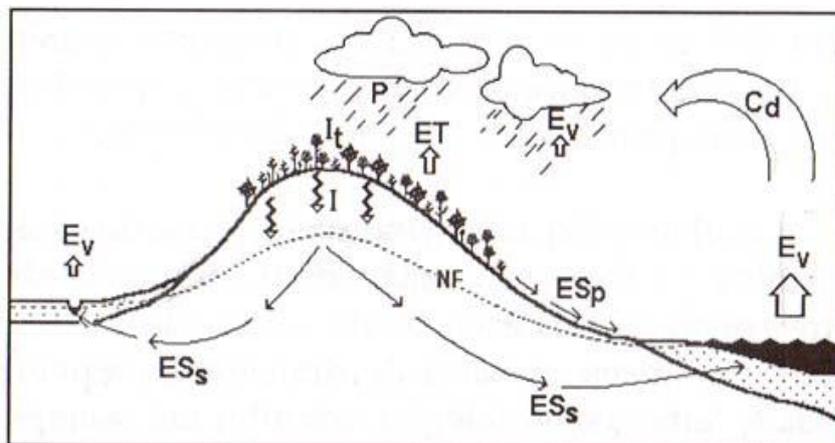


Figura 3.3 – Movimentos e mudanças de estado da água no ciclo hidrológico: Ev = evaporação (oceanos, rios, lagos e durante a precipitação); ET= evapotranspiração (solos e plantas); Cd = condensação do vapor e formação de nuvens; P = precipitação; It = interceptação pela vegetação; I = infiltração; ESp = escoamento superficial; ESs = escoamento subsuperficial ou subterrâneo; NF = nível freático. **Fonte:** Coelho Netto (1994).

Pinto (1976) afirma que o estudo da hidrologia compreende a coleta de dados básicos como, por exemplo, a quantidade de água precipitada ou evaporada e a vazão dos rios; a análise desses dados para o estabelecimento de suas relações mútuas e o entendimento de cada possível fator e a aplicação dos conhecimentos alcançados para a solução de inúmeros problemas práticos. Essa afirmativa traz à luz a importância do balanço hídrico como um instrumento para quantificar o ciclo hidrológico em uma determinada bacia hidrográfica e o hidrograma como um recurso para representar a variação da vazão em função do tempo.

Karmann (2003) afirma que para um ciclo hidrológico completo da bacia, é possível resumir a equação geral do balanço hídrico para $P = E + Q$, onde Q (vazão

total da bacia) representa a soma do escoamento superficial direto com o escoamento da bacia suprido pela água subterrânea e E a água perdida por evapotranspiração.

Ainda segundo o autor supracitado, a medição da vazão (Q) constitui um dos objetivos principais da hidrologia de bacias e baseia-se na construção de um histograma, que expressa a variação da vazão em função do tempo, envolvendo as seguintes etapas:

1. Medição de diferentes vazões do rio ao longo do ano para obter a curva chave que relaciona a altura com a vazão do rio.
2. Obtenção do traçado da variação do nível do rio ao longo do período de monitoramento por meio de um linígrafo.
3. Transformação do registro de variação do nível do rio em curva de vazão (hidrograma), pela substituição de cada ponto de altura do rio pelo seu correspondente valor de vazão.
4. Cálculo da vazão total da bacia através da área sob a curva do hidrograma ($m^3/s \times \text{tempo, em segundos} = \text{volume total}$).

A figura 3.4 ilustra as etapas para obtenção do hidrograma.

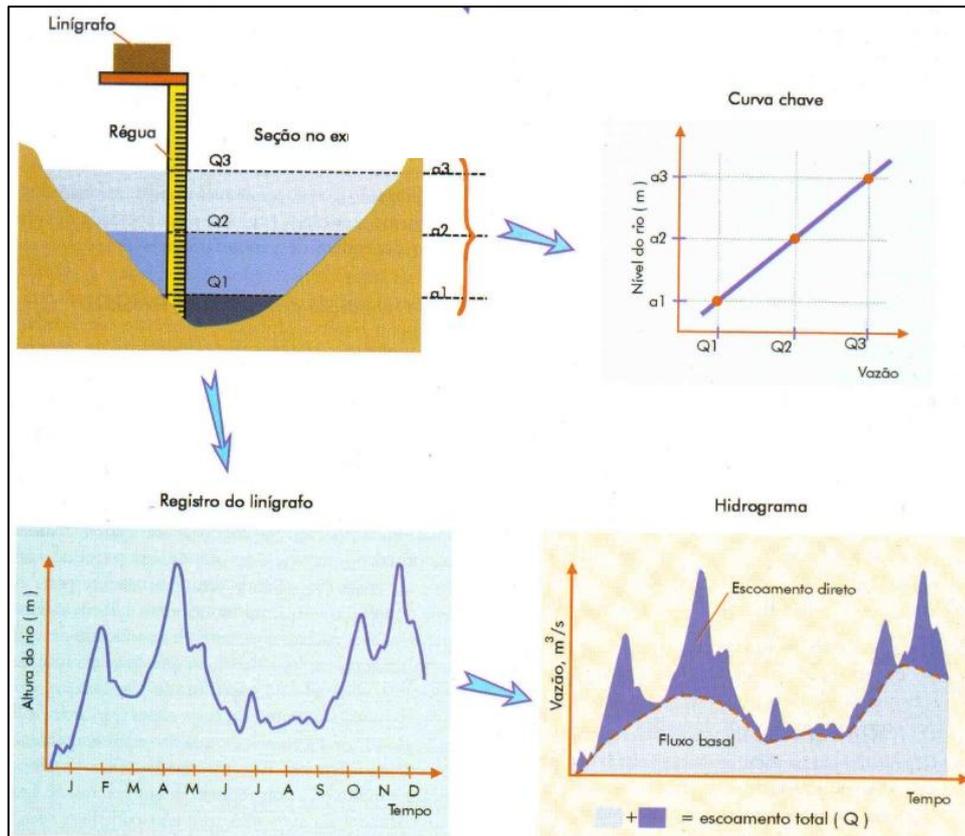


Figura 3.4 – Elementos para obtenção do hidrograma ou da curva chave. O fluxo basal no hidrograma representa a água do rio proveniente da água subterrânea, enquanto o escoamento direto corresponde à água superficial em resposta a eventos de chuva. Fonte: adaptado de Karmann, 2000.

3.3 Modelagem Ambiental

3.3.1 Conceituação de Modelo e Modelagem Hidrológica

A palavra modelo apresenta uma variedade de significados e definições, no entanto, Christofollett (1999) considera a definição proposta por Hagget e Chorley (1975) como sendo a mais adequada. Os referidos autores consideram um modelo como uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características ou relações importantes. Ainda segundo eles, os modelos podem ser considerados como aproximações altamente subjetivas, por não concluírem todas as observações ou medidas associadas.

Um modelo tem como objetivo entender um sistema e buscar suas respostas para diferentes entradas, ou seja, é uma representação do comportamento do sistema (COELHO, 2006). Nesse sentido, Xavier-da-Silva (2001) alerta para a complexidade da modelagem desses sistemas, pois segundo ele, sua execução

requer forte capacidade analítica e sólidos conhecimentos ambientais dos executores.

Os modelos podem descrever processos com diferentes níveis de detalhamento e diferentes escalas de tempo. Um modelo pode ser detalhado, apropriado a pequenos intervalos de tempo e espaço, ou ser mais simples e genérico, podendo simular o comportamento de regiões inteiras e/ou períodos de tempo mais longos (Rennó e Soares, 2000). Os mesmos autores comentam que a escolha do intervalo de tempo no qual o modelo será executado depende basicamente do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados. Para eles, quanto menor o intervalo de tempo maior será a precisão dos resultados, aumentando também o custo computacional para geração destes resultados.

A utilização de modelos pode ser uma importante ferramenta em estudos ambientais por constituírem-se verdadeiras pontes entre os níveis de observação e as proposições teóricas. Segundo Lambin (1994 *apud* Rennó e Soares, 2000) o modelo de um fenômeno deve responder às seguintes questões:

- Quais variáveis ambientais e culturais contribuem para explicar o fenômeno, e quais são os processos ecológicos e sócio-econômicos existentes por trás do fenômeno?
 - Como o processo evolui?
 - Onde ocorrem os fenômenos?

Um modelo que responde a estas questões é capaz de descrever quantitativamente um fenômeno e prever sua evolução, integrando suas escalas temporal e espacial (PEDROSA e CAMARA, 2000).

Os modelos podem ser classificados de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem. Com base em Ferraz *et al* (1999) e Tucci (1998), podemos diferenciar os modelos como:

- *Modelos discretos ou contínuos*: os modelos classificados como discretos representam fenômenos que se dão em intervalos de tempo determinado, enquanto que os modelos contínuos representam fenômenos que ocorrem de maneira contínua;

- *Modelos concentrados (pontuais) ou distribuídos*: nos modelos concentrados os parâmetros de alimentação variam somente em função do tempo, considera-se também que todas as variáveis de entrada e saída são representativas de toda área estudada. Modelos distribuídos são aqueles em que os parâmetros de alimentação variam também segundo o espaço geográfico; modelos distribuídos mais realísticos consideram também a existência de relação espacial entre elementos vizinhos.

- *Modelos estocásticos ou determinísticos*: determinísticos são os modelos em que, para uma mesma entrada, o sistema produz sempre a mesma saída. Já os estocásticos são aqueles em que o relacionamento entre entrada e saída é estatístico; nesse caso, pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório. Se durante a elaboração de um modelo os conceitos de probabilidade sejam negligenciados, este será denominado determinístico.

- *Modelos estáticos ou dinâmicos*: Os modelos podem ser estáticos quando, com um conjunto de dados de entrada produz-se um resultado oriundo da resolução da equação do modelo em um único passo. Já modelos dinâmicos utilizam o resultado de uma iteração como entrada para uma próxima iteração.

- *Modelos conceituais ou empíricos*: modelo conceitual é aquele em que as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos. Os modelos empíricos utilizam relações baseadas em observações, eles ajustam os dados calculados aos observados através de funções empíricas, mas que estão relacionadas com a física do sistema. Os modelos empíricos, em geral, são simples e pouco robustos, pois são específicos para a região considerada nas relações estimadas. Dessa forma, os modelos empíricos não possibilitam fazer simulações de mudanças em condições diferentes das previstas no modelo, tais como, eventos extremos.

Quanto à modelagem hidrológica, Maidment (1993, *apud* FERRAZ *et al*, 1999) a define como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre. Para o referido autor, o uso de modelos hidrológicos espacialmente distribuídos possibilita o incremento das unidades espaciais de estudo em número e em detalhes, permitindo modelagens de nível regional e até continental.

Segundo Ferraz *et al.* (1999) A modelagem hidrológica tem tido sucesso na simulação de fatores temporais em modelos que possuem milhares de passos, mas

nos quais a desagregação espacial da área de estudo é relativamente simples, ou mesmo considerando as propriedades espaciais como uniformes.

3.3.2 *Uso de SIG e Outras Tecnologias em Modelagem Hidrológica*

Os Sistemas Informações Geográficas de (SIG) são definidos por Aronoff (1989) com um sistema baseado no uso computadores que possibilita os quatro seguintes pontos referentes à capacidade de manipular dados georreferenciados: 1) entrada, 2) gerenciamento (armazenamento e recuperação), 3) manipulação e análise e 4) saída.

Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) é o sistema mais adequado para análise espacial de dados geográficos devido à sua capacidade topológica que possibilita estabelecer relações espaciais entre elementos gráficos. Esta estrutura descreve a localização e a geometria das entidades de um mapa e define relações de conectividade, contiguidade e pertinência.

Além de dados geométricos e espaciais, os SIGs possuem atributos alfanuméricos. Os atributos alfanuméricos são associados com os elementos gráficos, fornecendo informações descritivas sobre eles.

De acordo com Camara e Davis (2003), os SIGs reúnem as seguintes características:

- Ter capacidade para coletar e processar dados espaciais obtidos a partir de formas diversas, tais como: levantamento de campo, mapas existentes, fotogrametria, sensoriamento remoto e outros;
- Ter capacidade de armazenar, recuperar, atualizar e corrigir os dados processados de uma forma eficiente e dinâmica;
- Ter capacidade para permitir manipulações à realização de procedimentos de análise dos dados armazenados, com possibilidade de executar diversas tarefas, tais como, alterar a forma dos dados através de regras de agregação definidas pelo usuário, ou produzir estimativas de parâmetros e restrições para modelo de simulação e gerar informações rápidas a partir de questionamentos sobre os dados e suas inter-relações;
- Ter capacidade para controlar a exibição e saída de dados em ambos os formatos, gráfico e tabular.

Os dados nos SIGs podem ser divididos da seguinte forma:

- Dados gráficos, espaciais ou geográficos, que descrevem as características geográficas da superfície (forma e posição) e;
- Dados não gráficos, alfanuméricos ou descritivos, que descrevem os atributos destas características.

Pedrosa e Camara (2000) apontam para o fato de que a tecnologia de Geoprocessamento enfatizou historicamente a representação de fenômenos espaciais no computador de forma estática. Segundo eles, isto se deve ao fato de que a principal abstração utilizada em SIG é o mapa. No entanto, existe um significativo conjunto de fenômenos espaciais, tais como escoamento de água da chuva, planejamento urbano e dispersão de sementes, entre outros, são inerentemente dinâmicos e as representações estáticas comumente utilizadas em SIG não os capturam de forma adequada. Deste modo, os mesmos autores concluem que um dos grandes desafios da Ciência da Informação Espacial e o desenvolvimento de técnicas e abstrações que sejam capazes de representar adequadamente fenômenos espaço-temporais dinâmicos.

A modelagem de grande quantidade de processos físicos, em aplicações como Geomorfologia, Estudos Climáticos, Dinâmica Populacional e Impacto Ambiental, requer que os SIGs tenham capacidade de representar os tipos de processos dinâmicos encontrados em estudos de sistemas físicos e socioeconômicos (PEDROSA e CAMARA, 2000). Para os mesmos autores, o objetivo dos modelos dinâmicos em SIGs é realizar a simulação numérica de processos dependentes do tempo, como nos modelos hidrológicos, que simulam o fluxo e transporte de água.

Segundo Pedrosa e Camara (2000), tipicamente, GIS são desenvolvidos a partir de suposições pré-estabelecidas quanto a homogeneidade, uniformidade e universalidade das propriedades de seus principais componentes, que incluem o espaço e as relações espaciais, o tempo e o modelo matemático que descreve o fenômeno. Entretanto, para modelar processos dinâmicos em SIG com o nível necessário de realismo, estas suposições rígidas têm que ser flexibilizadas de tal forma que o sistema seja capaz de representar:

- O espaço como uma entidade não homogênea tanto nas suas propriedades quanto na sua estrutura;
- As vizinhanças como relações não estacionárias;
- As regras de transição como regras não universais;
- A variação do tempo como um processo regular ou irregular;
- O sistema como um ambiente aberto a influências externas.

Segundo Ferraz *et al* (2009), por volta dos anos 60, com a utilização dos computadores chegaram os primeiros modelos que procuraram retratar o comportamento de bacias hidrográficas através de equações empíricas em computadores. Segundo os mesmos autores, o Stanford IV foi um dos primeiros a serem bem-sucedidos, mas tinha como principal desvantagem o grande número de parâmetros de entrada necessários a sua operacionalização, mas representava a maioria dos processos da transformação precipitação-vazão e podia ser utilizado em bacias urbanas e rurais com diferentes tamanhos e coberturas.

Mero (1969, *apud* FERRAZ *et al*, 2009) desenvolveu um modelo determinístico de simulação digital hidrológica, transformando chuva em vazão em nível diário. O modelo simula o ciclo hidrológico através da distribuição de lâmina precipitada na bacia em vários níveis de armazenamento, simulados por reservatórios hipotéticos, que são inter-relacionados pelo teor de umidade do solo da bacia.

O modelo Topmodel, desenvolvido em 1979, baseia-se na teoria de contribuição variável para formação do escoamento e estima o déficit hídrico no solo e área fonte saturada (área de contribuição direta) a partir de características topográficas e do solo (RENNÓ E SOARES, 2000). Esse modelo é utilizado para previsão de vazão em chuvas de curta duração e foi o precursor dos modelos baseados em SIG e utiliza para a análise topográfica um Modelo Digital de Elevação (FERRAZ , 2009).

Mais recentemente, como parte dos esforços dos desenvolvedores da ESRI, para mostrar que o Arc GIS pode ser customizado para aplicações usando modelos específicos, ocorreu uma associação entre o *Center for Research in Water Resources* (CRWR) da universidade do Texas em Austin e a ESRI formando a *GIS in Water Resources Consortium* que envolve representantes da indústria, do governo

e entidades acadêmicas para desenvolvimento de modelagem de dados de recursos hídricos. Uma série de protótipo de modelagem de dados foram construídas e testadas pela CRWR até alcançar a corrente forma, cujo resultado foi formalmente chamada de modelo Arc Gis Hydro, mas e informalmente conhecido como Arc Hydro. (MAIDMENT, 2002).

O Arc Hydro é um modelo de dados geoespaciais e temporal para dados de recursos hídricos que opera dentro do Arc GIS descrevendo o sistema hídrico natural. Ele tem um conjunto de ferramentas construídas juntamente pela ESRI e CRWR para representar características hidrológicas no SIG. Seu objetivo foi apoiar uma representação cartográfica das características básicas da água na superfície, permitindo simultaneamente a integração desses recursos com os modelos de simulação hidrológica e hidráulica, e a associação de características como pontos de monitoramento com dados de séries temporais.

A concepção e o aperfeiçoamento deste modelo surgiram a partir da necessidade de se compreender os eventos extremos ocorridos no Texas a partir de 1996. Neste ano, este estado passou por uma grande seca que colocou as autoridades e a sociedade civil em alerta, trazendo a discussão sobre a necessidade de haver um planejamento e gestão de recursos hídricos que ocorresse de forma eficiente.

O trabalho realizado por Spence e Hosler (2007) mostra o uso da extensão Arc Hydro em um estudo realizado em uma bacia de 150 km², o objetivo do trabalho era compreender a resposta do escoamento superficial e sua relação com a paisagem heterogênea da região estudada. Para tanto, os autores utilizaram dados de uso e cobertura do solo, de densidade de drenagem, pedológicos, além de hidrograma de média anual e série histórica de vazões diárias entre 1987 e 1993. Por meio do Arc Hydro foram geradas as redes de drenagem, as áreas de acumulação e direção de fluxo, além de definir a topologia da rede de drenagem.

Konadu e Fosu (2009) utilizaram o Arc Hydro para delinear padrões de drenagem da bacia estudada e confeccionaram mapas de inundação na região de Accra, em Ghana. Os mapas de inundação resultantes mostram que cerca de 80% de áreas que perenemente experimentaram grandes inundações na cidade coincidem com a extensão da inundação prevista, o que revela a eficiência do

modelo. Os autores ainda apontam que a abordagem utilizada no trabalho pode fornecer um meio simplificado de prever a extensão da inundação durante cheias, especialmente em economias menos desenvolvidas, onde as tecnologias e os conhecimentos sofisticados são difíceis de encontrar.

Diakakis (2011) utilizou o Arc Hydro em uma das etapas de elaboração de um método de SIG para avaliação de risco de inundações rápidas em quatro bacias hidrográficas na Grécia. Através do Arc Hydro foram feitas a delimitação automática de sub-bacias, o desenvolvimento automático da direção do fluxo e grades de acumulações de fluxo com base nos Modelos Digitais de elevação (MDE) iniciais.

Correia (2011) desenvolveu uma modelagem hidrológica utilizando o Arc Hydro em parte do processo e obteve os resultados esperados que eram: delimitar a bacia hidrográfica como um todo e pormenorizada em forma de sub-bacias, gerar um MDE hidrológicamente consistente, e ainda compor um banco de dados associado ao estudo da bacia do rio Bengalas, em Nova Friburgo (RJ).

Esses estudos demonstram as potencialidades do Arc Hydro na modelagem hidrológica.

4 ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização

A bacia do Córrego Sujo localiza-se na região serrana do estado do Rio de Janeiro, no município de Teresópolis (figura 4.1), mais precisamente, entre as coordenadas geográficas $22^{\circ}15' - 22^{\circ}10' S$ de latitude e $42^{\circ}55' - 42^{\circ}45' W$ de longitude (UTM: 0720000 m E/7534000 m N e 0720000 m E/7546000 m N).

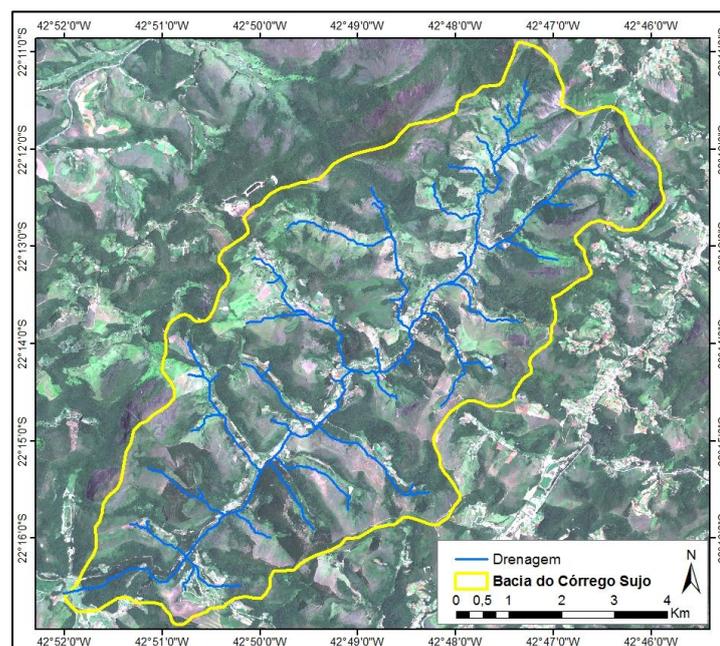
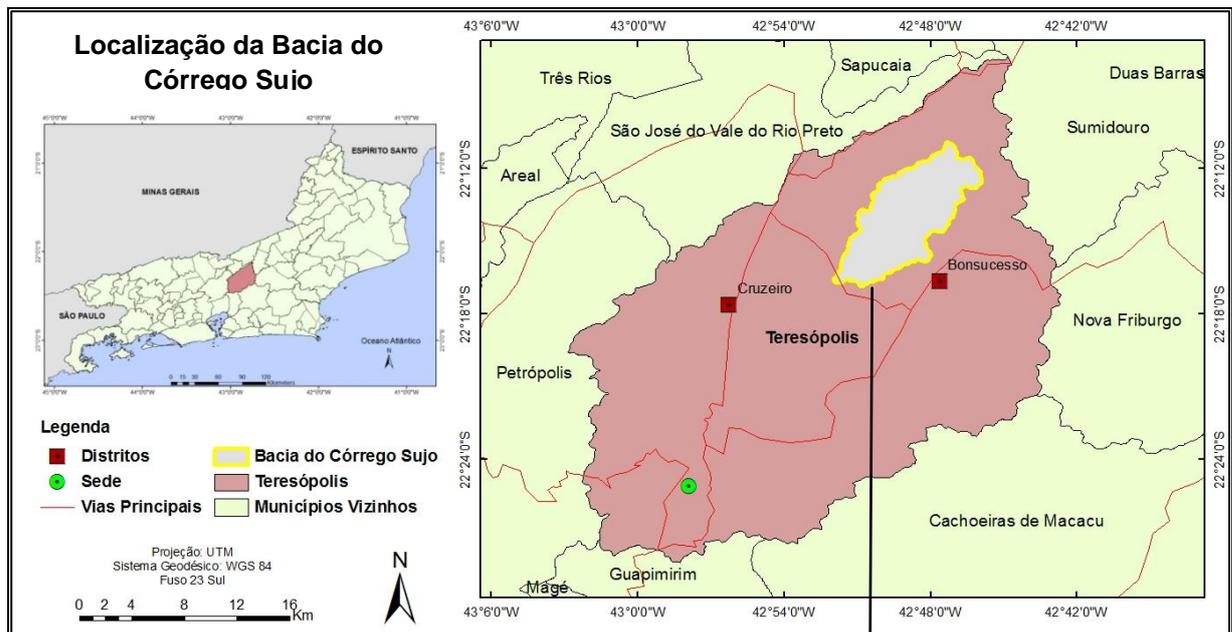


Figura 4.1 – Mapa de localização da bacia do Córrego Sujo

4.2 Caracterização da Área de Estudo de Acordo com o Projeto Rio de Janeiro da CPRM

A caracterização ambiental deste item foi realizada com base no Projeto Rio de Janeiro elaborado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM do ano 2000 e 2001. Nesse projeto foi elaborado um mapa geológico de todo o estado na escala 1:400.000 produzido em parceria com o Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (DRM-RJ). O diagnóstico geoambiental foi realizado na escala 1:500.000 por Dantas *et al* (2000) e a caracterização geomorfológica na escala 1:250.000 por Dantas (2000).

4.2.1 Geologia

Com base no mapa geológico do estado do Rio de Janeiro (CPRM/DRM-RJ, 2000), o município de Teresópolis está geologicamente inserido no grupo Neoproterozóico/Cambriano na Suíte Serra dos Órgãos e nas Unidades Serra dos Órgãos e Santo Aleixo:

- Unidade Serra dos Órgãos: Hornblenda-biotita granitóide de granulação grossa e composição expandida de tonalítica a granítica, composição cálcio-alcálica. Texturas e estruturas magmáticas preservadas com foliação tangencial em estado sólido superimpostas. Localmente podem ser observados enclaves paleodiques anfíbolíticos.
- Unidade Santo Aleixo: Fácies marginal do Batólito Serra dos Órgãos constituída por granada-hornblenda-biotita granodiorito, rico em xenólitos de paragneisse parcialmente fundido e assimilado (migmatito de injeção).

Segundo Silva *et al* (2001), a Suíte Serra dos Órgãos é o maior batólito granítico exposto no estado, apresentando uma forma extremamente alongada, com 140 km de comprimento por 20 km de largura média. O batólito é envolvido nas bordas oeste e sul pelos ortogneisses do Complexo Rio Negro, no qual é intrusivo, e na borda norte pelo Leucogranito Gnaiss Serra do Paquequer. Na porção nordeste é intrusivo nos paragneisses do Complexo Paraíba do Sul.

4.2.2 *Caracterização Geoambiental*

O subdomínio Serras do Mar e da Mantiqueira, onde se localiza a área de estudo, abrange a unidade geoambiental denominada como Montanhas. O relevo dessa unidade é montanhoso, sustentado por granitóides e granitos, situados no batólito Serra dos Órgãos, charnockitos e paragneisses.

As vertentes são predominantemente retilíneas a côncavas e escarpadas e topos de cristas alinhadas, aguçados ou levemente arredondados. Apresenta amplitudes topográficas entre 350 e 600 m. Predominam afloramentos de rocha e Neossolos Litólicos. A vegetação original era composta por formações rupestres, floresta perenifólia e campos de altitude, situada nos altos cumes da Região Serrana. A precipitação média anual varia de 1.100 a 2.200 mm.

Esse subdomínio apresenta como limitações os terrenos rochosos e escarpados, constituindo paredões subverticais. Ocorrência generalizada de afloramentos de rocha. Alta suscetibilidade a processos de erosão e movimentos de massa (inclusive queda de blocos). Solos muito rasos, inaptos para urbanização, agricultura e pecuária. Potencial hidrogeológico nulo.

Como potencialidades podem-se citar as áreas de beleza cênica, indicadas para turismo de baixa densidade e áreas de mananciais. Sendo recomendada a preservação ambiental da mata atlântica e campos de altitude, além da proteção dos mananciais e do ecoturismo.

4.2.3 *Geomorfologia*

Com base na carta geomorfológica do estado do Rio de Janeiro elaborado na escala 1:250.000, a área de estudo está inserida no sistema de relevo denominado de “relevos de degradação em áreas montanhosas”, mais especificamente no “Domínio Montanhoso”, que possui um relevo montanhoso, muito acidentado, localizado, em geral, no reverso da escarpa da Serra do Mar.

As vertentes predominantemente retilíneas a côncavas, escarpadas e topos de cristas alinhadas, aguçados ou levemente arredondados. Com ocorrência de compartimentos colinosos e/ou de morros, em seções alveolares nos vales principais. Existindo ocorrência pontual de relevo suavemente ondulado, com

elevações locais, localizado nos planaltos elevados das serras do Mar e da Mantiqueira.

A densidade de drenagem nessa unidade é alta, com padrão de drenagem variável, de dendrítico a treliça ou retangular.

Outra característica do domínio montanhoso é o predomínio de amplitudes topográficas superiores a 400 m e gradientes elevados a muito elevados, "monadnocks" depósitos de tálus e solos rasos com ocorrências de colúvios e afloramentos de rocha.

4.3 Caracterização da Área de Estudo com Base em Estudos Realizados no Município de Teresópolis e na Bacia do Córrego Sujo.

4.3.1 Clima

Segundo os dados das "Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990" divulgados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o município de Teresópolis possui 17,7°C de temperatura média compensada. A temperatura mínima registrada nesse período foi de 13,3°C e a máxima foi de 23,5°C. A precipitação anual média foi de 2774,3 mm.

Como pode ser observado na figura 4.2, os meses de junho a agosto apresentaram os menores valores de precipitação e de temperatura, enquanto que de novembro a fevereiro foi o período mais chuvoso e mais quente.

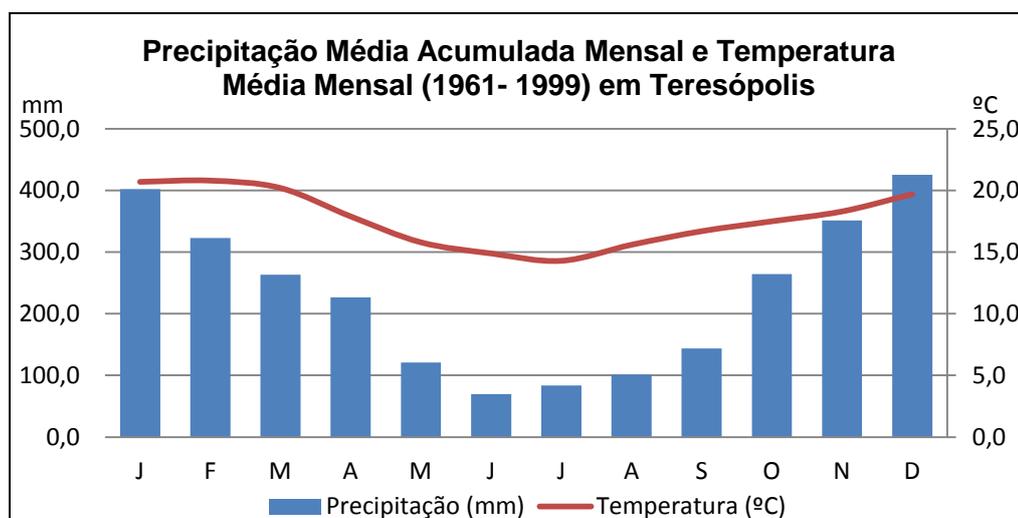


Figura 4.2 – Precipitação média acumulada mensal e temperatura média em Teresópolis, entre os anos de 1961-1990. **Fonte:** INMET (2009).

Os dados de precipitação e temperatura regionais registrados nas estações de Teresópolis e Nova Friburgo, para os anos entre 1995 e 2003, citados por Barreto (2005), indicam uma precipitação média anual acima dos 1350 mm para ambos os municípios e temperaturas em torno de 13 a 23°C.

Tanto os dados do INMET quanto os dados divulgados por Barreto (2005) pode-se observar a constância nos valores de temperatura; no entanto, os valores de precipitação foram maiores entre os anos de 1961 e 1990.

Conforme os dados apresentados, o clima em Teresópolis pode ser caracterizado como tropical de altitude, observando-se maior concentração de chuvas e maiores temperaturas no verão e período de seca e de menores temperaturas no inverno.

4.3.2 Uso do Solo e Cobertura Vegetal

A bacia do Córrego Sujo apresenta uma paisagem diversificada, na figura 4.3 pode-se observar a presença de gramínea, floresta e o uso agrícola que se destaca nos fundos de vale.

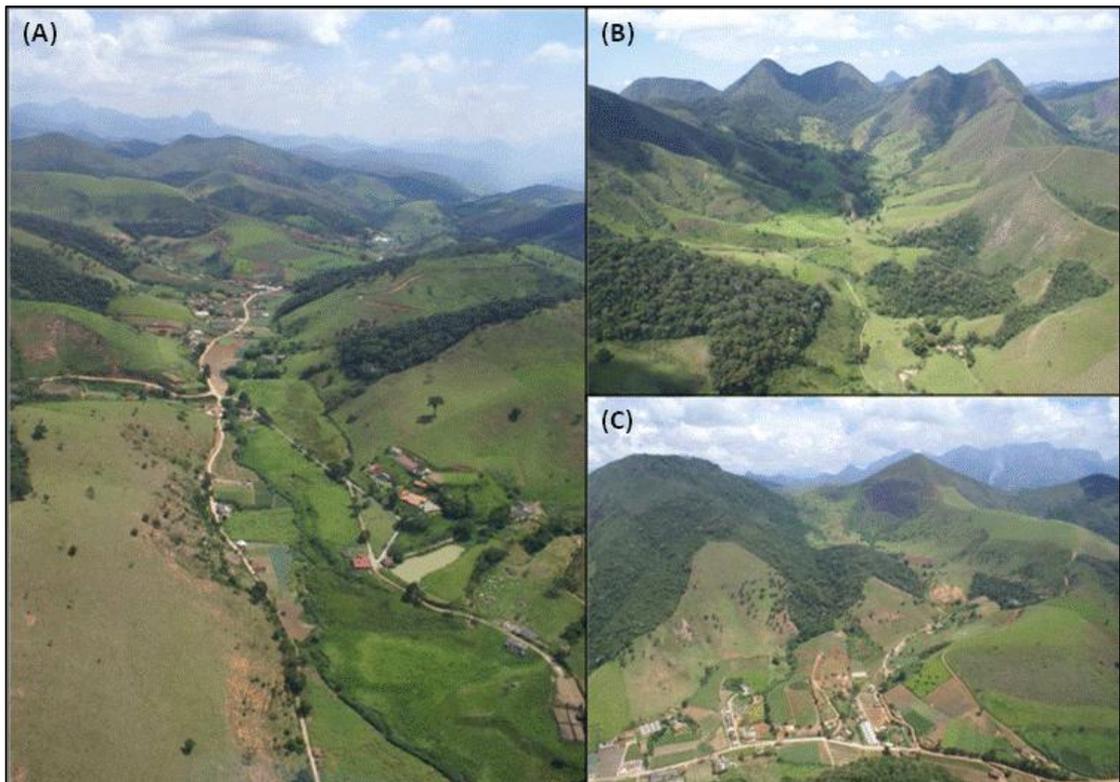


Figura 4.3 – Mosaico da paisagem e característica geomorfológica geral da bacia (A, B, C) e a presença da agricultura nos fundos de vale (A, C). **Fonte:** GEOHECO/UFRJ – Dezembro/2008.

Araújo (2009) estudou as alterações na dinâmica da paisagem da bacia do Córrego Sujo entre 1999 e 2006 e comparou, por meio de um mapeamento na escala 1:30.000, as mudanças ocorridas no uso do solo e na cobertura vegetal, como pode ser observado na figura 4.4 e na figura 4.5.

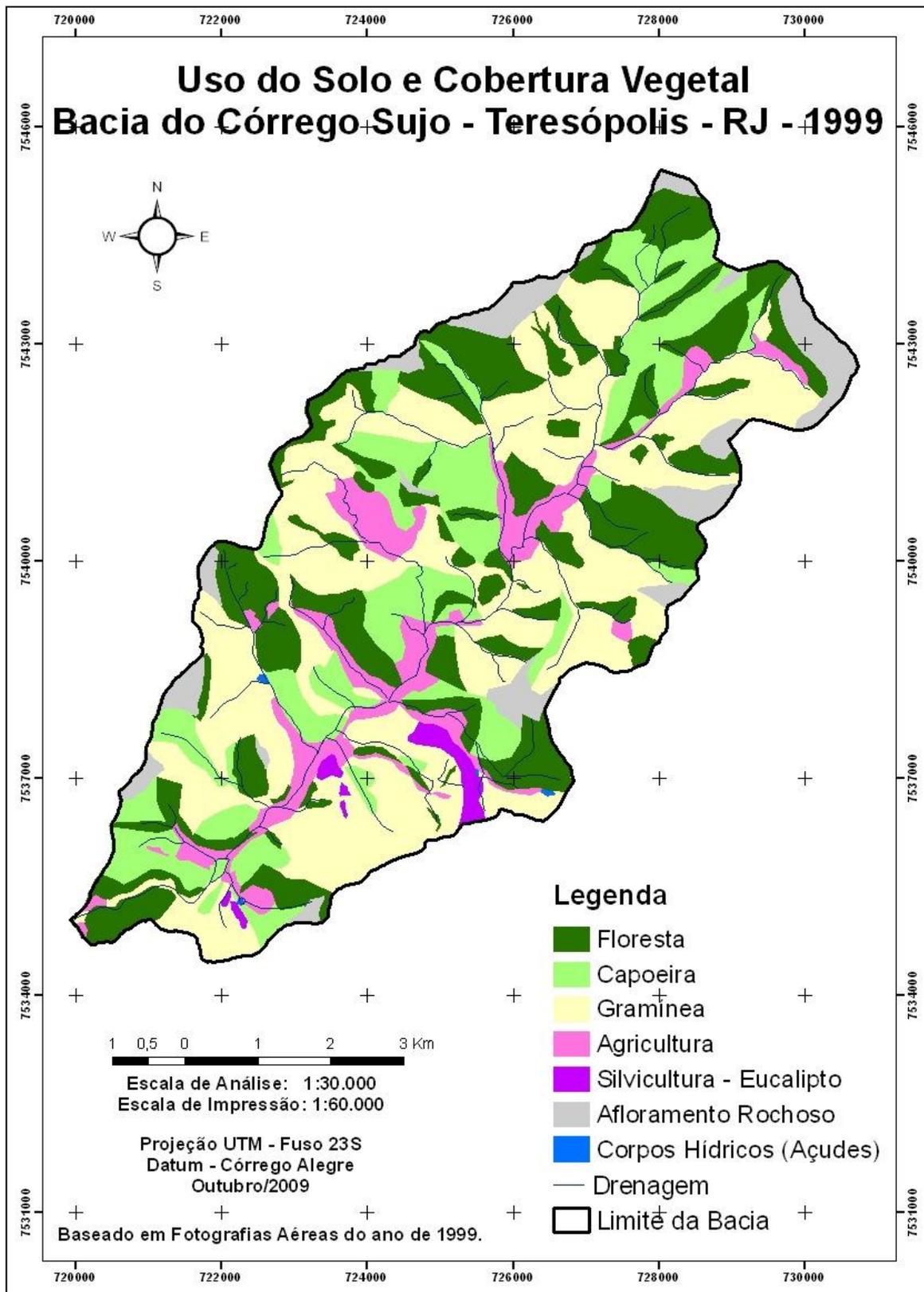


Figura 4.4 – Mapa de uso e cobertura vegetal da bacia do Córrego Sujo no ano de 1999. **Fonte:** Araujo, 2006.

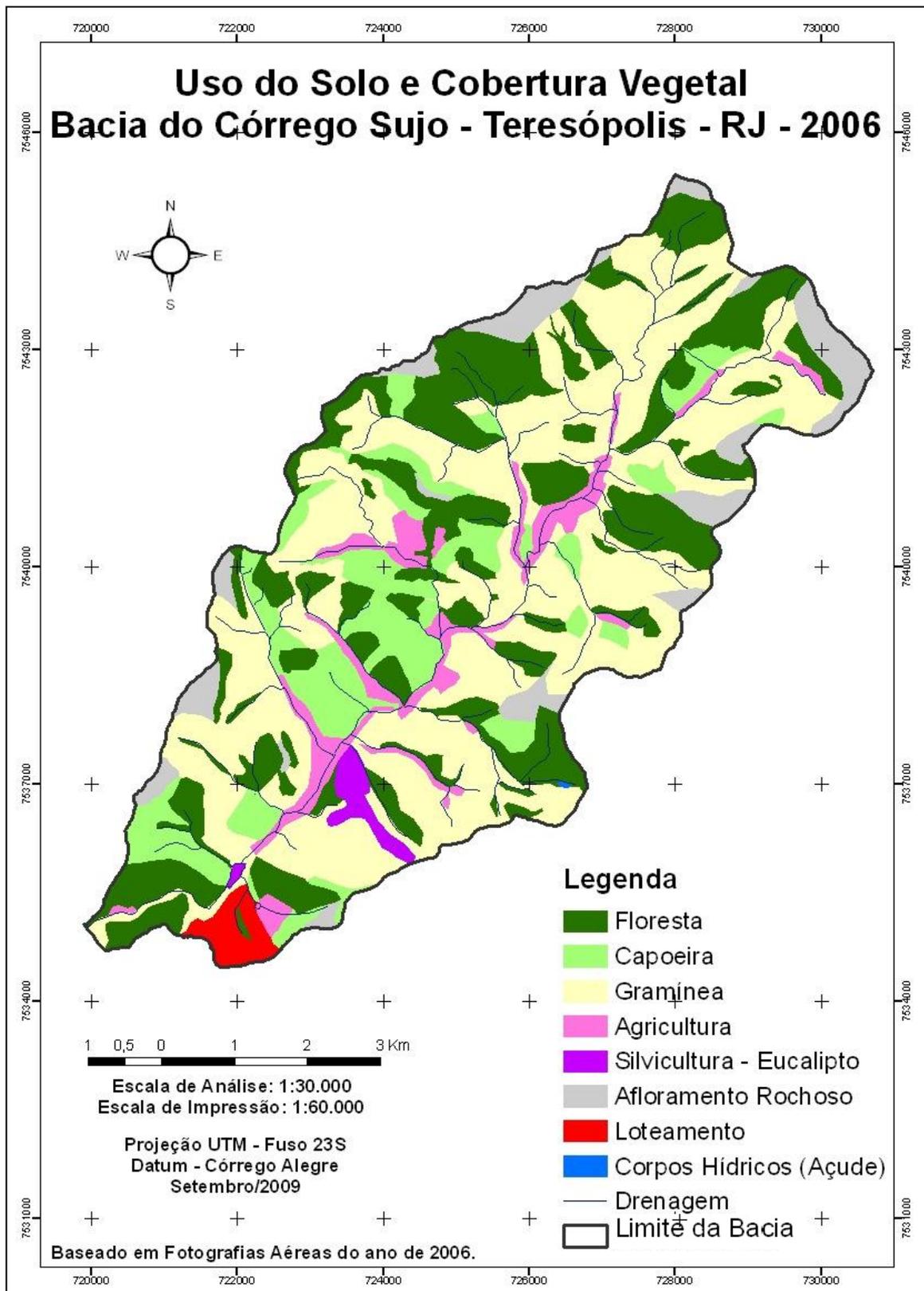


Figura 4.5 – Mapa de uso e cobertura vegetal da bacia do Córrego Sujo no ano de 2006. **Fonte:** Araujo, 2009.

Podemos observar na tabela 4.1 que ao longo de sete anos as maiores alterações foram sofridas pela agricultura, que diminuiu cerca de 0,5 km², e de gramínea, que aumentou de 19,63 km² para quase 23 km² da área da bacia.

Quanto às características da vegetação pode-se observar nas figuras 4.4 e 4.5 que as áreas de florestas são, na verdade, constituídas por fragmentos florestais. Pode-se perceber ainda a presença de vegetação nativa, sobretudo no alto curso e áreas com vegetação secundária. Podemos afirmar também que há espécies em diversos estágios sucessionais (algumas consideradas como capoeiras). Outro aspecto a ser mencionado é o aumento significativo da área de eucalipto registrado em 2012 como será apresentado mais a frente.

Tabela 4.1: Alterações na dinâmica da paisagem (ARAÚJO, 2009)

Classes	Área (km ²)	
	1999	2006
Afloramento Rochoso	3,89	3,89
Agricultura	4,99	3,45
Capoeira	10,26	7,20
Corpos Hídricos	0,04	0,01
Floresta	14,03	14,73
Gramínea	19,63	22,91
Silvicultura - Eucalipto	0,55	0,57

Segundo informações do Plano Diretor Sustentável de Teresópolis (2006), o desmatamento das áreas florestais originais no município se deu em função da expansão das atividades rurais e da urbanização, que tiveram maior expansão no século XX. Tais usos concentraram-se ao longo dos vales fluviais encaixados, acelerando os impactos causados nos rios e matas ciliares. Devido ao crescimento e valorização do centro urbano, uma parte da população migrou para as regiões periféricas, contribuindo para aumentar a pressão antrópica nas áreas localizadas em altas declividades, nas cabeceiras de drenagem e nos remanescentes florestais.

Uma intervenção mais recente foi a dragagem de alguns trechos do Córrego Sujo. A dragagem foi uma alternativa do poder público para o desassoreamento de diversos rios da região após os eventos extremos ocorridos em janeiro de 2011. Alpino Rodrigues *et al* (2012) constataram no médio curso do rio, um mês após a dragagem (abril de 2012), a supressão da mata ciliar (figura 4.6), o aprofundamento

expressivo na margem direita e um rebaixamento no nível do rio na margem esquerda alterando a morfologia e, conseqüentemente, a curva-chave desta seção.



Figura 4.6 – Dredge removendo a vegetação da margem direita do Córrego Sujo. Fotografia tirada durante a medição da vazão do mês de abril de 2012.

4.3.3 Pedologia

De acordo com o trabalho desenvolvido por Oliveira (2007), a bacia do Córrego Sujo apresenta um caráter pedológico e geológico relativamente heterogêneo no que diz respeito à classificação do seu solo. A referida autora desenvolveu um trabalho de caracterização pedológica utilizando duas metodologias: uma preliminar, com o auxílio de mapas geológicos e pedológicos dos Projetos Radam Brasil e do Projeto Rio de Janeiro (CPRM, 2000), em escala 1:500.000, e a determinação das características pedológicas em diferentes pontos de setores da bacia hidrográfica, conforme a figura 4.7. Os resultados mostraram a presença de Cambissolo Háplico Tb Distrófico, Neossolo Flúvico tb distrófico, Neossolo Litólico Eutrófico, Chernossolo Argilúvico Órtico e Argissolo Acizentado Distrófico nos perfis pedológicos.



Figura 4.7 – Solos da bacia do Córrego Sujo: SB7, Perfil 1 – Latossolo Bruno Distrófico (LBd) e Perfil 2 - Cambissolo Háplico Distrófico (CXbd); SB8, Perfil 3 - Neossolo Litólico Eutrófico (Rle); SB9, Perfil 4 – Chernossolo Argilúvico Órtico (Mto). **Fonte:** Oliveira, 2007.

Menezes (2009) fez um estudo sobre a relação da chuva com a erosão, o escoamento superficial e a permeabilidade do solo em diferentes coberturas vegetais na bacia do Córrego Sujo. Para tanto, foram instalados quatro pluviômetros convencionais e dois pluviômetros digitais e quatro parcelas hidro-erosivas do tipo Gerlach (5 m x 2 m = 10 m²), conforme figura 4.8, em quatro diferentes tipos de uso do solo (agricultura convencional, permacultura, pastagem e floresta).

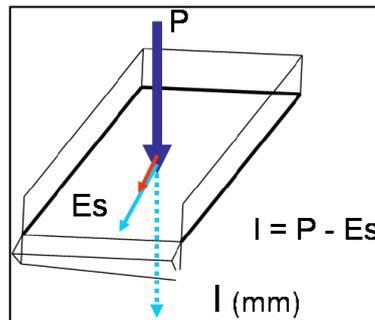


Figura 4.8 – Modelo de parcela hidro-erosiva do tipo Gerlach. Fonte: Menezes, 2009.

Ao fazer a análise chuva-escoamento foi constatado que os solos da floresta são mais estruturados e apresentam valores elevados de capacidade de infiltração (permeabilidade). Por outro lado, a agricultura convencional mostrou uma baixa condutividade hidráulica, o que auxilia a ocorrência de escoamento superficial.

Os resultados de produção de sedimentos da maioria dos ensaios constataam uma erosão mais acentuada na maior declividade de 22°.

Na relação chuva versus erosão foi constatado que as maiores perdas de solo se encontram na parcela localizada na olericultura, onde no período de estudo foram computados aproximadamente 500.000 kg/ha, enquanto na parcela da área da permacultura, que é a segunda maior perda, foram computados apenas 20 kg/ha, os menores valores foram nas parcelas em pastagem e floresta, com cerca de 4 e 5 kg/ha, respectivamente.

Ao relacionar os dados de Menezes (2009) com o uso do solo, o relevo e o clima, pode-se constatar que a bacia do Córrego Sujo apresenta uma considerável vulnerabilidade à perda de solo, o que contribui para o assoreamento dos canais fluviais que pode ser intensificado com a retirada da mata ciliar e a redução das áreas de floresta.

5 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo foi estruturado em três itens que compõem as fases de elaboração e execução da modelagem: a primeira, item 5.1, irá explicar as etapas de obtenção da base de dados que irá alimentar o modelo; no item 5.2 será descrito cada procedimento realizado utilizando a ferramenta Arc Hydro e o item 5.3 apresentará os parâmetros para a modelagem hidrológica da bacia do Córrego Sujo.

5.1 Base de Dados Utilizada na Modelagem

5.1.1 *Elaboração do Modelo Digital de Terreno (MDT)*

O módulo Arc Hydro utiliza os valores da altimetria do terreno, em formato *grid*, para gerar informações como: direção e acumulação de fluxo, linhas de drenagem e delimitação de áreas de contribuição para geração de fluxos d'água.

Neste trabalho foi elaborado um MDT gerado no *software* Arc Gis 9.3, através da extensão 3D Analyst, a partir de curvas de nível na escala 1:10.000 e dos pontos cotados gerados pela empresa Ampla Energia e Serviços S.A, além de pontos cotados obtidos por equipes do GEOHECO na campanha de georreferenciamento da imagem GeoEye.

Segundo informações cedidas pela Ampla, as “curvas de nível” dos arquivos na escala de 1:10.000 são provenientes da modelagem digital do Terreno (MDT) confeccionada para a geração de ortofotos no ano de 1999. As ortofotos foram produzidas em estações fotogramétricas utilizando o *software* *Socet Set*, ou seja, após a realização da aerotriangulação, com os pontos de controle levantados com equipamentos GPS geodésicos em campo, foi feita a orientação interior e a exterior nos diapositivos digitais provenientes das fotografias aéreas, para que o programa representasse o instante da tomada das fotos. Após a orientação de várias imagens formando blocos, foi gerado o MDT de forma automática pelo *software*, através dos pontos cotados em campo. Depois, os blocos das ortofotos foram divididos e cortado em folhas na escala de 1:10.000. Posteriormente, foi realizada a digitalização dos objetos geográficos das imagens gerando os arquivos vetoriais. Já os pontos

cotados foram confeccionados de forma tradicional da produção cartográfica, através de estações restituidoras e com precisão melhor do que 60 cm.

A figura 5.1 ilustra esta etapa de organização das bases cartográficas.

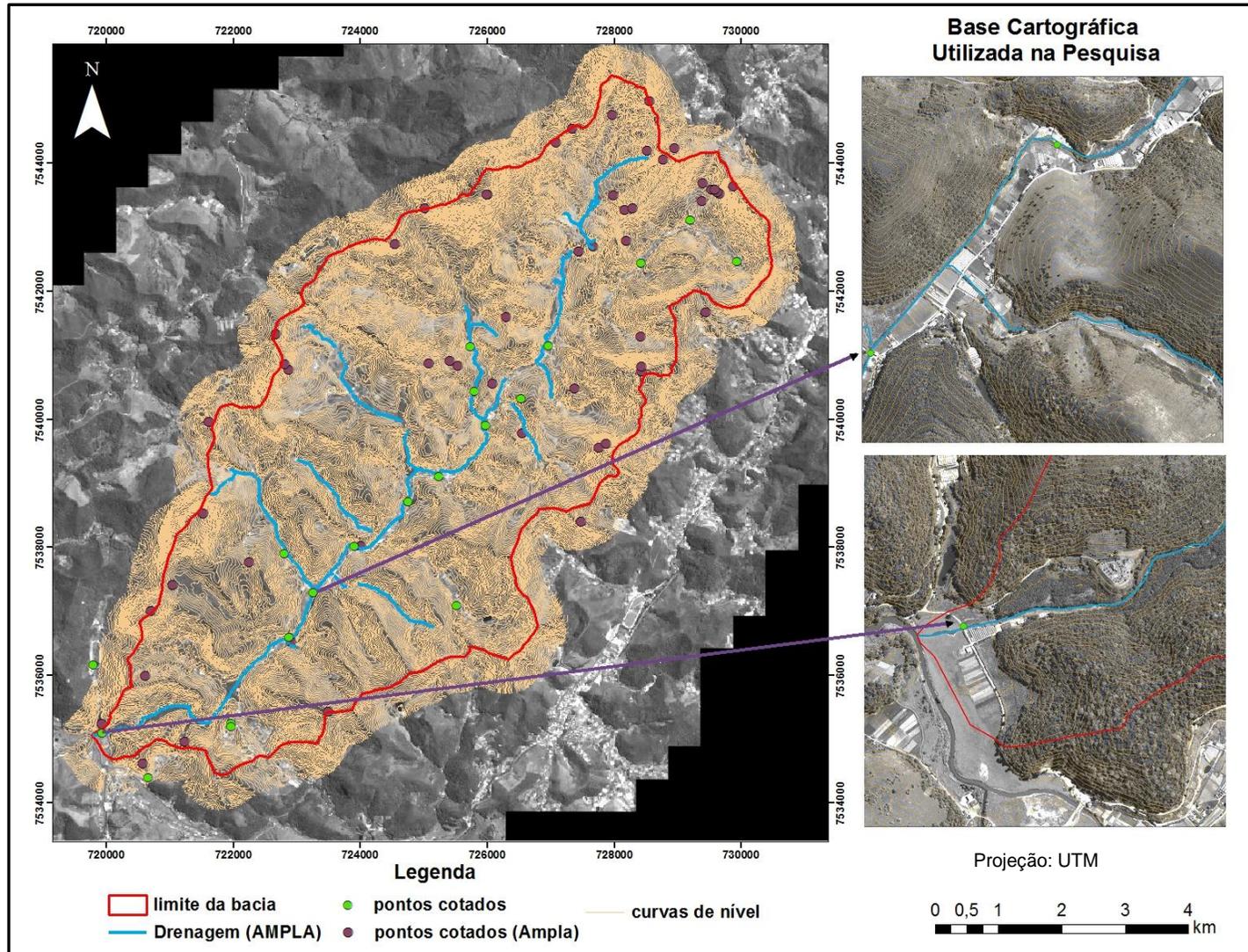


Figura 5.1 – Base cartográfica utilizada na pesquisa

Durante a geração do MDT no Arc Gis, optou-se por utilizar o método da Interpolação de Grade Irregular triangular (TIN) ou triangulação de Delaunay. A malha triangular ou TIN (do inglês “triangular irregular network”) é uma estrutura do tipo vetorial com topologia do tipo nó-arco e representa uma superfície através de um conjunto de faces triangulares interligadas. Para cada um dos três vértices da face do triângulo são armazenadas as coordenadas de localização (x, y) e o atributo z, com o valor da altitude (CAMARA e MONTEIRO, 2001).

Cabe ressaltar que Sousa *et al* (2008) ao desenvolverem um trabalho comparando os modelos TOPGRID e TIN verificaram que os dois modelos apresentaram boa resposta em declividades menores e pior desempenhos em altas declividades, no entanto, o modelo TIN apresentou melhor resposta em declividade superior a 30°. Os autores explicam que o melhor desempenho, comparativamente, do TIN nas altas declividades se deve ao fato desse método interpolador funcionar melhor com maior quantidade de dados de entrada. Sendo assim, quanto mais curvas de nível próximas, mais informação para geração do modelo, sendo essa situação justamente aquela verificada nas altas declividades, onde as curvas de nível estão mais próximas. Considerando que o relevo da área de estudo caracteriza-se por apresentar vertentes íngremes, tem-se que o modelo TIN, utilizado neste trabalho, realmente é o mais adequado.

Para utilizar o MDT no Arc Hydro foi necessário transformar o resultado da interpolação em estrutura matricial (ou raster). Essa estrutura permite representar os objetos através de uma matriz de células denominadas pixels¹. Dessa forma, cada pixel do MDT possui um par de coordenadas espaciais associado ao seu par de coordenadas da matriz (coluna, linha) e também armazena seu valor de altimetria. Neste trabalho, cada pixel possui um tamanho aproximado de 10 x 10 metros, ou seja, cada pixel representa uma área de 100m².

A interpolação dos dados para geração do MDT e a transformação do arquivo resultante em um formato *raster* foram executadas através da extensão 3D Analyst do software Arc Gis 9.3. A figura 5.2 mostra o resultado da elaboração do MDT e a figura 5.3 ilustra o MDT em formato *raster*.

¹ Pixel pode ser a abreviação de *picture element*, que é o menor elemento discreto componente dos dados matriciais ou *raster* (Barros, 2006).

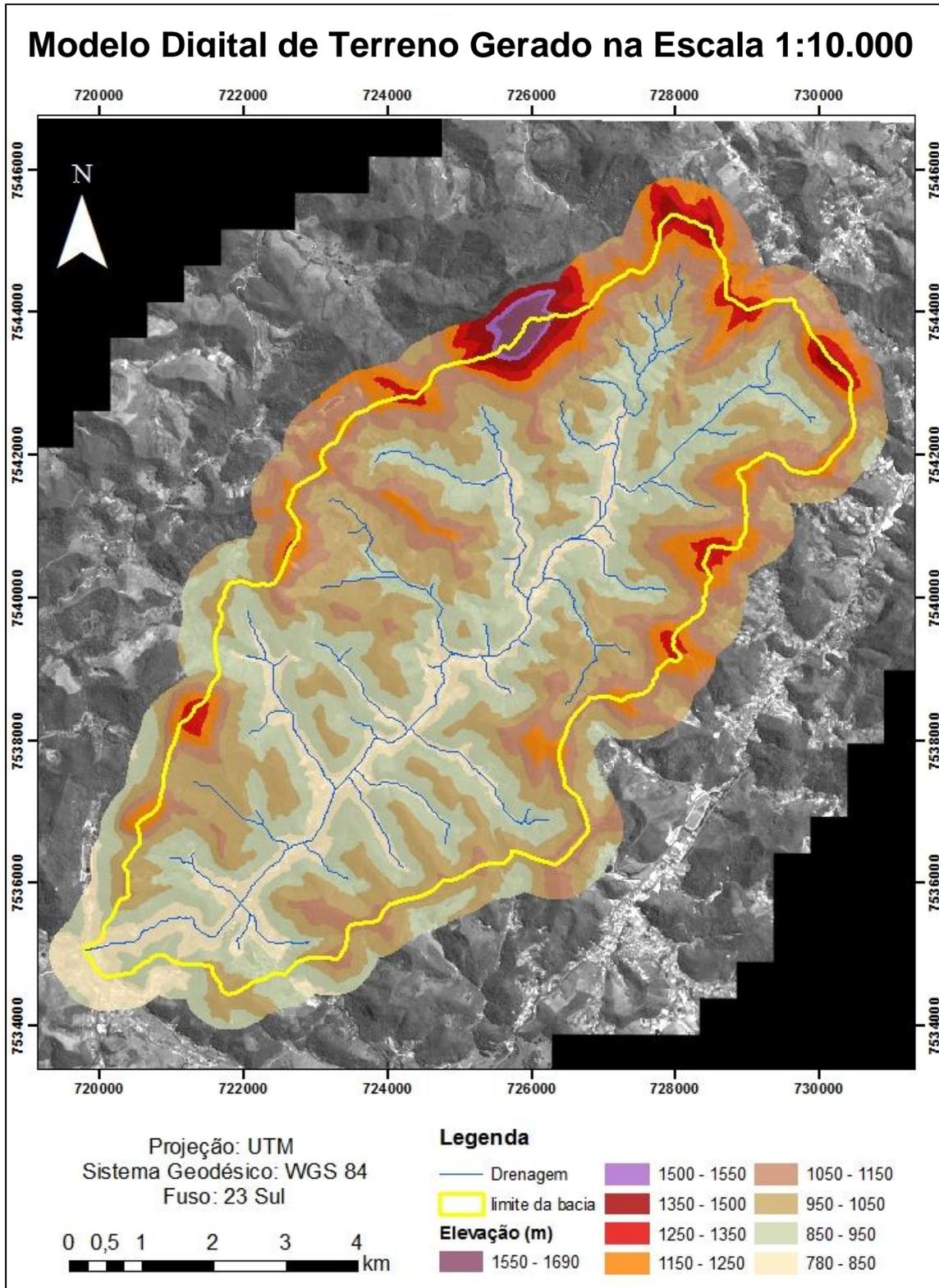


Figura 5.2 – MDT gerado a partir das curvas de nível na escala de 1:10.000 da bacia do Córrego Sujo com um *buffer* de 500 metros.

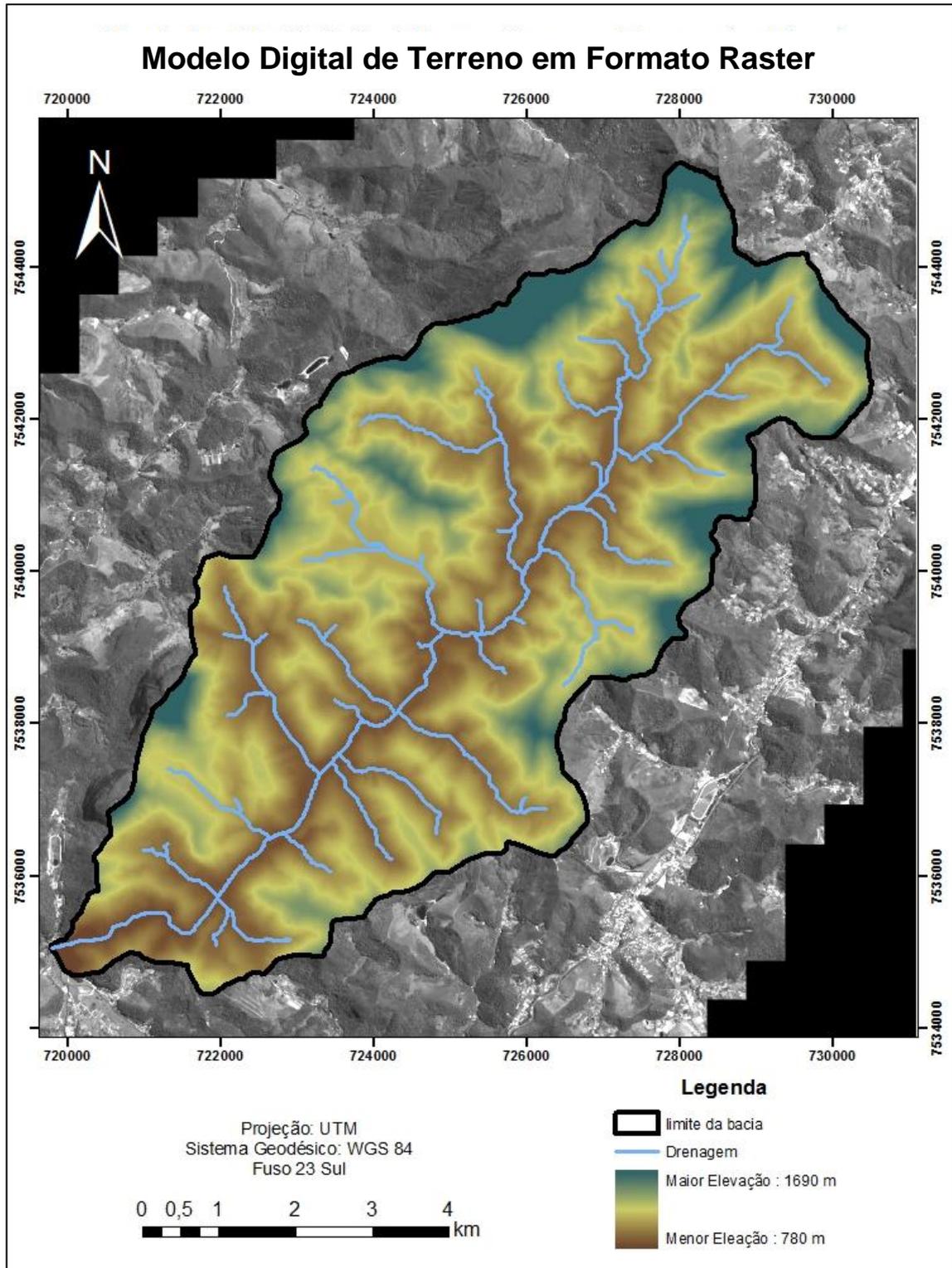


Figura 5.3 – Resultado da transformação do MDT da figura 5.2 em formato *raster* (sem o *buffer*).

5.1.2 Precipitação

Durante a pesquisa desenvolvida por Brum (2010) foram instaladas pelo GEOHECO duas estações pluvio-fluviométrica, uma no alto e outra no baixo curso da bacia do Córrego Sujo (figuras 5.4 e 5.5). No médio curso encontrava-se instalada uma estação mantida pela CPRM em parceria com o GEOHECO (figura 5.6).

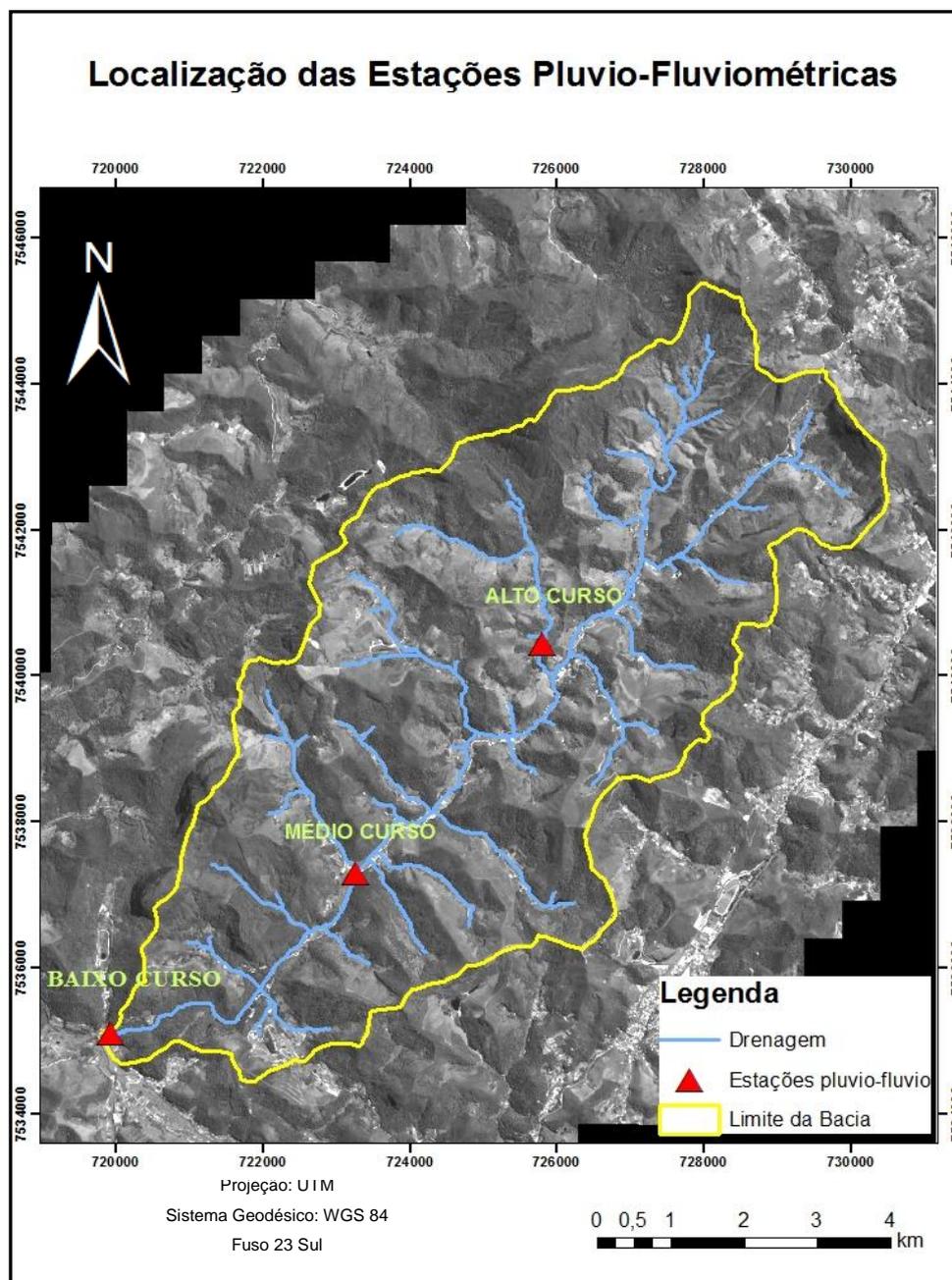


Figura 5.4 – Mapa de localização das estações pluvio-fluviométricas instaladas na bacia do Córrego Sujo. **Fonte:** Brum, 2010.

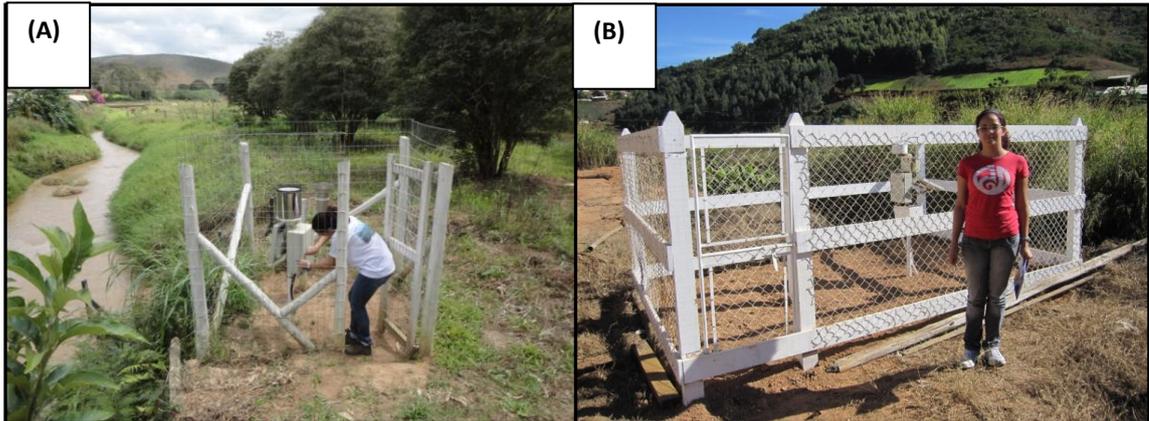


Figura 5.5 – Estação Sorvete, baixo curso (A) e Estação CPRM, médio curso (B)

Para compreender o regime de chuvas (entrada de água no sistema) foram instalados, durante a referida pesquisa, cinco pluviômetros, três convencionais do tipo “*Ville de Paris*” e dois automáticos com dispositivo de *datalogger* (figura 5.5 a). Um convencional foi instalado no alto curso da bacia, considerada estação pluviométrica alto curso. Outro automático e um convencional na estação instalada no exutório da bacia, considerada estação baixo curso (figura 5.5 b). No médio curso também foram instalados um pluviômetro automático e um convencional. A figura 5.6 mostra o pluviômetro automático da estação do baixo curso.



Figura 5.6 – Pluviômetro com dispositivo de *datalogger* instalado na estação baixo curso.

Diariamente três leitores de campo, moradores da bacia, realizavam as leituras dos instrumentos e numa periodicidade mensal foram retirados os dados da estação automática. Durante o ano de 2010 os dados eram registrados de hora em hora, já em 2011 e 2012 passou a ser de 15 em 15 minutos.

No entanto, foram verificadas inconsistências nos dados da Estação CPRM oriundos dos danos sofridos pelos equipamentos durante o evento de 2011, dessa forma, optou-se em utilizar na modelagem apenas os dados de chuva e altura de régua registrados no ano de 2010, em que as duas estações automáticas encontravam-se em bom estado. Nesse período os dados eram registrados de 1 em 1 hora.

Outra dificuldade encontrada foi na utilização das leituras de régua da Estação Gilberto, isso por que nessa estação não há leitura automática, impossibilitando o registro do comportamento do canal durante todo o evento chuvoso. A alternativa encontrada foi modelar apenas as estações CPRM e Sorvete, eliminando, assim, mais uma incerteza da modelagem.

5.1.3 Vazão

O método de medição de vazão que será aplicado nessa pesquisa é o método da meia seção com micro molinete hidrométrico *Global Water*, onde as vazões são calculadas multiplicando-se a velocidade média na vertical pela profundidade na vertical multiplicada pela soma das semi-distâncias às duas verticais adjacentes (SANTOS *et al.* 2001). A figura 5.7 ilustra a etapa de campo para a medição da vazão.



A seguir será mostrado, passo a passo, o processo de cálculo pelo método da meia seção, com base no esquema mostrado na figura 5.8.

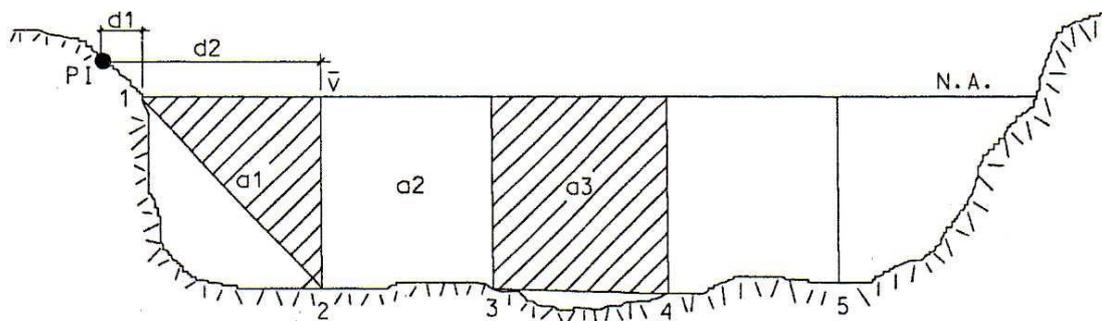


Figura 5.8 – Esquema de cálculo da seção média. Fonte: Santos *et. al* (2001)

a) Cálculo das velocidades médias nos segmentos:

$$\overline{v_{(a1)}} = (\overline{v_{(1)}} + \overline{v_{(2)}})/2$$

$$\overline{v_{(a2)}} = (\overline{v_{(2)}} + \overline{v_{(3)}})/2$$

b) Cálculo das áreas dos segmentos:

$$a_1 = (d_2 - d_1) * [(p_2 + p_1)/2]$$

$$a_2 = (d_3 - d_2) * \left[\frac{(p_3 + p_2)}{2} \right]$$

c) Cálculo das vazões nos segmentos:

$$q_{a1} = \overline{v_{a1}} * a_1$$

$$q_{a2} = \overline{v_{a2}} * a_2$$

d) Cálculo da vazão total:

$$Q = \sum q_i$$

e) Cálculo da área total:

$$A = \sum a_i$$

f) Cálculo da velocidade média:

$$\bar{V} = Q/A$$

g) Cálculo da largura do rio:

$$L = d_n - d_1$$

h) Cálculo da profundidade média do rio:

$$P = A/L$$

As medições de vazão da bacia do Córrego Sujo começaram a ser realizadas mensalmente durante o ano de 2009 e início de 2010 por Brum (2010), esse monitoramento teve continuidade de novembro de 2011 a novembro de 2012.

A partir dessas medições foram geradas curvas-chaves para cada seção do canal. A curva chave é uma função que descreve a relação entre a vazão e a altura linimétrica. Esta curva permite a previsibilidade dos valores de vazão de um canal em condições adversas, principalmente, durante os períodos de chuvas intensas ou de estiagem.

5.1.4 Mapeamento do Uso do Solo e Cobertura Vegetal e Parâmetros Hidrológicos

Para a modelagem hidrológica foi necessária a elaboração de um mapa de uso e cobertura da terra, para que fosse possível estimar após cada evento chuvoso selecionado na modelagem o quanto seria infiltrado, escoado, interceptado e o quanto deveria chegar ao canal fluvial através do escoamento superficial.

Para a confecção do mapa foi utilizada uma imagem GeoEye-1 da área de estudo, cuja aquisição se deu no dia 01 de março de 2012. A imagem não apresentava nuvens, facilitando, portanto, a interpretação da mesma. A imagem GeoEye-1 apresenta resolução espacial de 0,41 metro no Pancromático (preto e branco) e 1,64 metro no Multispectral (colorido) e possui quantificação de 11 bits por pixel (SPACEIMAGING, 2012).

A elaboração do mapa foi realizado em ambiente SIG, através da vetorização manual em um escala de 1:10.000, baseada na identificação visual das classes mapeadas considerando a textura, a cor e forma de cada uma delas. Para tanto, foi utilizado o software Arc Gis 9.3. Foram realizadas também idas a campo que auxiliaram o mapeamento.

Para o georreferenciamento da imagem foi feita uma campanha utilizando um receptor GNSS "*Global Navigation Satellite System*", como mostra a figura 5.9.



Figura 5.9 – Imagem do receptor GNSS utilizado

Foram mapeadas oito classes de uso do solo e cobertura vegetal: Agricultura, Açude, Afloramento, Capoeira, Eucalipto, Floresta, Gramínea e solo exposto.

Conforme discutido no capítulo “embasamento teórico”, cada uso do solo e cobertura vegetal interfere na capacidade de infiltração do solo e no escoamento superficial da água, portanto, precisa-se estimar uma taxa para cada um dos parâmetros, a fim de calcular o volume de água que vai atingir o canal fluvial após cada evento chuvoso. A interceptação exercida pela vegetação também deve ser considerada na modelagem hidrológica, pois o valor da precipitação terminal, ou seja, a quantidade de água que efetivamente vai atingir o solo depende do conhecimento da quantidade de água que será retida pela vegetação.

Baseados em estudos anteriormente realizados pelo GEOHECO (FIGUERÓ, 2005; CHIROL, 2003; ROCHA LEÃO, 1996; MIRANDA, 1992, ZAÚ, 1994, SATO, 2008, MENEZES, 2009 e NACINOVIC, 2009) foi elaborada uma tabela (tabela 5.1) com as taxas de interceptação, infiltração e escoamento para cada classe mapeada.

Tabela 5.1 – Parâmetros Hidrológicos

Uso do Solo	Taxa de Interceptação	Taxa de Infiltração	Taxa de Escoamento
Afloramento Rochoso	0	0	1
Agricultura	0.15	0.80	0.2
Floresta	0.20	0.98	0.02
Gramínea	0.27	0.98	0.02
Capoeira	0.27	0.97	0.03
Solo Exposto	0	0.94	0.06
Açude	0	0	1
Eucalipto*	0,2	0,998	0,002

* A taxa de escoamento do eucalipto foi extraída da dissertação de mestrado de Sato (2010), no entanto, como não havia uma taxa para interceptação, optou-se por considerar esse valor igual ao da floresta, cujo comportamento hidrológico é mais semelhante ao do eucalipto.

5.2. Utilização da ferramenta Arc Hydro (versão 1.4)

O Arc Hydro é um sistema baseado em Arc Gis voltado para suportar aplicações de recursos hídricos. É constituída por dois componentes principais: Arc Hydro Modelo de Dados e Arc Hydro Tools. Estes dois componentes, em conjunto com o quadro de programação genérico, fornecem a concepção de um banco de dados e um conjunto de ferramentas que facilitam as análises muitas vezes realizadas no domínio dos recursos hídricos.

Para a realização de uma modelagem com base na análise espacial é necessária uma interface entre os conhecimentos relativos à paisagem em que essa análise será realizada, sendo fundamental o conhecimento dos solos, do clima, do uso do solo e cobertura vegetal, do regime de precipitação e vazão do ambiente analisado, dentre outros parâmetros.

Desta forma, é importante haver também essa interface entre o programa onde será realizada a modelagem e outros programas que possam facilitar a

elaboração do trabalho. A figura 5.10 apresenta a interface do Arc Hydro com os outros programas que permitem a criação e integração de bancos de dados.

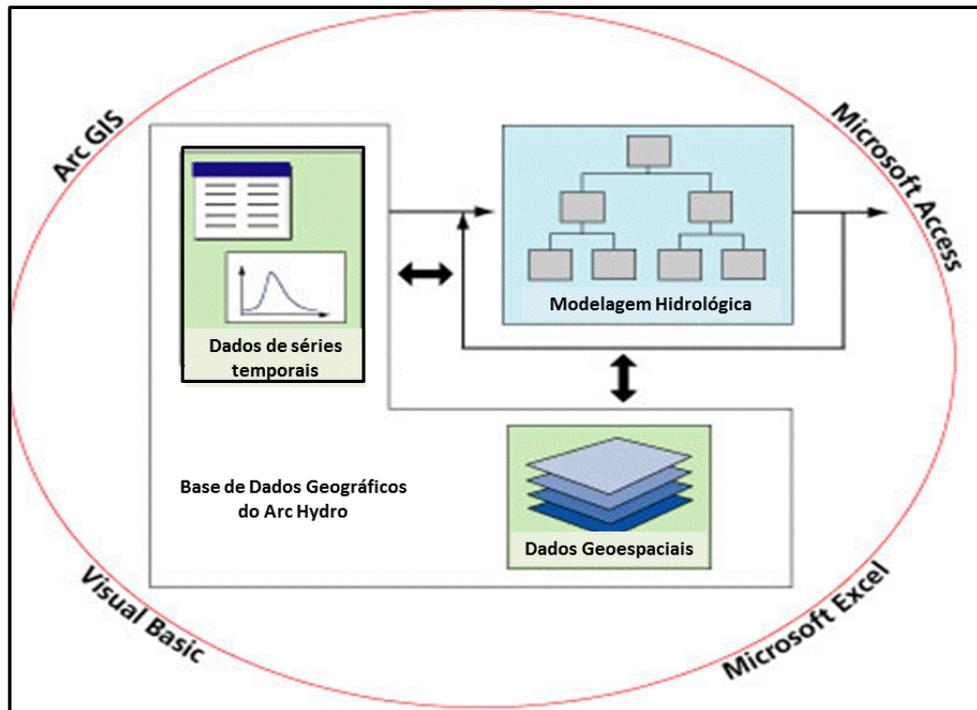


Figura 5.10 – Interface do Arc Hydro com os demais programas. **Fonte:** modificado de Maidment, 2002.

O Arc Gis possui um modelo de rede entre pontos e linhas conectadas no seu sistema de análise, enquanto o Arc Hydro acrescenta a este relacionamento os nós da rede com as feições hidrológicas relacionadas, tais como áreas de contribuição, corpos d'água e pontos de monitoramento, sendo esta conectividade uma importante característica deste software: o Arc Hydro suporta operação com orientação de feições bem como operação com orientação de camadas, ou seja, além de permitir armazenar todas as bacias hidrográficas em uma camada de dados e toda a rede de drenagem em outra camada, permite também estabelecer relações entre uma dada bacia que drena para uma linha de drenagem em particular, tal como acontece na natureza. Além disso, essas relações são armazenadas permanentemente, como parte da estrutura de dados. A figura 5.11 exemplifica as relações citadas acima.

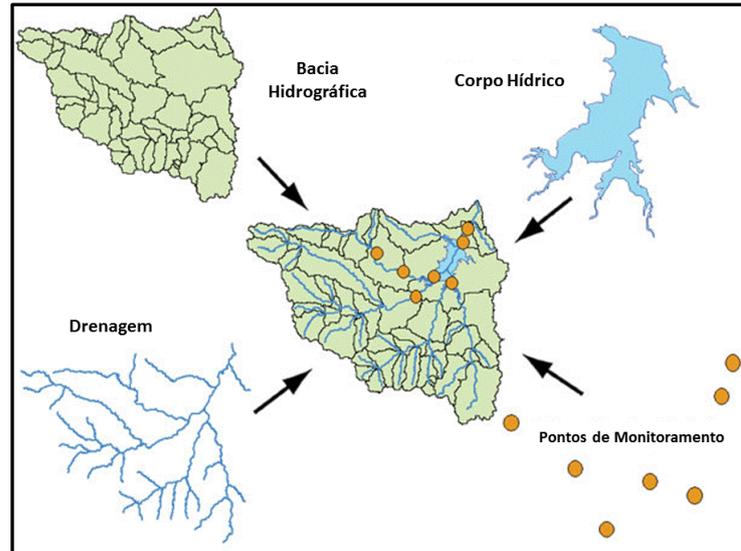


Figura 5.11 – Relação entre as feições e as camadas no Arc Hydro. **Fonte:** modificado de Maidment, 2002.

5.2.1 Ferramentas do Arc Hydro

As ferramentas do Arc Hydro são um conjunto de utilitários desenvolvidos em cima do modelo de dados Arc Hydro. Algumas funções requerem a extensão “*Spatial Analyst*” do Arc Gis. As ferramentas são acessadas através da barra de ferramentas do *Arc Hydro Tools* (figura 5.12), onde estão agrupadas por funcionalidade em quatro menus principais e seis botões.

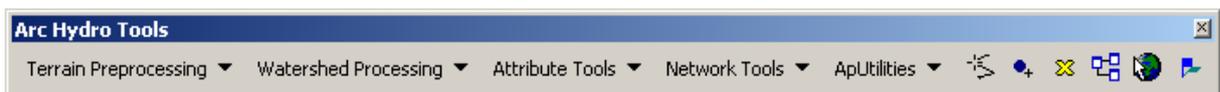


Figura 5.12 – Barra de ferramentas do Arc Hydro

Abaixo segue a descrição das ferramentas utilizadas neste trabalho.

– **Menu para Processamento do Terreno (*Terrain Preprocessing*):**

Esta ferramenta realiza o pré-processamento do MDT, o objetivo é realizar uma análise inicial do terreno e preparar o conjunto de dados para o processamento a ser realizado. O MDT da área de estudo é necessário como entrada para o pré-processamento do terreno e deve estar no formato ESRI GRID.

- **Recondicionamento do MDT (*DEM Reconditioning*):**

Esta ferramenta aplica o padrão de drenagem linear (vetor) no MDT (*raster*) e utiliza a metodologia AGREE. Esta metodologia foi desenvolvida pela Universidade

do Texas em 1997 e consiste em um sistema de recondicionamento do Modelo Digital de Terreno (MDT) que ajusta a elevação da superfície do MDT para ser consistente com uma cobertura do vetor. A cobertura do vetor pode ser um córrego, por exemplo.

- **Preenchimento de “Vazios” ou “Buracos” (*Fill Sinks*):**

Essa ferramenta preencheu os possíveis “buracos” do MDT. Se uma célula é rodeada por células com valores maiores de elevação a água é presa nessa célula e não pode escoar. A função *Fill Sinks* modifica o valor de elevação para eliminar este problema.

- **Direção de Fluxo (*Flow Direction*)**

Esta ferramenta criou a direção da rede de fluxo (*raster*) a partir do MDT. A concepção usada pelo Arc Hydro é conhecida como D8, que consistem em “oito direções por ponto do modelo”. A partir do MDT é criada uma malha de células, onde o fluxo de água seguirá para a célula de menor valor de elevação adjacente a ela. As ilustrações a seguir representam esse procedimento.

Cada célula representada na figura 5.13 ilustra a direção preferencial do fluxo, onde 1-leste, 2-sudeste, 4-sul, até o 128- nordeste.

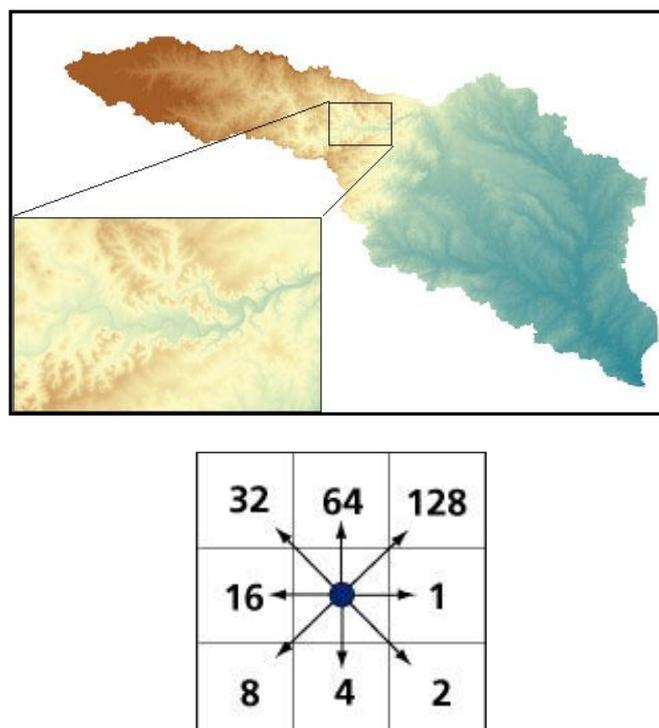


Figura 5.13 – MDT e direção do fluxo. **Fonte:** modificado de Maidment, 2002.

A figura 5.14 mostra como é realizado o cálculo onde a partir do GRID do MDT é gerado o GRID das direções de fluxo e a figura 5.15 ilustra o resultado final.

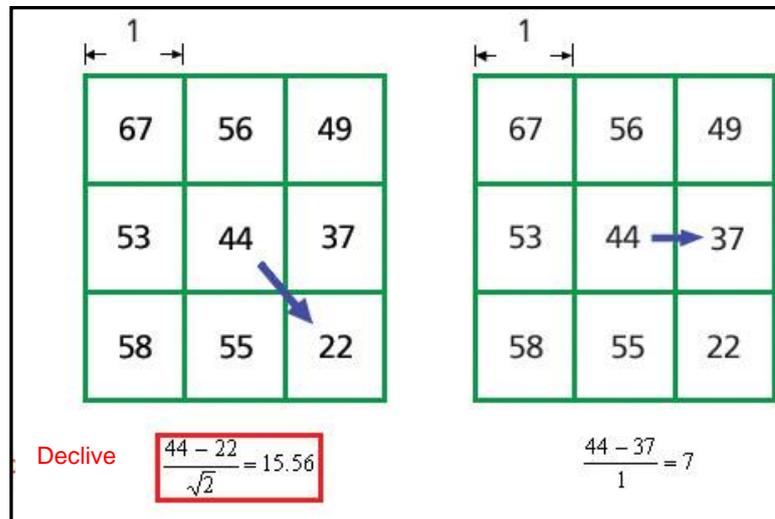


Figura 5.14 – Cálculo das direções de fluxo. **Fonte:** modificado de Maidment, 2002.

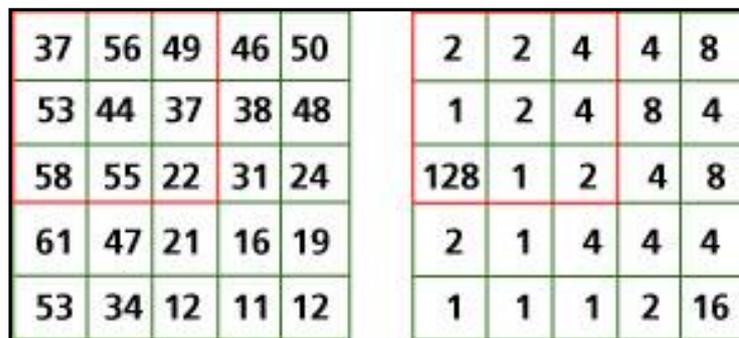


Figura 5.15 – Esquerda – GRID do MDT; Direita – Resultado do GRID de direções de fluxo. **Fonte:** modificado de Maidment, 2002.

A figura 5.16 mostra a representação física da direção do fluxo e a rede de fluxos.

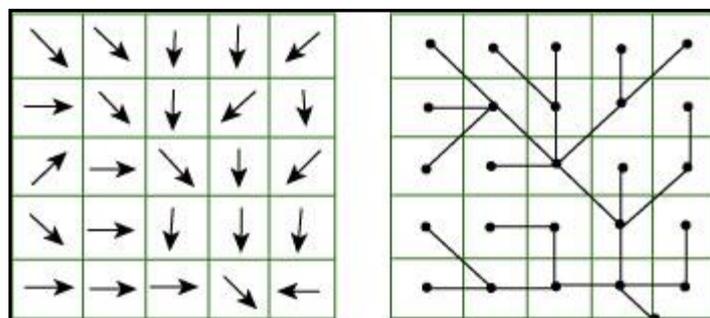


Figura 5.16 – Esquerda – Representação física; Direita – Rede de fluxos. **Fonte:** modificado de Maidment, 2002.

- **Acumulação do Fluxo** (*Flow Accumulation*):

Esta ferramenta cria um *raster* de acumulação de fluxo a partir do *raster* de direção do fluxo. Neste *raster* cada pixel possui um valor que representa a quantidade de células que direcionam seu fluxo para ela. Quanto mais alto o valor, maior o fluxo que está sendo direcionado para aquela célula. Desta forma, o pixel de maior valor será o pixel localizado na saída da bacia, pois recebe como contribuição de todos os pixels a montante.

- **Definição dos Cursos D'água** (*Stream Definition*):

Esta ferramenta cria a partir do *raster* de acumulação de fluxos um novo *raster* com as células localizadas nos fundos de vale, que recebem a maior acumulação. Assim, esta ferramenta gera um *raster* que dará origem a drenagem da bacia hidrográfica. Para geração deste *raster* ele trabalha com um valor mínimo para geração da cabeceira de drenagem, ou seja, qual a área mínima para o surgimento da drenagem. Como “default” o software trabalha com 1% (em km²) da área da bacia, neste caso, 5.316 células. O resultado foi compatível com a rede de drenagem inicialmente utilizada no trabalho (base da AMPLA), no entanto, a rede de fluxos ficou distante das cabeceiras de drenagem. Então, optou-se em fazer testes com metade do valor inicial 1% e assim, sucessivamente até o valor de 0,125%. A tabela abaixo mostra os valores utilizados nos testes.

Tabela 5.2: Valores usados para a geração da drenagem

Percentual	Células
1	5.316
0,5	2.658
0,25	1.329
0,125	664,5

- **Segmentação dos Cursos D'água** (*Stream Segmentation*):

Essa ferramenta criou um elo entre o *raster* resultante da ferramenta Flow Direction com o resultante da ferramenta Stream Definition, onde cada elo entre duas junções do fluxo recebe um identificador exclusivo.

O objetivo principal segmentação dos cursos é codificar cada trecho de curso d'água em seções que conectam duas confluências sucessivas, uma confluência e seu exutório ou uma confluência e sua nascente (CORREIA, 2011).

- **Delimitação das Bacias de Contribuição** (*Catchment Grid Delineation*):

Esta função cria um grid em que cada célula carrega um valor (código de rede) que indica a que captação aquela célula pertence, através das informações da direção de fluxo e dos resultados obtidos na segmentação da etapa anterior. Dessa forma, é identificada cada área que drena para cada ponto de ligação da drenagem. No entanto, esta ferramenta não delimita bacias hidrográficas.

- **Extração dos Polígonos das Bacias de Contribuição** (*Catchment Polygon Processing*):

Esta ferramenta transforma o resultado da ferramenta anterior em polígonos no formato vetorial.

- **Extração das Linhas de Drenagem** (*Drainage Line Processing*)

Esta ferramenta criou linhas de drenagem no formato vetorial em cada um dos testes realizados com o *Stream Definition*.

– **Menu para Processamento de Bacias Hidrográficas** (*Watershed Processing*):

Através deste menu foi gerado o *shape* das áreas de contribuição levando em conta os pontos de monitoramento em campo.

- **Criação de Pontos na Bacia** (*Batch Point Generation*)

Através desta ferramenta, identificada com o ícone  na barra de ferramentas do Arc Hydro, foram marcados os pontos onde localiza-se cada estação pluvio-fluviométrica. Primeiramente foi marcado cada ponto na imagem GeoEye, utilizando a ferramenta “*Batch Point Generation*”, ao clicar no ponto identificado como uma estação abre uma janela para que seja descrito esse ponto, foi inserido, nesse momento, o nome do ponto e a informação se ele é um ponto de entrada (inlet) ou saída (outlet) da área. Neste caso foram colocados três pontos chamados pelo mesmo nome das estações: Sorvete, CPRM e Gilberto; e todas foram classificadas como outlet.

- **Delimitação de Área de Contribuição** (*Batch Watershed Delimitation*)

A partir dos pontos criados na ferramenta *Batch Point Generation* foi criado pelo *Batch Watershed Delimitation* um *shape* para cada área de contribuição em cada estação. Esta ferramenta utiliza o resultado dos seguintes passos como entrada de dados: Direção de Fluxo (*flow Direction Grid*), a segmentação dos cursos d'água (*Stream Segmentation*), o limite da bacia, as bacias de contribuição (*Catchment Grid Delineation*) e os pontos de localização das estações (*Batch Point*). Para cada área de contribuição ele mostra a elevação mínima e máxima, além de calcular a área de cada uma delas.

5.3 Elaboração da Modelagem Hidrológica

Após a preparação da base do modelo foi necessário criar um único arquivo contendo todos os dados necessários aos cálculos da modelagem, onde estivesse discretizada a informação de cada pixel. Essas informações são provenientes do mapeamento do uso solo e cobertura vegetal, da área de contribuição de cada estação analisada (gerada pela ferramenta "*Batch Watershed Delimitation*") e do resultado do "*Flow Accumulation*" que carrega o valor de acumulação de fluxo em cada pixel da bacia.

Primeiramente, foi preciso transformar o mapa de uso e cobertura e a área de contribuição de cada estação que estavam em formato vetorial em um formato *raster* para que fosse possível cruzar esses dados com o fluxo de acumulação ("*Flow Accumulation*"). Para isso, foi utilizada a ferramenta "*Convert Polygon to Raster*". Objetivando manter o padrão do mapeamento, foram criados pixels do mesmo tamanho dos gerados pelo MDT.

Posteriormente, os três *rasters* foram cruzados: o *flow acumulation*, o de uso e cobertura e o das áreas de contribuição. Para chegar a este resultado foi utilizada a ferramenta "*Combine*", que deu como resultado um novo *raster* combinando as informações dos três *rasters* em sua tabela de atributos (figura 5.17), sendo possível analisar o comportamento de cada pixel isoladamente.

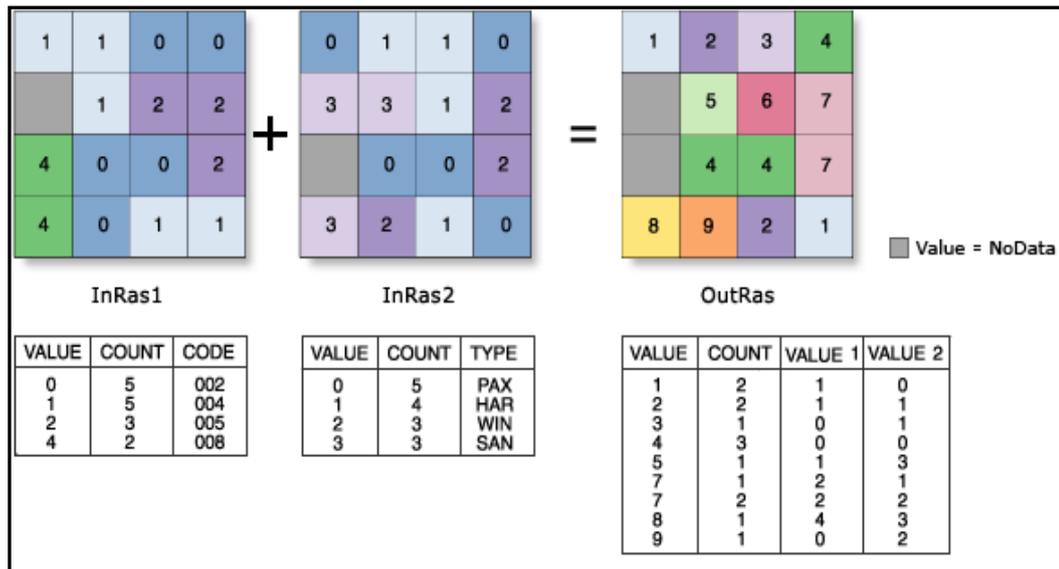


Figura 5.17 – Ilustração da ferramenta *Combine Rasters* do *Arc Gis 9.3* (combine images do *ArcGis 9.3*).

Para facilitar os cálculos no *Arc Gis* foi feita a conversão do arquivo resultante do *Combine* para o formato vetorial através da ferramenta “*Convert Raster to Polygon*”. Na tabela de atributos desse novo arquivo foram inseridas as colunas com os valores utilizados no cálculo da modelagem. A tabela 5.3 ilustra como foram gerados os valores de altura da régua em cada evento modelado.

Tabela 5.3: Fórmulas utilizadas na modelagem

Precipitação Efetiva em metros (P_e)	Volume Infiltrado em m^3 (V_{inf})	Volume Escoado em m^3 (V_{esc})	Altura da Régua em metros (h)
$P - (P * \text{taxa de interceptação})$	$P_e * A * \text{taxa de infiltração}$	$P_e * A * \text{taxa de escoamento}$	$V_{es} / \text{Área da seção molhada}$

Onde P refere-se à precipitação em metros e A à área de cada pixel em m^2

Não foi viável a utilização da curva-chave para comparar com a vazão resultante no modelo, pois, conforme será discutido no capítulo de resultados, em nenhum momento da medição da vazão em campo, tanto em 2009/2010 quanto em 2011/2012, foi em dia chuvoso, ou seja, foi medido apenas o fluxo de base do canal, portanto essas curvas-chave não abarcam a realidade da bacia em períodos chuvosos, que são, justamente, aqueles que estamos considerando para a modelagem.

Desta forma, os valores encontrados como volume total escoado por área de contribuição foi dividido em um primeiro momento pelo tempo total da chuva em

segundos e posteriormente o valor encontrado nesta razão foi dividido pela área da seção molhada.

Em cada medição de vazão era anotada a profundidade do canal em diferentes larguras verticais, a posição do molinete, a distância entre as verticais e a largura do canal. Através dessas anotações foi realizado o cálculo da área da seção molhada e desenhada através do Programa AutoCad, como mostram as figuras 5.18 e 5.19.

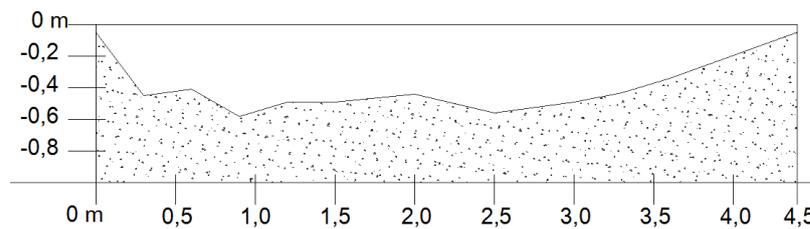


Figura 5.18 – Seção molhada da Estação Sorvete. Medição realizada em 25 de fevereiro de 2010.

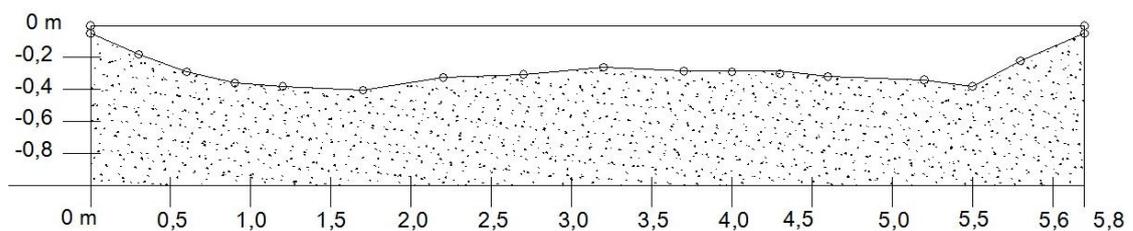


Figura 5.19 – Seção molhada da Estação CPRM. Medição realizada em 25 de fevereiro de 2010.

Para a comparação entre os resultados do modelo e os registrados em campo foi criada uma tabela utilizando o Programa Excel onde foi calculado o desvio padrão da variação de nível do rio no modelo e em campo.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Precipitação Mensal e Anual

Os dados de precipitação que serão apresentados nesta seção foram obtidos a partir das anotações diárias dos leitores de campo localizados nas três estações pluvio-fluviométricas analisadas. No entanto, os registros de chuva nem sempre foram realizados concomitantemente entre as estações.

Os dados da estação do médio curso, denominada neste trabalho como Estação CPRM, começaram a ser registrados pela CPRM a partir de julho de 2007 e continuaram até hoje. Na estação do baixo curso, denominada como Estação Sorvete, os dados foram obtidos desde abril de 2009 pelo GEOHECO até o presente, havendo interrupções apenas entre os dias 12 de janeiro de 2011 (quando ocorreu a cheia que atingiu a estação) até o fim de fevereiro de 2012, retornando as leituras em março do mesmo ano.

A estação do alto curso, denominada como Estação Gilberto, também instalada pelo GEOHECO, possui registro de todo ano de 2009. De janeiro a setembro de 2010 a leitura foi interrompida por falta de leitor de campo. Em 2011 os dados estão completos, já em 2012 ocorreram problemas na leitura dos meses de outubro e dezembro.

A figura 6.1 apresenta os três gráficos contendo a distribuição de chuva na bacia do Córrego Sujo ao longo de todo período com dados disponíveis. Nela, é possível verificar que nas três estações os meses de outubro a março são os mais chuvosos, enquanto que maio, junho, julho e agosto são os meses menos chuvosos. Além disso, foi observado que o maior acumulado mensal da série foi registrado na Estação Sorvete em dezembro de 2010 com um total de 504,1 mm, lembrando que a leitura do mês de janeiro de 2011 foi comprometida. Na Estação CPRM foi o mês de janeiro de 2012 com 434,3 mm, seguido do mês de janeiro do ano de 2011 (414 mm). Na Estação Gilberto o mês mais chuvoso foi janeiro de 2011, com um total de 397 mm.

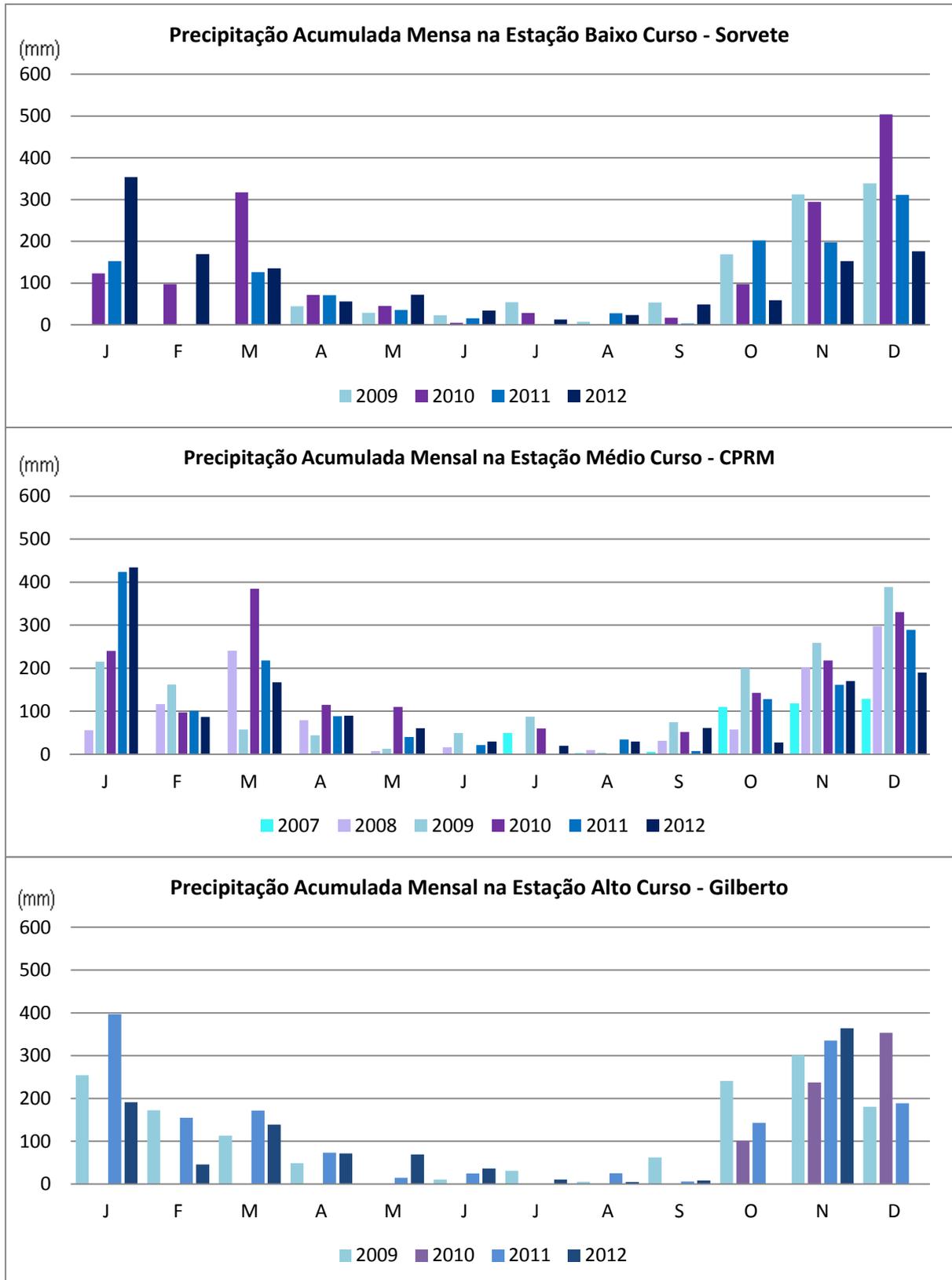


Figura 6.1 – Precipitação acumulada mensal de toda a série de dados registrados nas Estações do alto, médio e baixo curso da bacia do Córrego Sujo.

Considerando os anos em que não houve interrupção de leitura diária, foi elaborado um gráfico com o total anual (figura 6.2). Constatou-se, dessa forma, que o ano de 2010 foi o mais chuvoso do período analisado, com um total anual de 1599,5 mm na estação Sorvete e 1749,4mm na Estação CPRM.

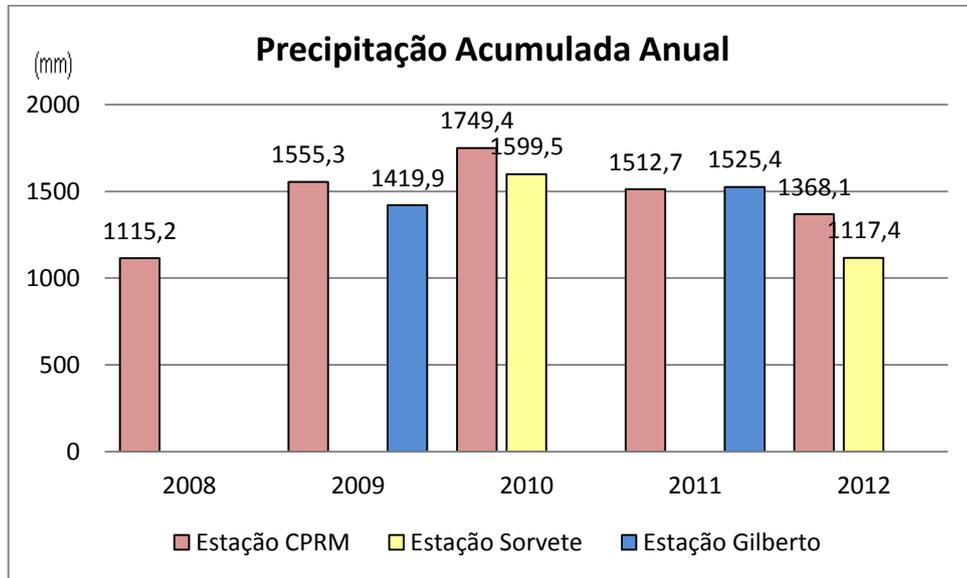


Figura 6.2 – Acumulado anual de chuva nas estações CPRM, Sorvete e Gilberto.

A partir da figura 6.3 foi possível concluir que, durante o período analisado, a estação Sorvete apresenta, na maioria das vezes, os menores valores de chuva e que a Estação CPRM registra, na maioria dos casos, os maiores valores. Pelo o que pode ser observado na mesma figura, a distribuição da chuva na bacia não se dá de maneira homogênea, no entanto, em geral, os valores são aproximados.

Na figura 6.3 podemos visualizar a maior discrepância da série, ocorrida em dezembro de 2010, em que na estação Sorvete registrou um total de 504,1 mm enquanto que na CPRM choveu um acumulado de 330,2 mm e no Gilberto 353,7 mm.

Essa análise nos permitiu compreender certa heterogeneidade na dinâmica da entrada de água na bacia.

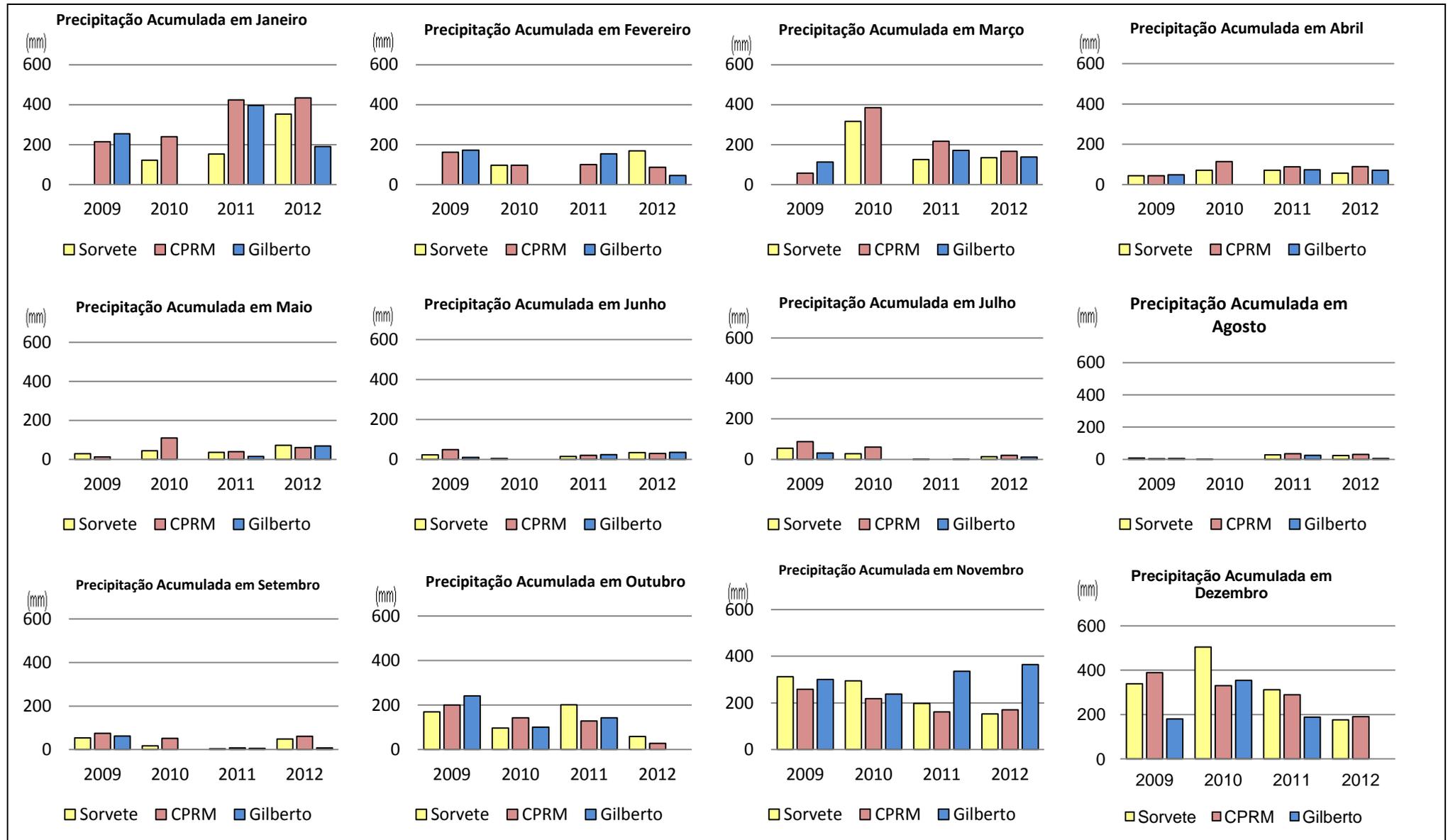


Figura 6.3 – Comparação do total de chuva mensal nas estações do alto, médio e baixo curso da bacia do Córrego Sujo.

6.2 Relação entre Altura Linimétrica e Precipitação

Os valores de altura linimétrica analisados neste tópico foram registrados por leitores de campo, diariamente, às 7h e 17h. No entanto, assim como relatado na seção anterior, esses dados não foram obtidos sempre ao mesmo tempo nas três estações, mas todos os registros existentes estão representados nas figuras 6.4, 6.5 e 6.6.

Nesses gráficos encontram-se alguns dias e meses que não ocorreram medições; ou porque as réguas ainda não haviam sido instaladas ou por problemas na leitura de campo ou, ainda, por problemas decorrentes de cheias do rio que destruíram os equipamentos de medição, como ocorreu nas Estações Sorvete e Gilberto em janeiro de 2011.

A partir da reunião de todos os registros de altura linimétrica e de chuva diária, foi possível visualizar, por meio dos gráficos, o comportamento do rio ao longo dos anos e sua resposta às chuvas e às interferências na bacia. As mudanças mais evidentes da altura linimétrica do fluxo de base ocorreram nas seções do médio e do alto curso após o evento extremo ocorrido em 12 de janeiro de 2011. No médio curso a altura linimétrica do rio no fluxo de base estava na média de 150 cm e passou para 170 cm em março de 2011, quando reiniciaram as medições. Já no alto curso a variação foi de 125 em média do fluxo de base para 142 cm. A causa para o aumento do nível se deve, possivelmente, ao assoreamento resultante da deposição de grande aporte de sedimentos carregados pelas chuvas nesse episódio extremos de chuva e vazão.

Outra mudança nítida ocorreu na estação do médio curso após abril de 2012 quando foi registrada uma dragagem nessa seção, conforme relatado no capítulo 4.

Antes da dragagem no Córrego Sujo a altura linimétrica no fluxo de base estava em torno de 170 cm e após a dragagem passou para 130 cm em média (figura 6.5).

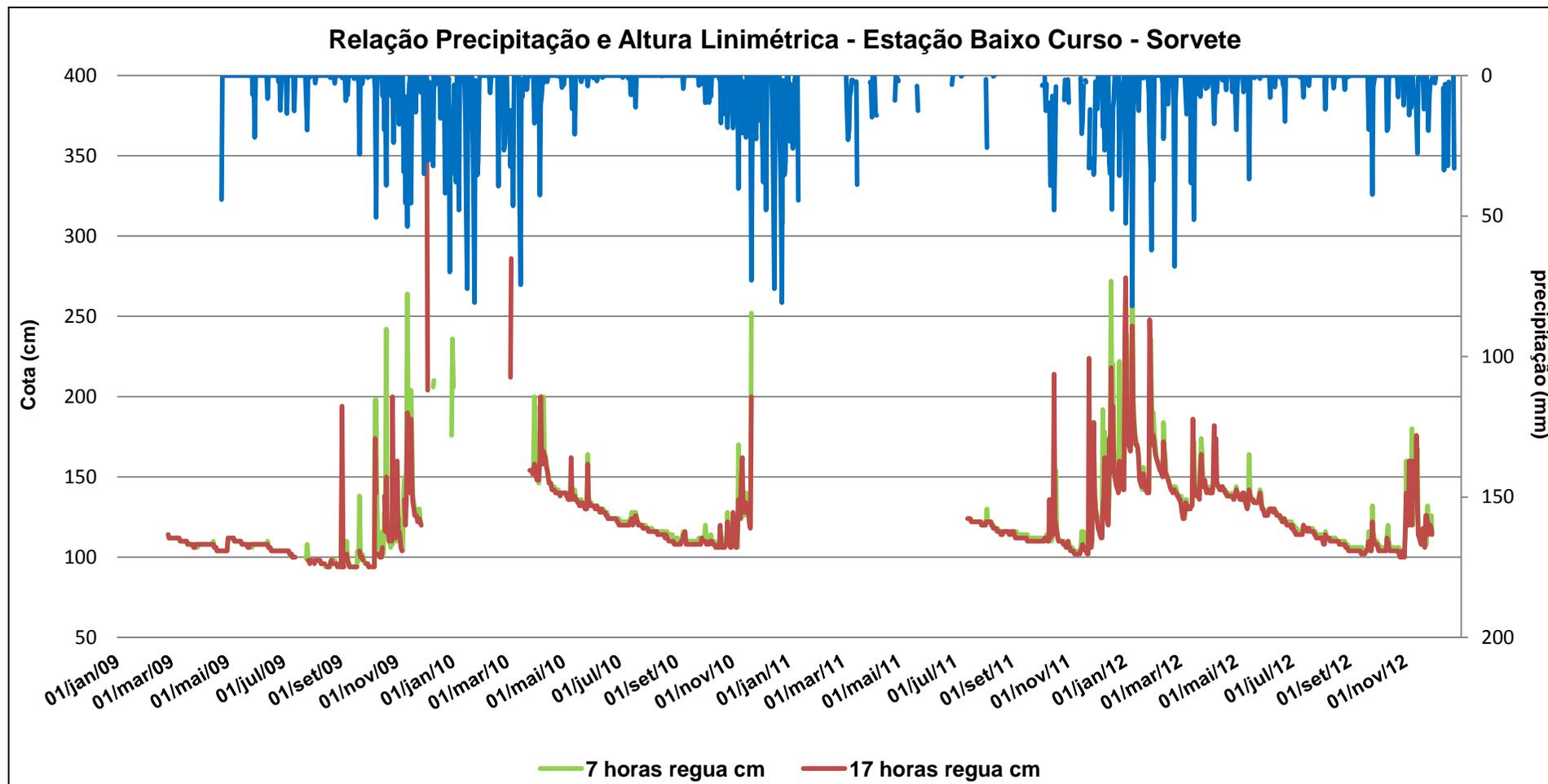


Figura 6.4 – Relação entre a Precipitação e a altura linimétrica da Estação Sorvete.

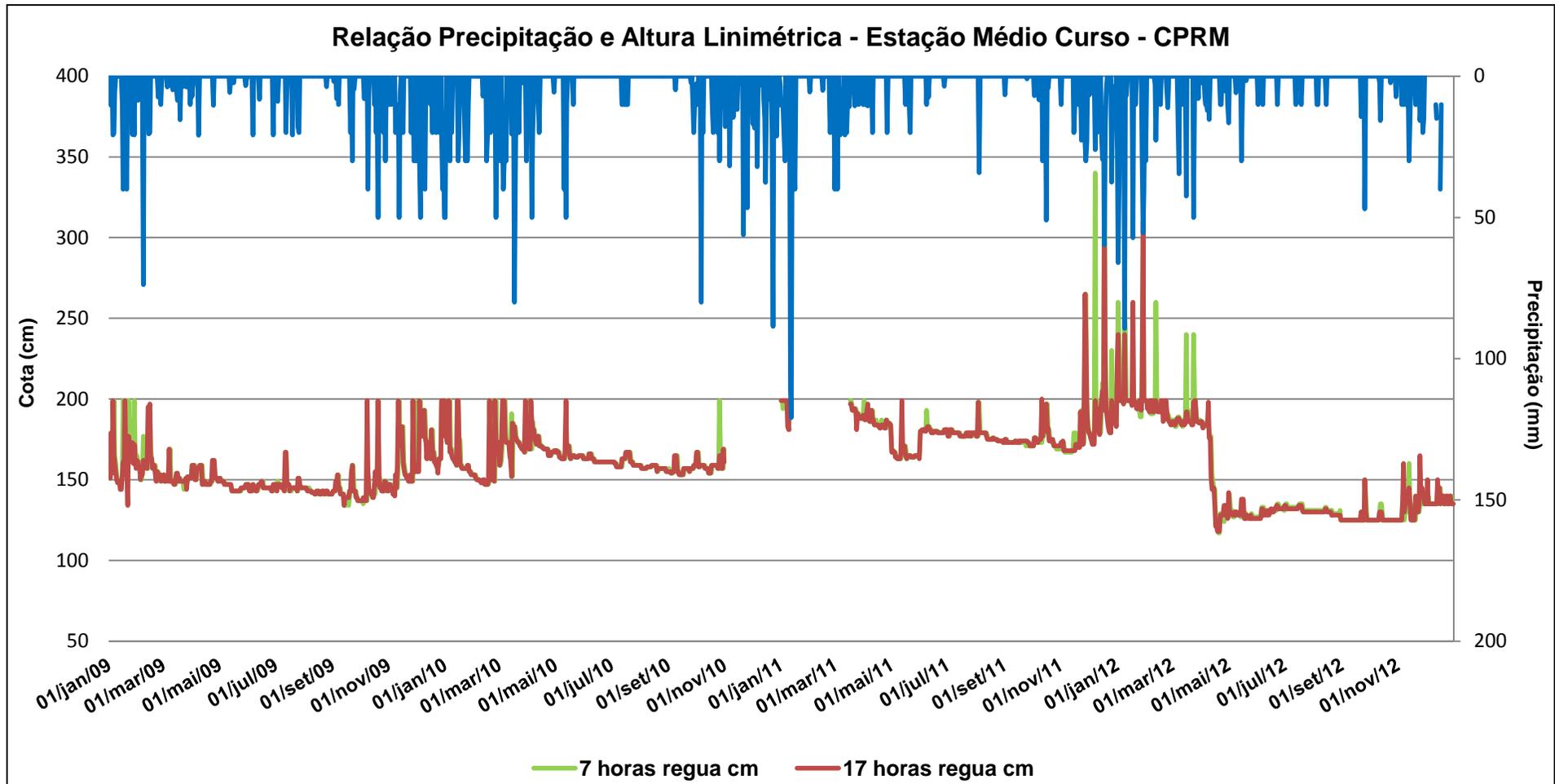


Figura 6.5 – Relação entre a Precipitação e a altura linimétrica da estação médio curso "CPRM".

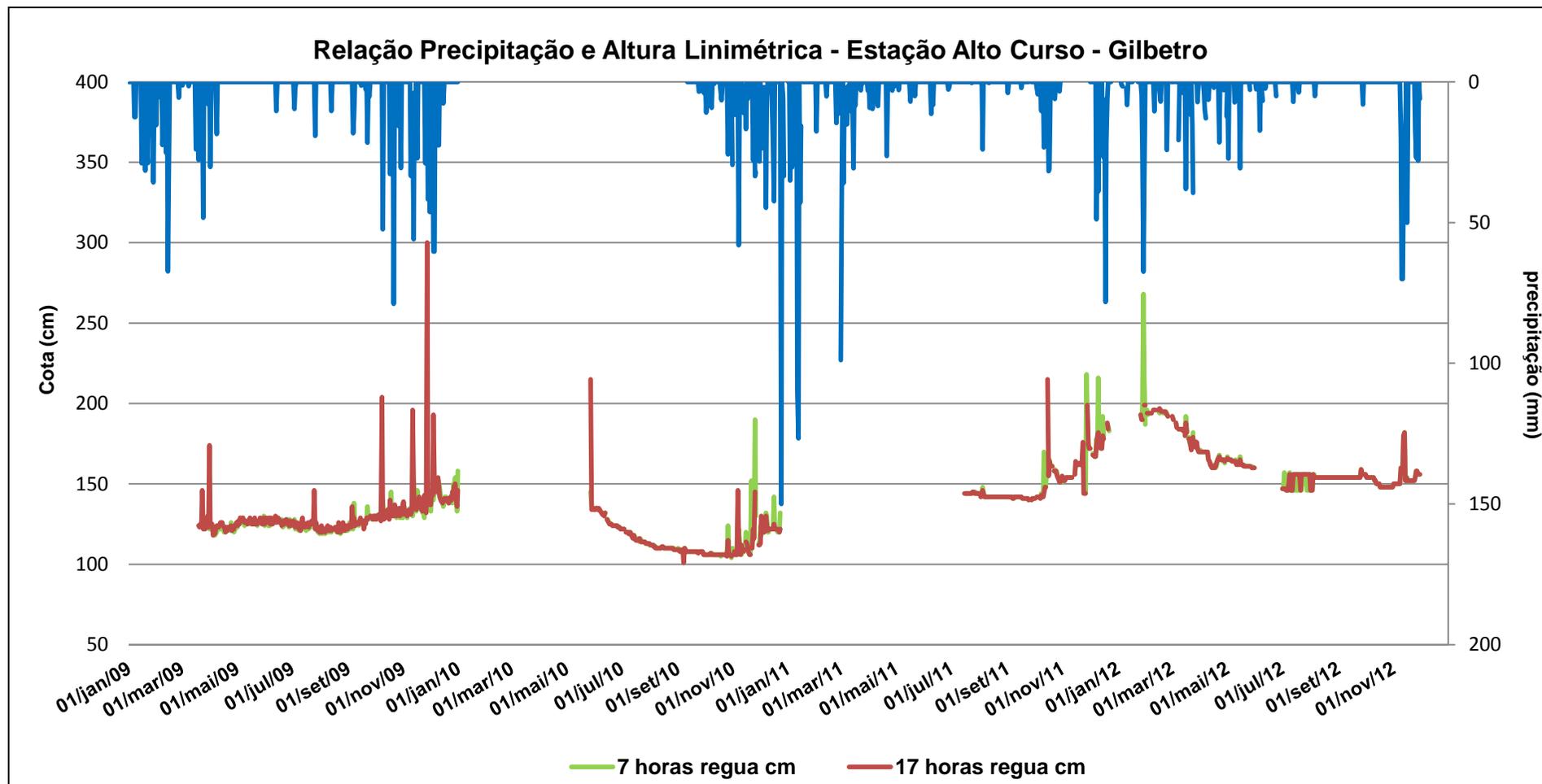


Figura 6.6 – Relação entre a Precipitação e a altura linimétrica da estação alto curso "Gilberto".

6.3 Precipitação e Altura Linimétrica Diária

Conforme abordado no capítulo 5, as estações do baixo curso e médio curso (Sorvete e CPRM) possuem registros automáticos de precipitação e altura linimétrica. A estação Sorvete conta com registros desde 2009, enquanto que a Estação CPRM possui registros a partir de março do ano de 2010. A estação Sorvete, instalada e mantida pelo GEOHECO, apresentou defeito apenas em novembro e dezembro de 2010 e em janeiro de 2011, voltando a funcionar em julho de 2011 até hoje. Já a Estação CPRM funcionou sem problemas durante todo ano de 2010, no entanto, após janeiro de 2011 os registros ficaram comprometidos e apesar de algumas manutenções da estação, ainda não foi feito o reparo do equipamento automático.

Para a modelagem realizada nesta pesquisa foram utilizados os dados das medições automáticas de março a maio de 2010, período em que ambas as estações estavam com seus equipamentos funcionando e onde os valores de precipitação foram mais significativos. Foram utilizados também os dados de janeiro a abril de 2012.

As figuras 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12 foram geradas pelo *software* “Hidromec”, que trata os dados das estações automaticamente e representam como se deu a distribuição da chuva e a variação de nível d’água no canal ao longo da série utilizada na pesquisa. Os registros do ano de 2010 foram feitos de hora em hora, enquanto que em 2012 foram feitos de 15 em 15 minutos.

A chuva mais intensa registrada durante o período analisado no ano de 2010 foi de 36,8mm em 6 horas do dia 05/05/2010 na estação Sorvete e 40,8mm em 5 horas na Estação CPRM na mesma data.

Quanto à variação de nível, verificou-se que, durante o período analisado do ano de 2010, a maior oscilação se deu em 30/03/2010 quando a altura linimétrica passou de 1,48 metros para 2,69 metros em 5 horas na estação Sorvete. Já na Estação CPRM a maior oscilação ocorreu em 05/05/2010, o nível passou de 1,71 metros para 3,35 metros em 8 horas.

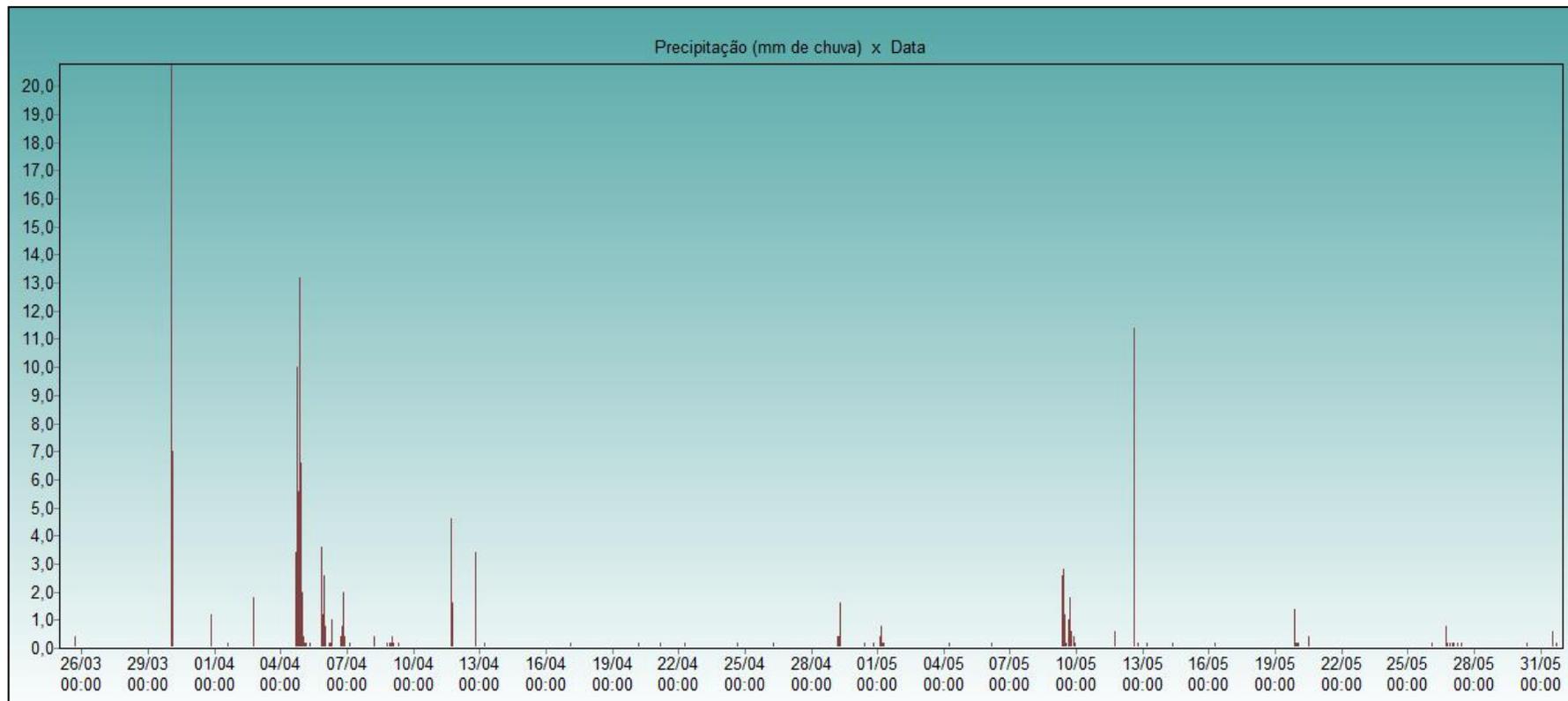


Figura 6.7 – Distribuição diária da precipitação – Estação Médio Curso – CPRM. Período: março a maio de 2010

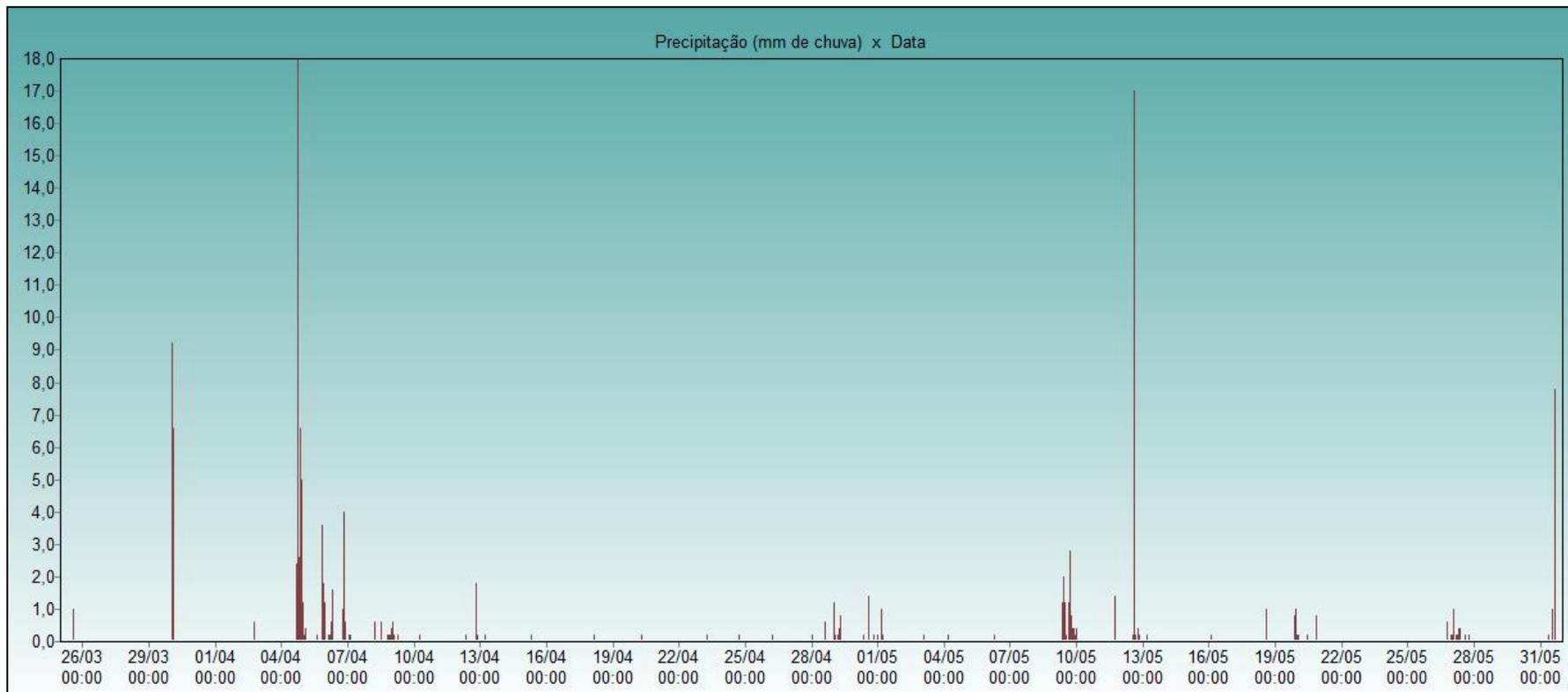


Figura 6.8 – Distribuição diária da precipitação – Estação baixo curso – Sorvete. Período: março a maio de 2010

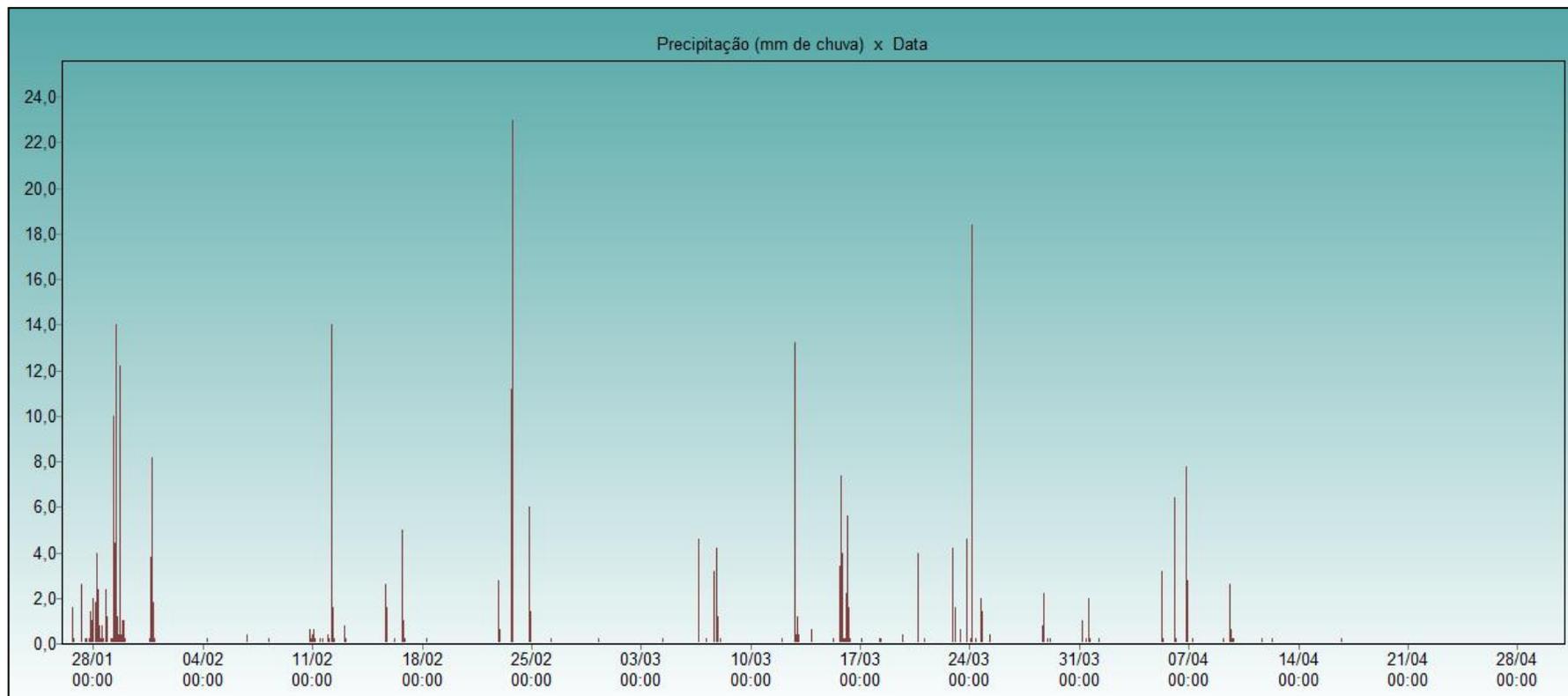


Figura 6.9 – Distribuição diária da precipitação – Estação baixo curso – Sorvete. Período: Janeiro a abril de 2012

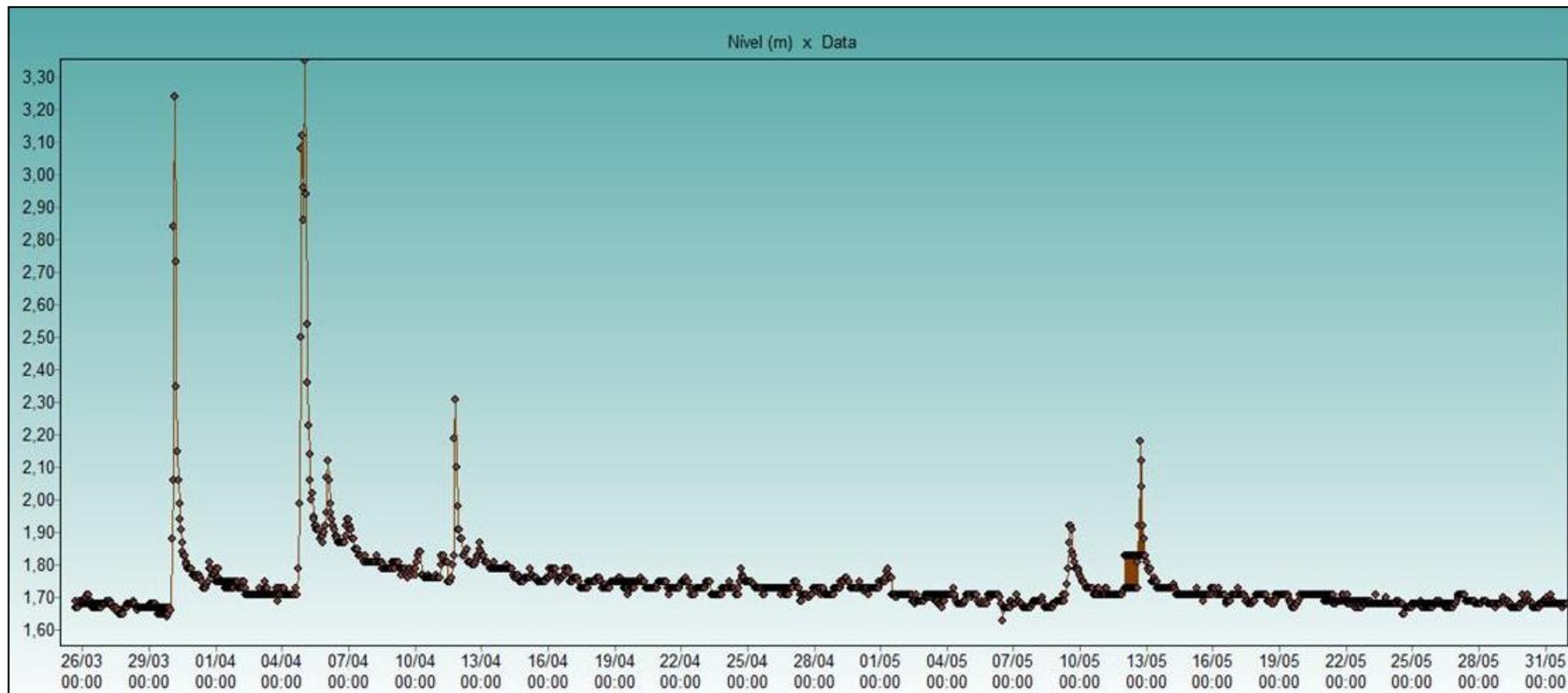


Figura 6.10 – Variação do nível d'água – Estação médio curso – CPRM. Período: março a maio de 2010

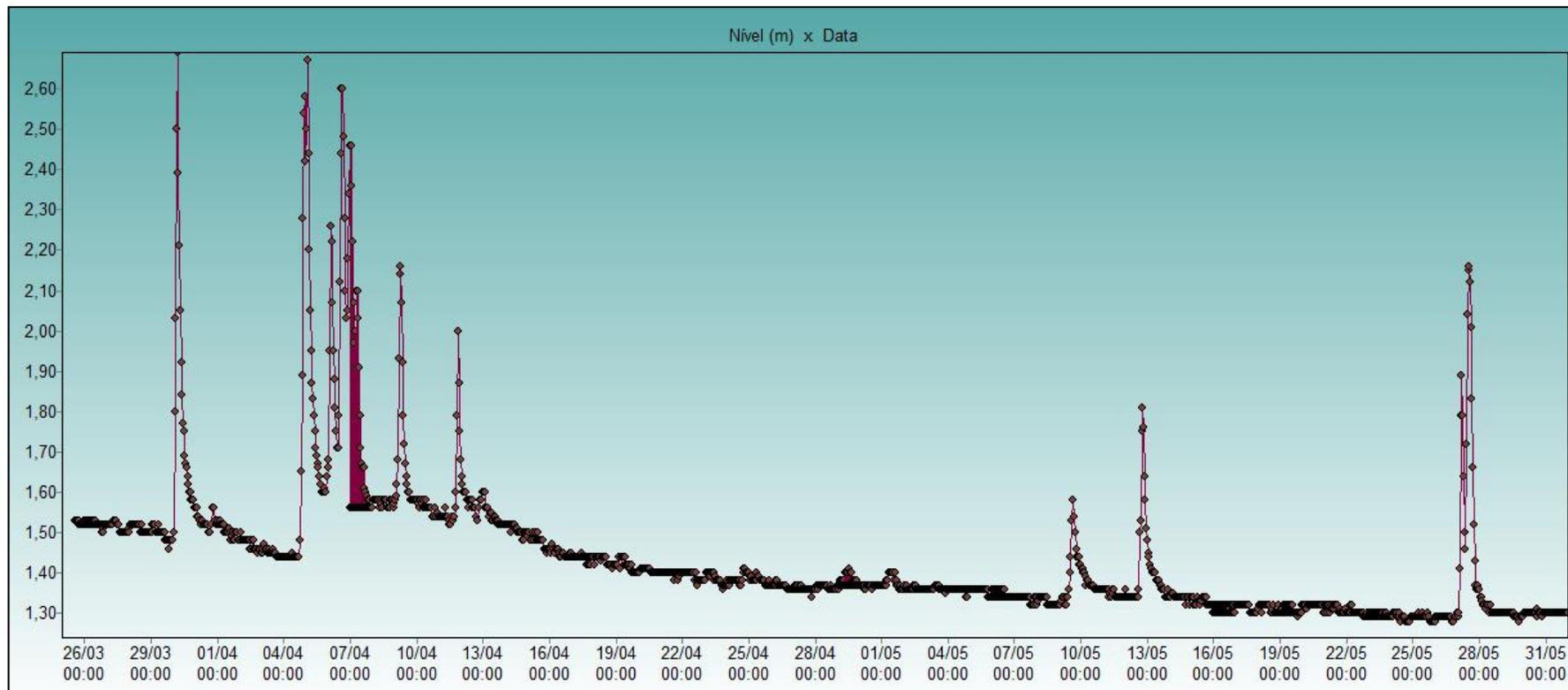


Figura 6.11 – Variação do nível d'água – Estação baixo curso – Sorvete. Período: março a maio de 2010

6.4 Medição de Vazão

Durante esta pesquisa foram realizadas medições mensais de vazão, entre novembro de 2011 e novembro de 2012, ficando apenas o mês de julho de 2011 sem medição devido à impossibilidade de ida a campo. O objetivo era utilizar a curva-chave de cada secção como parâmetro de comparação entre os resultados de variação de altura linimétrica do modelo com as medições de campo. Conforme mencionado no item 3.2 da revisão bibliográfica, a curva-chave para a secção de um canal fluvial é uma função que descreve a relação entre a vazão e a altura linimétrica, permitindo a previsibilidade dos valores de vazão de um canal em condições adversas, como períodos de chuvas intensas ou de estiagem.

Como também optou-se pela utilização dos dados de 2010 para a modelagem, já que em 2012 só contou-se com uma estação de registro automático houve a necessidade de considerar a curva-chave mais próxima para esse período, que foi a confeccionada por Brum (2010) durante sua pesquisa entre 2009 e início de 2010.

Sendo assim, as figuras 6.13, 6.14 e 6.15 apresentam as duas curvas-chave existentes para cada seção.

Os resultados da curva-chave elaborada por Brum (2010), durante o ano de 2009/2010, no alto curso apresentou um baixo coeficiente de determinação, ou seja, $R^2 = 0,559$ (figura 6.13). O coeficiente de determinação (caracterizado por R^2) possui um intervalo de 0 a 1, de modo que, quanto maior for seu valor, mais ajustado será o modelo da curva chave. O autor atribuiu essa baixa correlação devido à pequena quantidade de medições e também à possibilidade de assoreamento do canal, relacionado às expressivas taxas de erosão na encosta com manejo agrícola convencional, adjacente à margem direita da estação. Em 2012 essa mesma estação apresentou um coeficiente $R^2 = 0,6359$ (figura 6.13) com a mesma quantidade de medições de 2009/2010, o que ainda pode ser considerada como uma baixa correlação. Ao compararmos as duas tabelas da figura 6.13, observamos que em 2012 a vazão e a variação entre as cotas no período seco e no úmido foram maiores do que em 2009/2010, o que, provavelmente, refletiu em um ligeiro aumento no coeficiente.

A estação do médio curso – CPRM em 2009/2010 apresentou uma boa relação polinomial com elevado coeficiente de determinação, $R^2 = 0,983$ (figura 6.14). Teoricamente esse resultado indica que ao inserir o valor da altura da lâmina da água na equação, 98% das variações dos valores de vazão podem ser previstas pelo modelo. Brum (2010) ressalta que essa estação contou com um maior número de medições de vazões, totalizando 13 medições.

No entanto, em 2012, o coeficiente de determinação foi de apenas de $R^2 = 0,4118$, resultado já esperado tendo em vista a dragagem realizada nesta seção em abril de 2012, ainda no período inicial das medições. Na figura 6.14 fica evidente a mudança drástica no nível de base do rio; no mês de março a cota no dia da medição era de 186 cm, já em abril, após a dragagem, a cota estava em 129 cm.

Já a equação da curva-chave da Estação Sorvete em 2009 (figura 6.15) apresentou um coeficiente de determinação mais elevado que a estação do alto curso “Gilberto” e inferior à estação do médio curso – CPRM, com $R^2 = 0,798$. Essa correlação pode estar relacionada com possíveis influências de remanso provocado durante a elevação da vazão do rio Preto, uma vez que a Estação Sorvete se localiza cerca de 300 metros a montante do exutório da bacia, ou seja, próximo do encontro do Córrego Sujo com o rio Preto (BRUM, 2010). O autor ainda indica a limitada quantidade de medições como outro problema para esta estação.

Em 2012, essa estação apresentou um coeficiente $R^2 = 0,6735$ (figura 6.14), ligeiramente menor que em 2009, o que não era esperado devido ao maior número de medições que contribuíram para o registro das vazões em períodos mais secos, como ocorrido em 14/09/2012, onde a vazão foi de $0,4\text{m}^3/\text{s}$ e em períodos mais úmidos, a exemplo do dia 22/03/2012, em que a vazão estava em $1,68\text{m}^3/\text{s}$. Contudo, ao retirarem-se os dados dos dois últimos meses de medições do ano de 2012, o coeficiente aumentou para $R^2 = 0,869$. Pode-se então considerar que o valor do coeficiente de determinação é relativo e, portanto, a comparação isolada do valor de R^2 entre dois momentos monitorados não representa exatamente uma melhora ou piora no ajuste da curva, essa avaliação é mais complexa e requer um estudo específico na bacia em questão.

Diante dessas limitações nas curvas-chave, optou-se por não utilizá-las para a validação do modelo. No entanto, esses resultados demonstraram que quanto maior o número de medições que abarquem o maior número possível de variações da altura linimétrica e da vazão contribui para uma curva chave mais consistente e

confiável. Sendo assim, para um avanço ainda mais significativo desse modelo na bacia do Córrego Sujo será importante que sejam feitas medições não apenas em dias aleatórios ao longo do ano, mas também em dias chuvosos, para que sejam incluídas nas curvas-chave a maior quantidade de variação possível da vazão e, assim, a mesma possa realmente expressar o comportamento do canal mediante situações atípicas, como chuvas intensas ou períodos de estiagem.

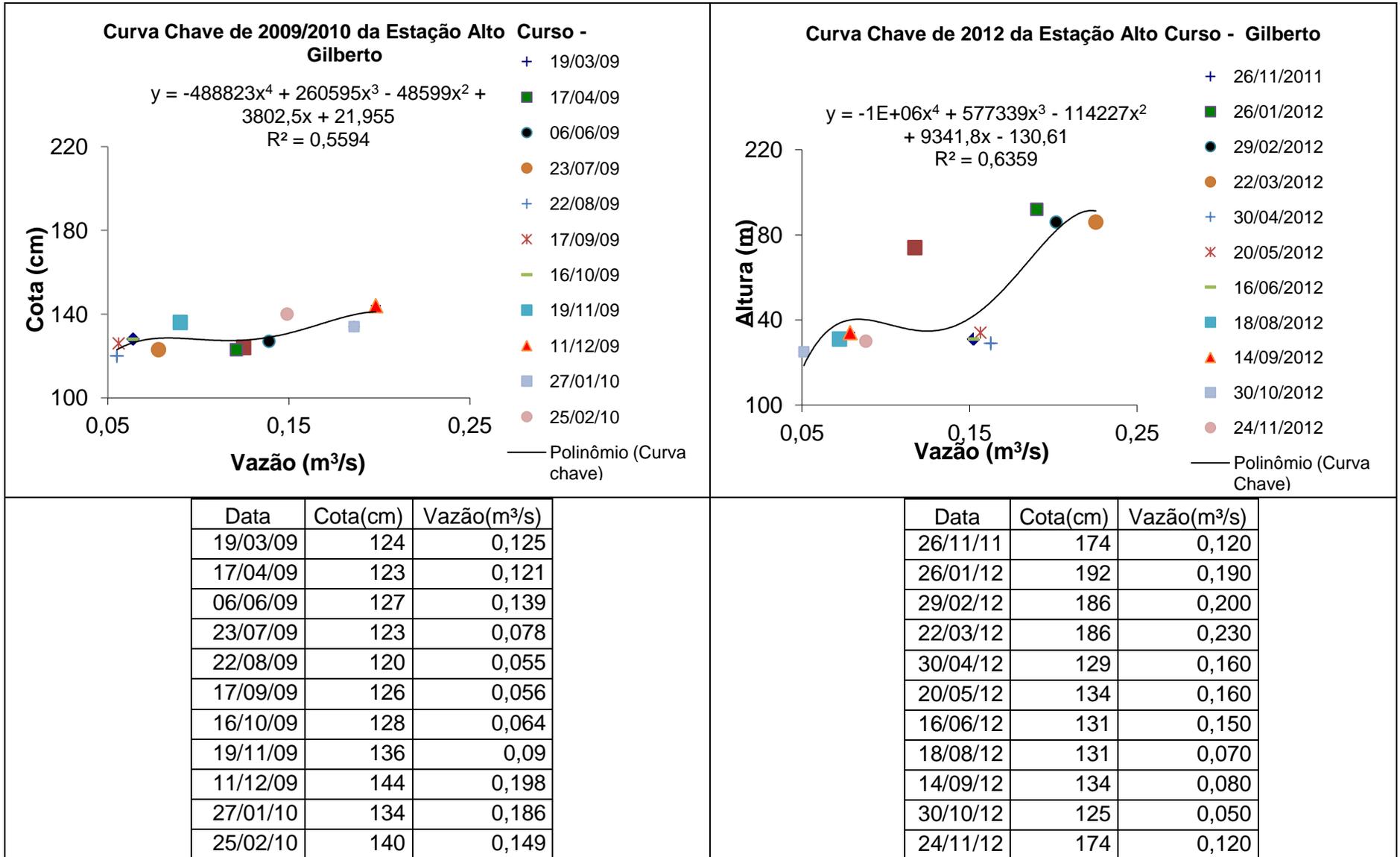


Figura 6.13 – Curvas-Chave da Estação Gilberto dos anos de 2009/2010 (adaptado de Brum, 2010) e do ano de 2012.

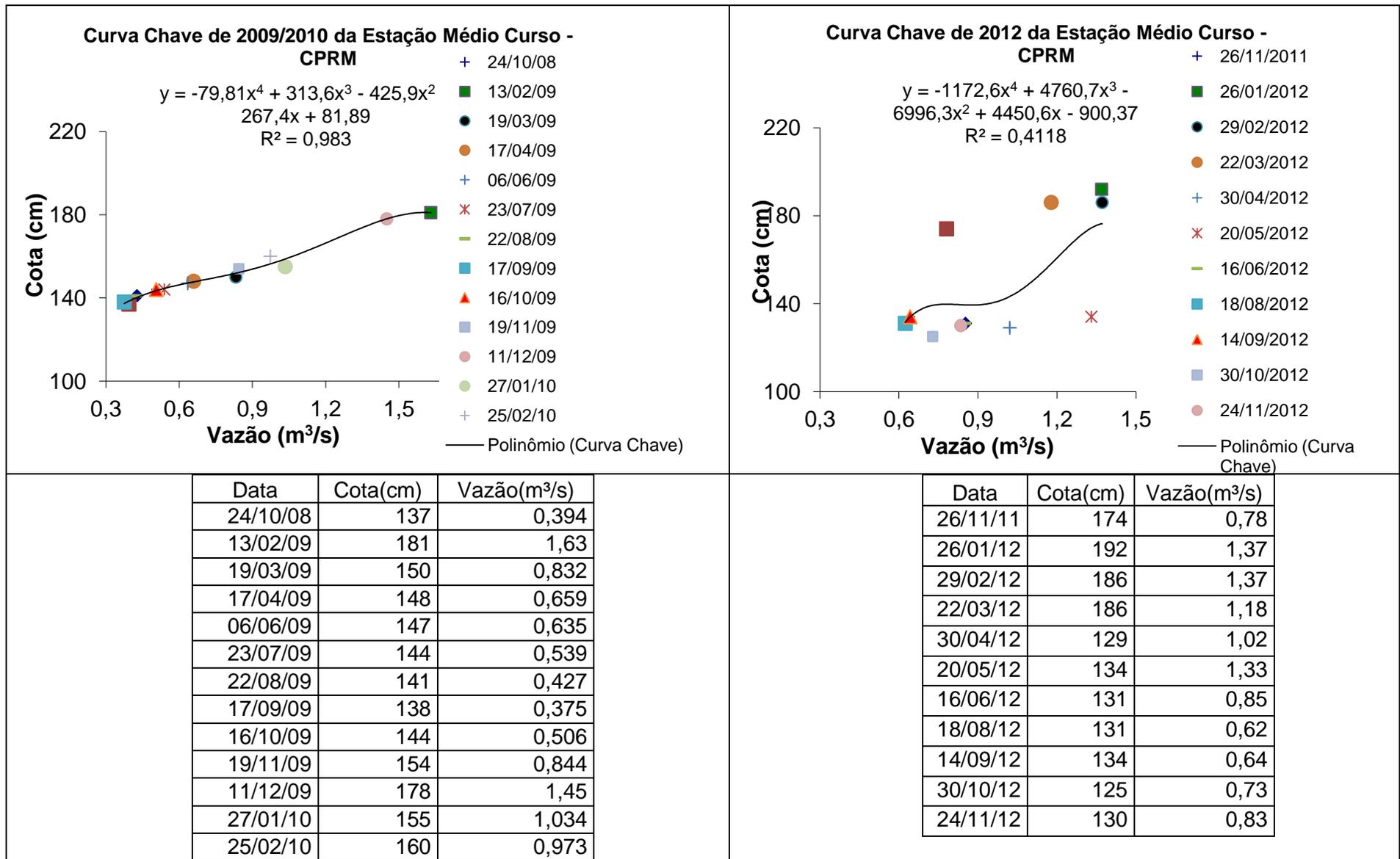


Figura 6.14 – Curvas-Chave da Estação CPRM dos anos de 2009/2010 (adaptado de Brum, 2010) e do ano de 2012.

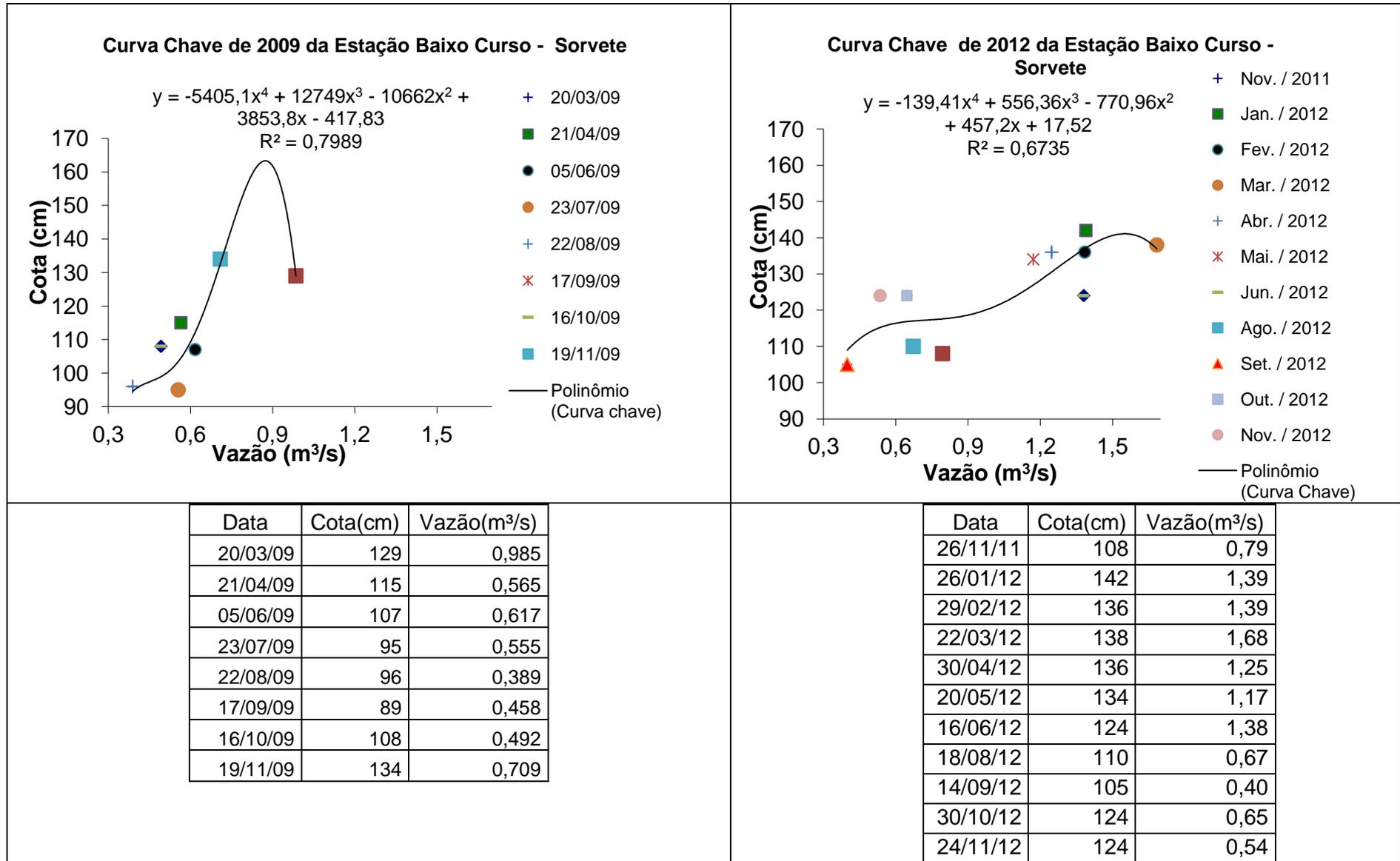


Figura 6.15 – Curvas-Chave da Estação Sorvete do ano de 2009 (adaptado de Brum, 2010) e do ano de 2012.

6.5 Mapa de Uso do Solo e Cobertura Vegetal

A figura 6.16 apresenta o mapa de uso do solo e cobertura vegetal gerado por meio da vetorização manual no Software Arc Gis 9.3, a partir da Imagem Geoeye gerada em março de 2012 e obtida para esta pesquisa. Neste mapa é possível observar um expressivo mosaico da paisagem, ainda que predominando a cobertura por gramínea. Destaca-se também a plantação de eucalipto, principalmente no baixo curso da bacia. Os cultivos agrícolas estão concentrados ao longo dos fundos de vale. As florestas encontram-se restritas a fragmentos florestais, localizados claramente mais próximos às cabeceiras de drenagem, que podem ser interpretadas como áreas de maiores elevações da bacia e provavelmente atuantes como barreiras para sua retirada. Fica evidente, portanto, a necessidade da preservação desses remanescentes, essenciais para a manutenção das zonas de recargas dos rios que drenam essa bacia.

A fim de obter maiores informações sobre a dinâmica da paisagem dessa bacia, foi realizado um comparativo entre as dimensões das áreas de uso do solo e cobertura vegetal calculada para esta pesquisa, na escala 1:10.000, com o trabalho realizado por Araújo (2009) e citado no capítulo 4.

O mapeamento da autora supracitada foi realizado em uma escala com menor detalhe (1:30.000), o que limita uma comparação quantitativa direta. Sendo assim, foi possível verificar que o tamanho da maioria das classes não mudou significativamente de 2006 para 2012, exceto a classe de Eucalipto que teve um aumento de 2,13 km². A área de floresta aparentemente teria aumentado em 2,77 km² (5,17%) e a capoeira teria diminuído em 3,41 km² (6,37%), no entanto, é possível que tenha ocorrido uma diferença na interpretação dessas duas classes, que são mais difíceis de diferenciar em imagens de satélites, mesmo em escalas mais detalhadas. Outra possibilidade é que as capoeiras cresceram e se adensaram, dando origem a novos fragmentos florestais. Para um trabalho mais específico sobre a evolução da paisagem, seria necessário ir a campo com um profissional em botânica que auxiliasse nessa identificação mais precisa.

Para a modelagem Hidrológica proposta neste momento, tem-se que o resultado do mapeamento na escala de 1:10.000 foi satisfatório tanto para ser utilizado na modelagem do ano de 2010 quanto para o presente. Pois, como verificado, apenas a classe de eucalipto foi significativamente ampliada em seis

anos. Com relação às possíveis inconsistências na diferenciação entre a classe de floresta e de capoeira não interferiram de forma a comprometer a modelagem, pois representa uma área relativamente pequena de capoeira, 7,07%, e as taxas dos parâmetros hidrológicos são bem semelhantes entre essas duas classes.

Tabela 6.1 – Distribuição das áreas de uso do Solo e Cobertura Vegetal na Bacia do Córrego Sujo nos anos de 1999, 2006 e 2012.

Classes	Área em km ²		
	Araújo (2009) 1999	Araújo (2009) 2006	Este Estudo 2012
Afloramento Rochoso	3,89	3,89	3,62
Agricultura	4,99	3,45	3,30
Capoeira	10,26	7,20	3,79
Corpos Hídricos	0,04	0,01	0,04
Floresta	14,03	14,73	17,50
Gramínea	19,63	22,91	20,97
Silvicultura - Eucalipto	0,55	0,57	2,70
Solo Exposto ou Terraplenagem	-	-	1,62

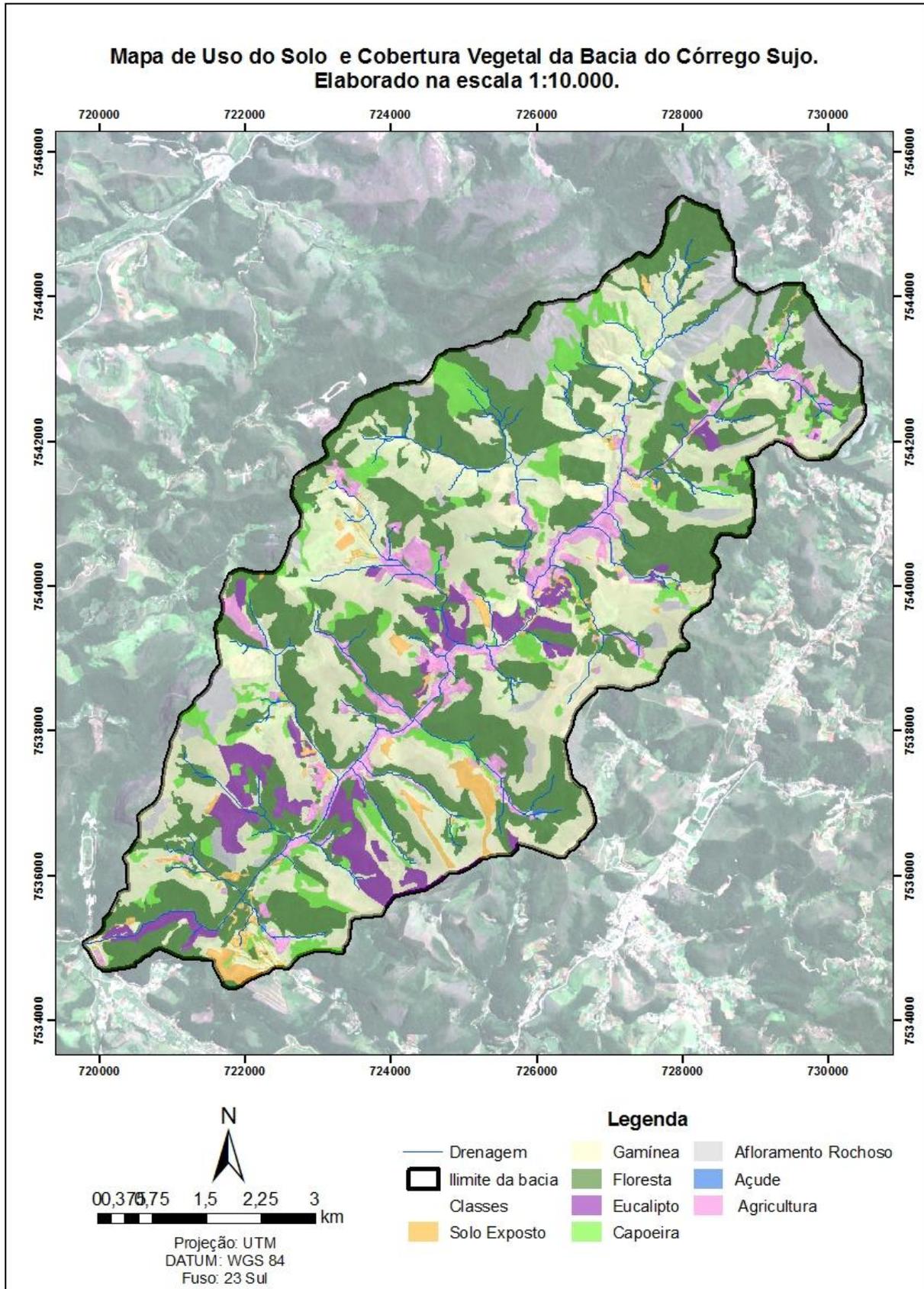


Figura 6.16 – Mapa de uso do solo e cobertura vegetal da bacia do Córrego Sujo em 2012.

6.6 Modelagem Hidrológica no Arc Hydro

A execução da modelagem hidrológica foi iniciada com a geração do MDT e seu pré-processamento para ajustes ao Arc Hydro, conforme descrito no capítulo 5 desta dissertação. A partir dessa base foi gerado um *raster* com a direção dos fluxos de água na bacia, através da ferramenta de direção de fluxo (*Flow Direction*).

Cabe lembrar que o Arc Hydro utilizou a metodologia D8 (oito direções por ponto do modelo), ou seja, a partir do MDT, ele criou uma malha de células, onde o fluxo de água foi direcionado da célula de maior valor de elevação para a célula de menor valor de elevação adjacente a ela.

A figura 6.17 ilustra o resultado dessa etapa, que se mostrou bem condizente com a base cartográfica disponível e o MDT. Nela, pode ser observado que os fluxos se direcionam aos fundos de vale. Ainda na figura 6.17, destaca-se o tom vermelho do mapa concentrado na porção oeste da bacia, que representa a direção para leste do fluxo de água, já o tom azul representa a direção oeste, concentrando-se justamente nas porções de encostas voltadas para sudeste na bacia, conforme esperado.

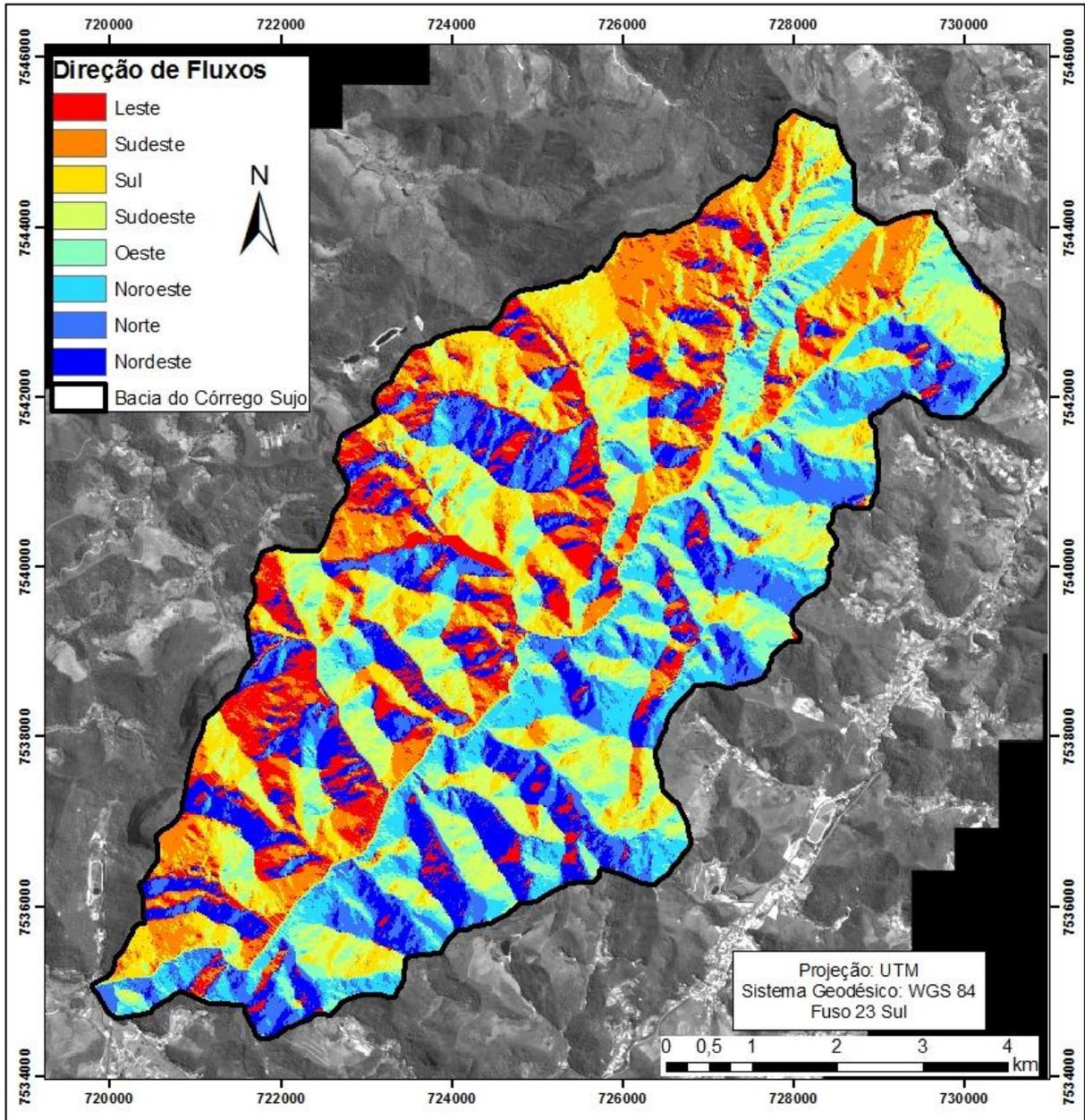


Figura 6.17 – Resultado gerado pela ferramenta direção de fluxo (*Flow Direction*).

A partir do *raster* com a direção de fluxo e através da ferramenta de elaboração de um mapa de acumulação de fluxo (*Flow Accumulation*), o Arc Hydro calcula para cada pixel um valor que representa a quantidade de células que vão em direção a esse pixel, gerando um *raster* de acumulação de fluxo. Quanto mais alto o valor do pixel, maior a quantidade de fluxo que está sendo direcionado para ele. A figura 6.18 representa o resultado dessa etapa, onde é possível observar que as partes mais claras do mapa representam os maiores valores de acumulação de fluxo, localizam-se justamente nos fundos de vale. O maior valor encontrado de fluxo

de acumulação foi 531868, posicionada na saída da bacia, o que torna o resultado desta etapa satisfatório, tendo em vista que o esperado é exatamente que o exutório da bacia receba a contribuição de todos os fluxos gerados na bacia.

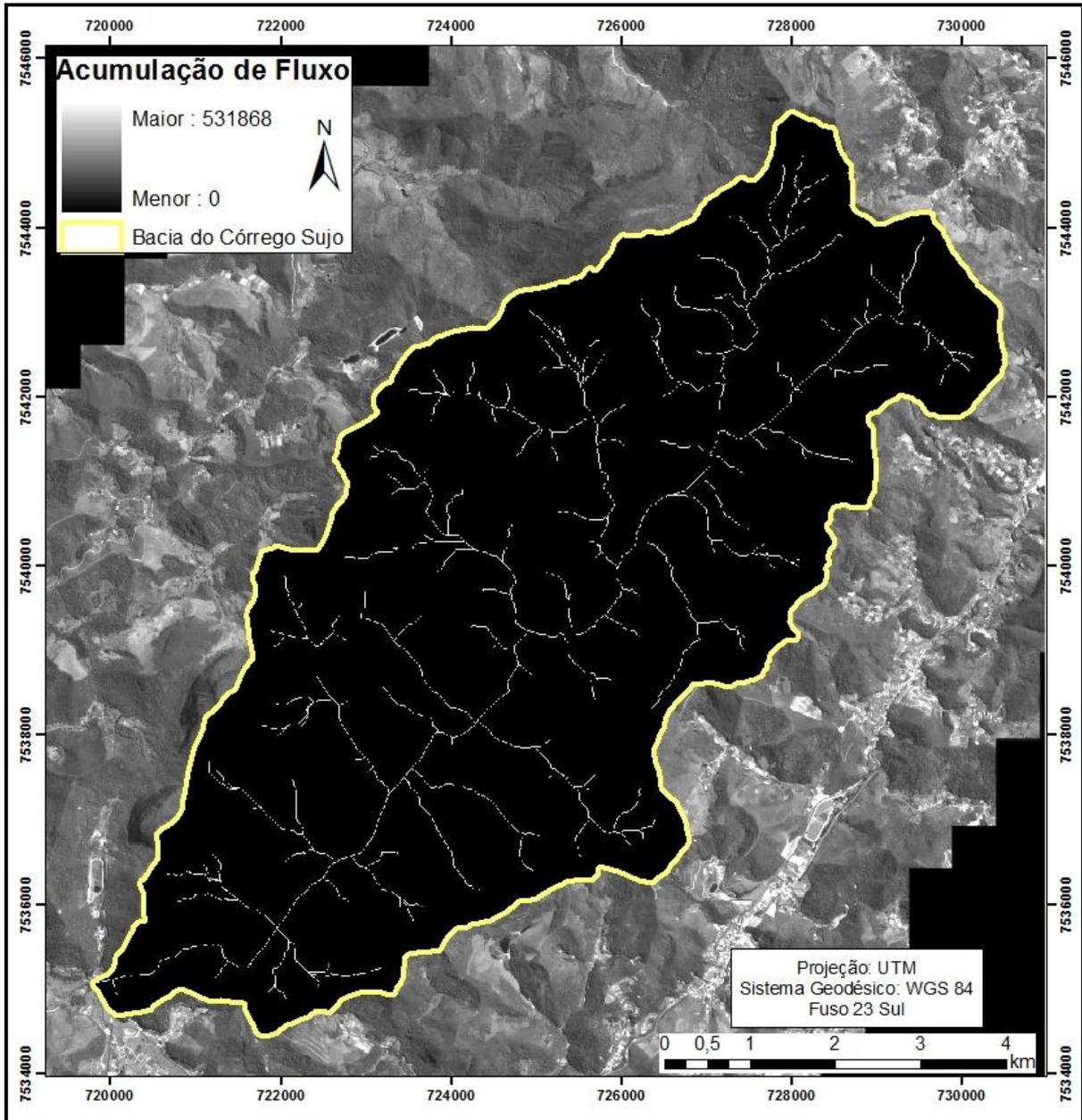


Figura 6.18 – Resultado gerado pela ferramenta acumulação de fluxo (Flow Accumulation)

Seguindo o passo a passo descrito na metodologia (capítulo 5), o próximo resultado foi a definição dos canais em *raster*, realizado por meio da ferramenta (*Stream Definition*) que criou, a partir do *raster* de acumulação de fluxo da etapa anterior, um novo *raster* contendo as feições das linhas de drenagem da bacia hidrográfica. A primeira tentativa deste procedimento utilizou a definição de fluxos usando 1% da área da bacia (10.000 células) como a área de contribuição mínima

para gerar um canal de drenagem. Apesar do resultado encontrado ter sido coerente, pela definição do fluxo ter seguido o caminho dos fundos de vale, foi observado que as linhas de drenagem estavam distantes das cabeceiras de drenagem.

Sendo assim, numa segunda tentativa, optou-se por reduzir a área de contribuição mínima para a metade da anterior, isto é, 0,5% (2.658 células). Devido ao resultado similar foi feita uma tentativa com 0,25% e, enfim, com 0,125% da área. Optou-se por utilizar a penúltima tentativa (0,25% de área mínima), satisfatória para esse estudo, pois se aproximou bem das cabeceiras de drenagem e não segmentou tanto a drenagem, uma vez que 0,125% gerou canais muito próximos e sem coerência geomorfológica.

A figura 6.19 mostra a sobreposição das drenagens geradas utilizando as diferentes áreas de contribuições mínimas para geração da cabeça dos canais, onde fica evidente que: a medida que reduz-se a área de contribuição, indicada pela porcentagem da área da bacia, ocorre um avanço dos comprimentos dos canais em direção às cabeceiras de drenagem.

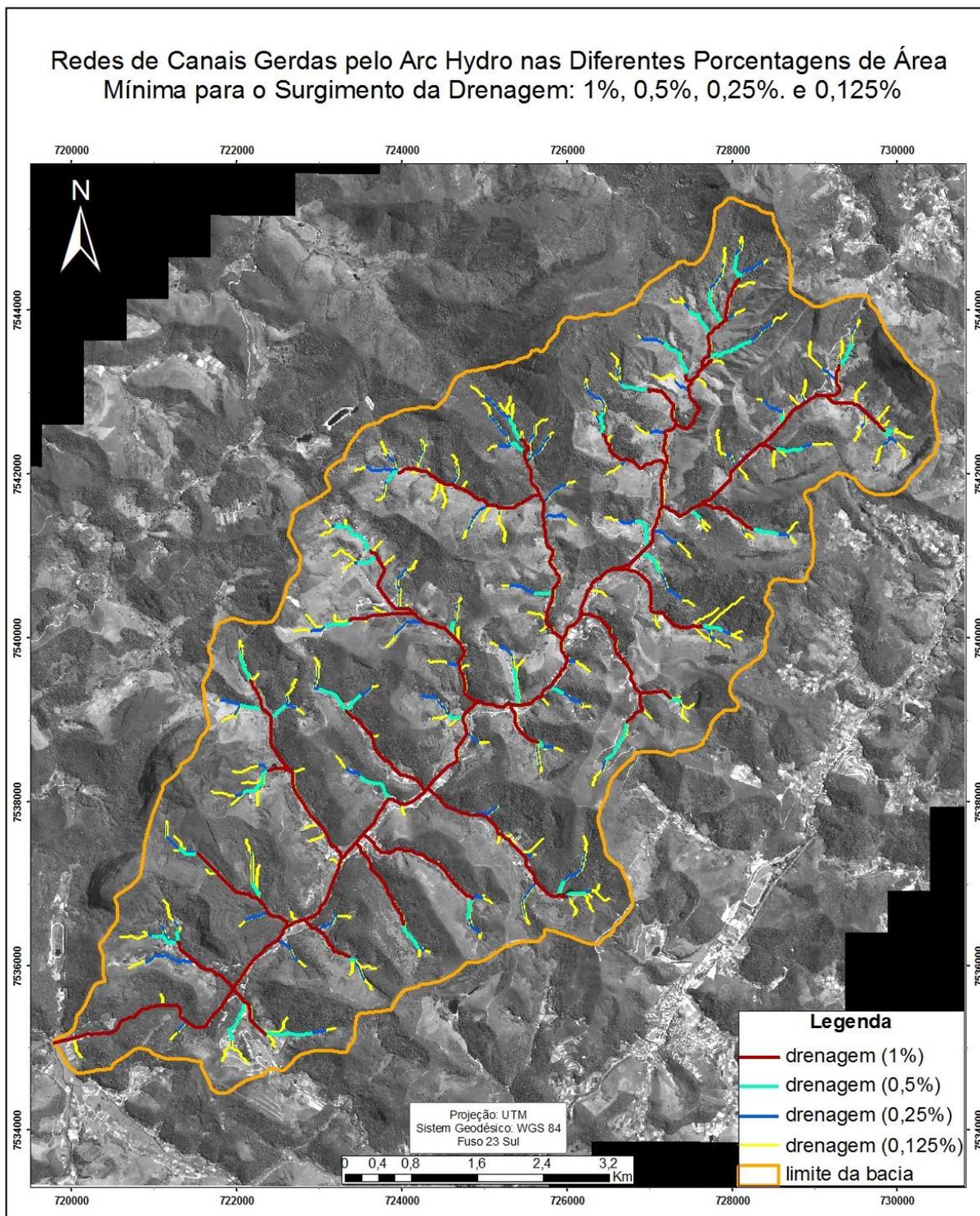


Figura 6.19 – Comparação entre utilização de diferentes porcentagens de área mínima para a definição dos fluxos da bacia do Córrego Sujo. O formato que está no mapa já é o vetorial realizado pela ferramenta “Stream Definition”.

Posteriormente, foi realizada a delimitação das bacias de contribuição com a ferramenta “*Catchment Grid Delineation*”, que utilizou os resultados da direção de fluxo e da segmentação da etapa anterior. O resultado desta etapa está representado na figura 6.20 e demonstra uma coerência com a drenagem gerada.

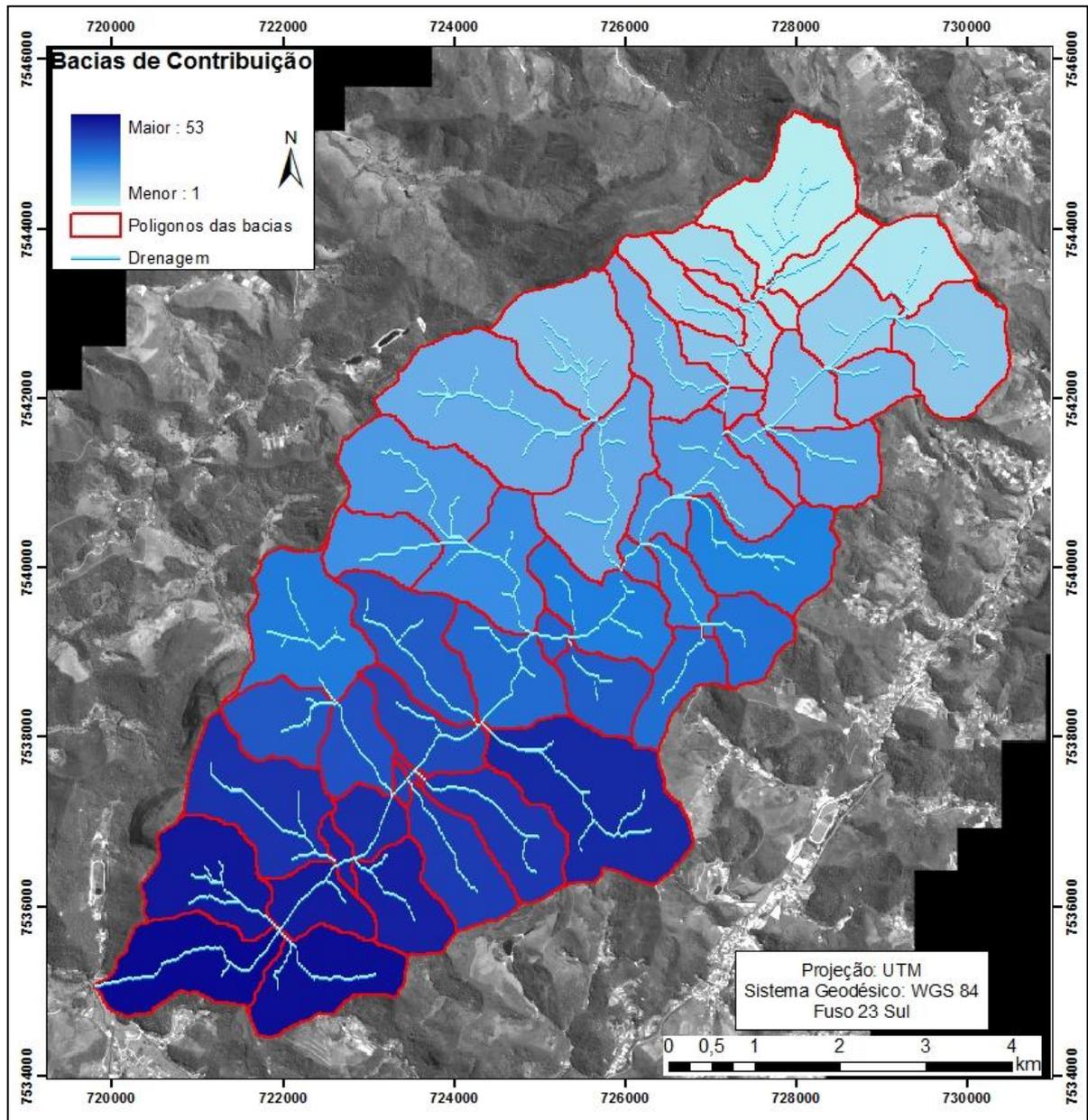


Figura 6.20 – Resultado do uso da ferramenta *Catchment Grid Delineation* em formato *raster* e os polígonos resultantes da transformação para o formato vetorial.

A etapa seguinte foi transformar o resultado da segmentação da drenagem em linhas de drenagem no formato vetorial em cada um dos testes realizados com o Stream Definition. A drenagem representada nos mapas a seguir foi gerada nesse momento utilizando 0,25% da área mínima para gerar um canal de drenagem.

Posteriormente, foi realizada a inserção da localização das três estações de monitoramento por meio da ferramenta “*Batch Point Generation*”, nesse momento foi necessário informar que aqueles eram os pontos de saída da bacia.

Finalmente, utilizou-se a ferramenta “*Batch Watershed Delimitation*” que criou as três áreas de contribuição de cada ponto de monitoramento. Como base para a criação dessas áreas foram utilizados os resultados da Direção de Fluxo (*flow Direction Grid*), a segmentação dos cursos d’água (*Stream Segmentation*), os pontos de localização das estações (*Batch Point*), as áreas de contribuição, além dos limites da área da bacia.

Pode-se considerar que o resultado da geração das áreas de contribuição pelo Arc Hydro foi satisfatório, por ser bem condizente com a rede de drenagem gerada e as saídas onde existe monitoramento na bacia, como mostra a figura 6.21.

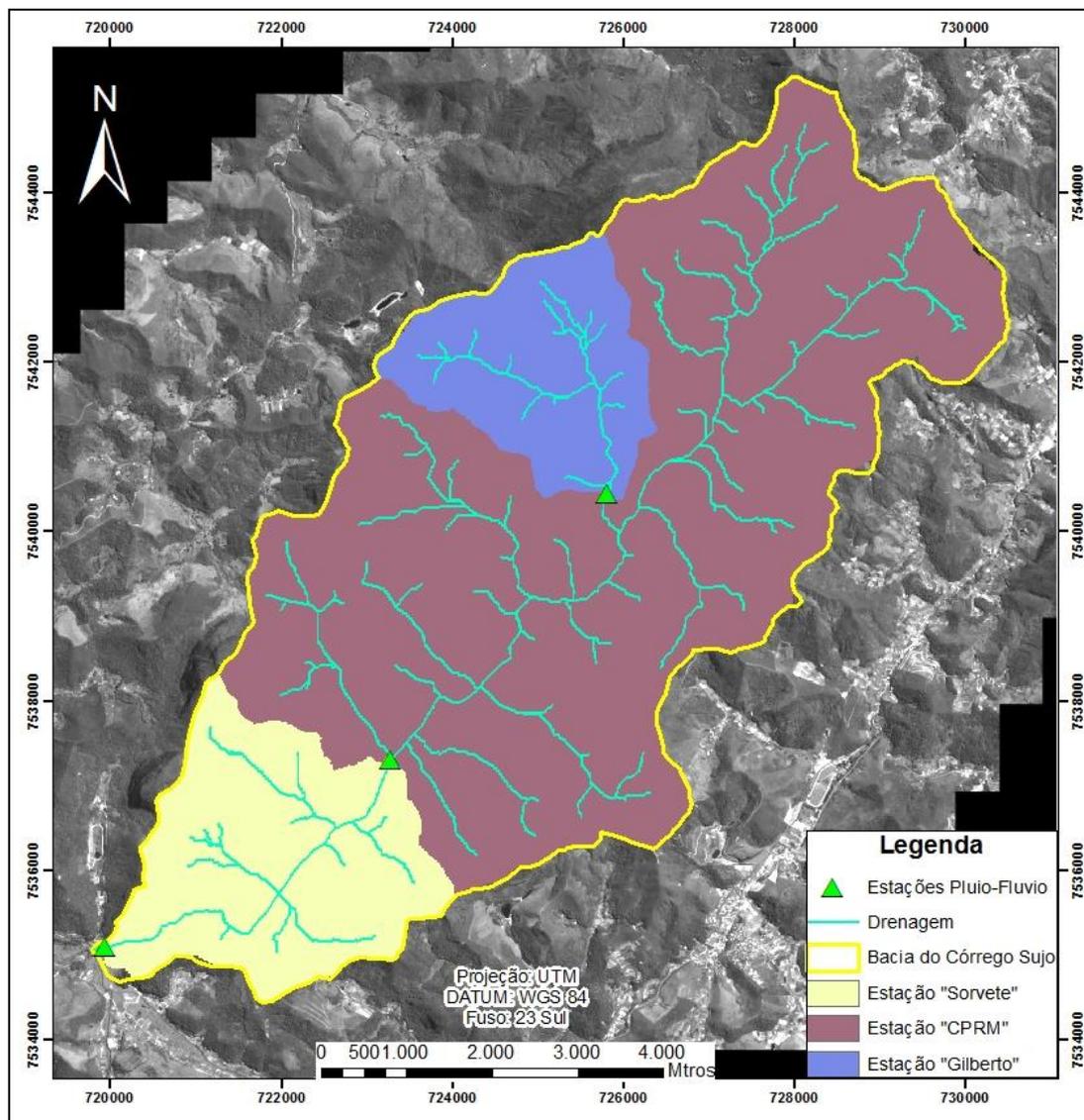


Figura 6.21 – Áreas de Contribuição geradas pela ferramenta *Batch Watershed Delimitation*.

Finalizadas as etapas utilizando o Arc Hydro, foi feito no Arc Gis o cruzamento dos dados de área de contribuição, acumulação de fluxo e uso do solo, possibilitando encontrar o valor do volume escoado em cada célula separadamente. O valor do volume escoado foi calculado com base nas fórmulas descritas na tabela 5.3 do capítulo 5 desta dissertação. Posteriormente, foi elaborado um mapa com as classes de volume de escoamento para cada hidrógrafa analisada.

6.6.1 Comparação do Modelo Hidrológico em Diferentes Eventos de Chuva e Escoamento

Ocorreu uma série de dificuldades durante a seleção dos eventos que seriam modelados, em especial devido a problemas com os registros de campo e com os equipamentos, conforme já relatado no início deste capítulo. Optou-se por utilizar os dados das estações automáticas do ano de 2010, pois apenas a partir do final de março desse ano as duas estações estavam funcionando ao mesmo tempo; e em novembro e dezembro a Estação Sorvete apresentou problemas no pluviômetro automático.

As duas maiores limitações do uso dos dados de 2010 foram: (a) os equipamentos de medição automática estavam registrando os dados apenas de hora em hora e (b) foram verificados apenas eventos com chuvas de pequena intensidade, já que nos meses mais chuvosos (janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro) ocorreram problemas nos registros.

A Estação Gilberto não pôde ser modelada porque não contava com equipamento automático e, portanto, não seria possível identificar a duração do evento e a amplitude da altura linimétrica. No entanto, a área de contribuição dessa estação é relativamente pequena e não comprometeu de forma significativa a modelagem das outras duas estações (CPRM e Sorvete).

As figuras 6.22 a 6.34 que serão apresentadas ilustram as seis hidrógrafas do ano de 2010 analisadas, que serão comparadas em termos de geração de fluxo no canal com os respectivos mapas de distribuição do volume escoado e as tabelas que traduzem os cálculos da variação de nível do rio: tanto a mensurada em campo como em função destes eventos de chuva e vazão. A tabela 6.2 apresenta o significado de cada item presente nas tabelas com os cálculos da modelagem.

Tabela 6.2 – Itens presentes nas tabelas dos cálculos da modelagem.

Item	Significado	Item	Significado
Data	Data do evento modelado	h (m) – pico	Altura linimétrica de pico durante o evento (em metros)
P (mm)	Precipitação total ocorrida até o momento de pico da altura linimétrica durante o evento	Variação h medida (m)	Diferença entre a maior e a menor altura linimétrica durante o evento
Duração Chuva (h)	Tempo da chuva em horas	Vesc_uso_a_m³	Volume escoado total na bacia em função do uso e da área.
Duração Chuva (min)	Tempo da chuva em minutos	m³/s (chuva)	Vazão do rio durante o evento resultante da divisão do volume escoado (Vesc_uso_a_m³) pelo tempo de duração da chuva em segundos
Duração Chuva (s)	Tempo da chuva em segundos	m³/s (hidrog)	Vazão do rio durante o evento resultante da divisão do volume escoado (Vesc_uso_a_m³) pelo tempo de variação da altura linimétrica em segundos.
Duração Hidrog (h)	Tempo de variação da altura linimétrica do início da chuva até o pico da altura linimétrica em horas	Variação h do modelo (m)	Divisão entre a vazão do rio durante a chuva (m³/s (chuva)) pela área da secção molhada
Duração Hidrog (min)	Tempo de variação da altura linimétrica do início da chuva até o pico da altura linimétrica em minutos	Variação h do modelo Hidrog (m)	Divisão entre a vazão do rio durante a variação de altura linimétrica (m³/s (hidrog)) pela área da secção molhada
Duração Hidrog (s)	Tempo de variação da altura linimétrica do início da chuva até o pico da altura linimétrica em segundos	% desvio	Desvio padrão do modelo considerando o tempo da chuva durante o evento
Am – Total (m²)	Área da secção molhada durante o evento	% desvio hidrog	Desvio padrão do modelo considerando o tempo da variação da altura linimétrica
h (m) – nível antec.	Altura linimétrica antes da chuva em metros		

Foram incluídos na tabela os percentuais de erro do modelo em relação às alturas linimétricas de campo. Cabe ressaltar que diante das dificuldades existentes em se obter a curva-chave e determina a duração exata da chuva, foi considerado como satisfatório os resultados que apresentaram erros menores que 50%.

A figura 6.22 apresenta a hidrógrafa 1, com as chuvas e variação linimétrica ocorridas no dia 30/03/2010. A chuva que gerou essa hidrógrafa não ocorreu de maneira homogênea nas duas áreas de contribuição, isto é, na Estação CPRM foi registrada uma altura de chuva de 21,7 mm com uma hora de duração, enquanto que na Estação Sorvete choveu 15,8 mm no mesmo período. O desvio entre a variação de nível do modelo em relação à altura linimétrica registrada no sensor de nível foi de 22% para a Estação CPRM e 74,97% para a estação Sorvete.

Optou-se, então, por realizar uma modelagem considerando o tempo necessário para a elevação do nível linimétrico, que foi chamado de “tempo da hidrógrafa” na tabela de cálculo, a fim de melhor entender como o modelo responderia. Os resultados mostraram que na maioria dos casos o erro diminui quando se considera esse tempo da hidrógrafa. Possivelmente iaô fato de que há um tempo de resposta da hidrógrafa que reflete a ocorrência da recarga efetuada pela água que chega em subsuperfície, talvez o fluxo subsuperficial raso.

No entanto, na comparação feita ainda para o dia 30/03/2010, mostrou que o erro aumentou quando se considerou o tempo da hidrógrafa na Estação CPRM, alcançando -133,64% e diminui para -0,10% na estação Sorvete. A Estação CPRM segue na maioria das vezes com os maiores desvios, que pode estar associado às maiores variabilidades de respostas de uma menor área de contribuição. Isto pode estar associado ainda a uma maior variabilidade na forma da secção fluvial, quer por assoreamento ou erosão durante os eventos de chuva. Pode-se perceber nas comparações das hidrógrafas seguintes que a resposta da chuva no canal acontece em um tempo relativamente curto.

Analisando os mapas, percebe-se que os maiores valores de escoamento se dão nos afloramentos rochosos que se destacam em todos os outros mapas, como já era esperado. Como maior área do mapa é coberta por gramínea, as taxas de escoamento não são tão elevadas porque a taxa de interceptação atribuída (0,27) a esse tipo de vegetação é a maior entre todas as outras coberturas, inclusive de floresta.

Os maiores volumes de escoamento também acompanham os fundos de vale do canal principal, fortemente ocupado pela agricultura, e que apresenta uma taxa de interceptação baixa (0,15) e uma taxa de escoamento relativamente elevada (0,2).

A análise da hidrografa 2 (figura 6.23) mostra que a modelagem realizada para o dia 05/04/2010 resultou em um desvio muito alto na estação CPRM: -158,12%, considerando o tempo da chuva e -201,95% considerando o tempo da variação de nível. Já a Estação Sorvete respondeu bem, com um erro de apenas 7,9% considerando o tempo de chuva e -5,26% considerando o tempo da variação de nível. Esta modelagem reforça a ideia de que há maior estabilidade na forma da seção fluvial na Estação Sorvete.

Outros testes com o modelo nos revelou que ele não houve boa resposta à precipitações com as hidrógrafas compostas e com maior variabilidade de chuva (figura 6.23), sendo assim, optou-se por decompor essas hidrógrafas e remodelar esses eventos em dois momentos diferentes. Este procedimento foi feito para a data de modelagem: 05/04/2010 A (figura 6.24) com um primeiro pico com precipitação de 40,8mm na CPRM durante 5 horas e 36,8mm em 6 horas na Estação Sorvete; e o evento de 05/04/2010 B (figura 6.25), referindo-se ao segundo pico gerado após a chuva de 2 mm em ambas as estações e durante uma hora na estação CPRM e duas horas na Estação Sorvete.

Nos dois casos o erro na estação CPRM foi bem menor do que com a hidrógrafa composta, mas na Estação Sorvete o erro aumentou. No primeiro pico de cheia o desvio foi de -54,69% na estação CPRM e 29,36% na Estação Sorvete. No segundo pico, o desvio foi de 11,10% na estação CPRM e de 74,96% na Estação Sorvete.

A figura 6.26, apresenta a hidrógrafa do dia 06/04/2010, com uma chuva de baixa intensidade: 8,4mm em 4 horas na estação CPRM e 6,6mm em 3 horas na Estação Sorvete. O erro foi bem elevado na estação CPRM: 81,75%, reduzindo pouco para a consideração do tempo da hidrógrafa, ou seja, reduzindo para 72,63%. O desvio foi bem reduzido na Estação Sorvete, passando de 41,5% considerando o tempo de duração da chuva para -17,01% considerando o tempo da variação do menor para o maior nível do rio durante o evento. Apesar destas modificações, observa-se que a modelagem não se ajustou bem em condições de chuva de baixa intensidade.

As duas hidrógrafas seguintes, também com pouca chuva, apresentaram erros elevados, sendo maiores nas chuvas com menores alturas e com respostas pouco significativas, portanto, mais difíceis de modelar.

Na hidrógrafa da figura 6.27, dia 11/04/2010, o erro variou de 68,83% na estação CPRM para 86,46% na Estação Sorvete. Nesse caso, a chuva na Estação Sorvete foi de apenas 0,1mm, mas a variação de nível se deve à chuva de 6,6 mm registrada na estação CPRM.

O evento de 09/05/2010, representado na figura 6.28, também apresentou um desvio alto, variando de 86,3% para 79,45% na estação CPRM e de 85,93% para 75,38% na Estação Sorvete.

Em 12/05/2010, figura 6.29, o erro variou na estação CPRM de 78,56% (tempo da chuva) para 67,84% (tempo da hidrógrafa), no Sorvete essa amplitude foi de 89,05 para 67,15%.

Os resultados obtidos em 2010 revelaram-se mais satisfatórios nos eventos onde as alturas de chuva eram maiores e a variação de nível mais significativa; e também o modelo mais ajustado foi aquele que considerou o tempo da hidrógrafa na maioria dos casos.

Diante dessa dificuldade em obter eventos com chuvas mais altas e com o tempo de duração mais preciso, optou-se em incluir a modelagem dos dados do ano de 2012, apesar de contar apenas com o registro automático da Estação Sorvete, essa modelagem mostrou-se satisfatória. Cabe explicar nesse momento que 4 das cinco modelagens considerou a chuva registrada na Estação Sorvete como sendo igual em toda a bacia, e apenas em 1 caso foi viável a utilização da leitura manual. Dessa forma, manteve-se a tolerância de 50% para considerar o modelo como satisfatório. As hidrógrafas do ano de 2012 apresentaram um tempo maior de descida do nível do rio, o que provavelmente foi devido uma demora do sensor em detectar essa descida de nível.

Na figura 6.30 encontra-se o cálculo da modelagem para o dia 29/01/2012, quando ocorreu uma chuva de 50,6 mm durante 6 horas e 45 minutos, o desvio do modelo foi de -168,42%. Considera-se que a maior causa de o erro ter sido tão elevado deve-se à característica da chuva com dois picos de intensidade e à elevação simples da hidrógrafa, resultando em uma chuva de longa duração e que também gerou uma variação de nível prolongada.

Na figura 6.31 encontra-se a hidrógrafa do dia 23/02/2012, com uma característica bem diferente das anteriores: uma chuva de elevada intensidade na Estação Sorvete (71,4 mm) e com uma subida discreta do nível do rio. Nesse caso foi possível utilizar o dado da leitura manual das outras duas estações, e foi

constatada uma discrepância da altura de chuva entre as estações. Na Estação CPRM registrou-se apenas 6,5 mm de chuva e na Estação Gilberto houve 24,2 mm. Deve ser ressaltado que a leitura de campo da Estação Sorvete teve o valor compatível ao registrado no equipamento automático. Talvez esse evento bem atípico tenha sido a causa para uma modelagem com um alto desvio de 77,64%. Logicamente, o mapa dessa modelagem apresenta os valores mais elevados de volume escoado na área de contribuição da Estação Sorvete, onde a altura de precipitação foi maior.

A modelagem do evento de 15/03/ 2012 (figura 6.32) apresentou um erro de 50,92% considerando o tempo da duração da chuva e 43,09% considerando tempo da hidrógrafa. O resultado mostrou-se satisfatório apenas quando considerado o tempo em que o rio demorou a atingir a cota de pico no evento. Revelando mais uma vez que o modelo responde melhor nesse segundo caso de variação do tempo.

Na figura 6.33 encontra-se a modelagem do dia 16/03/2012, com um desvio de -8,3% considerando o tempo de chuva e -24,96% considerando o tempo da hidrógrafa. Esse resultado foi considerado como satisfatório e parece que a influência da umidade antecedente do dia anterior gerou melhor ajuste do modelo chuva-vazão.

Da mesma forma para o dia 24/03/2012 (figura 6.34) observa-se uma modelagem ainda satisfatória, quando considerado o tempo de subida da hidrógrafa, ou seja, um erro de 6,51%.

Os resultados da análise da modelagem do ano de 2012, assim como em 2010, mesmo com as limitações hora apresentadas, revelam-se mais satisfatórios nos casos de maior intensidade de chuva, demonstrando alguma potencialidade do modelo para chuvas mais raras e mais danosas. Por outro lado, também revela várias limitações para chuvas prolongadas e hidrógrafas compostas, que podem ser minimizadas com os avanços da pesquisa.

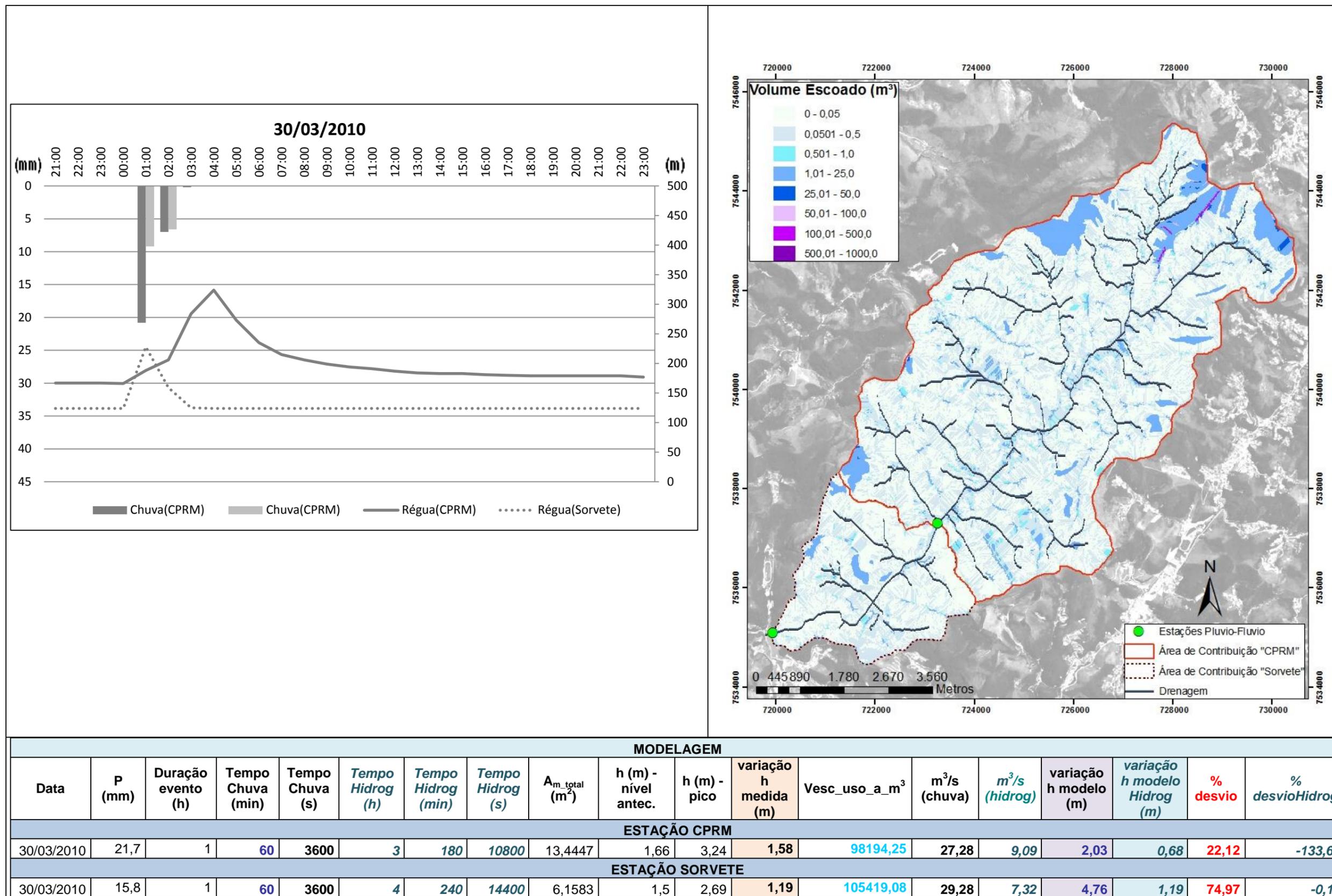
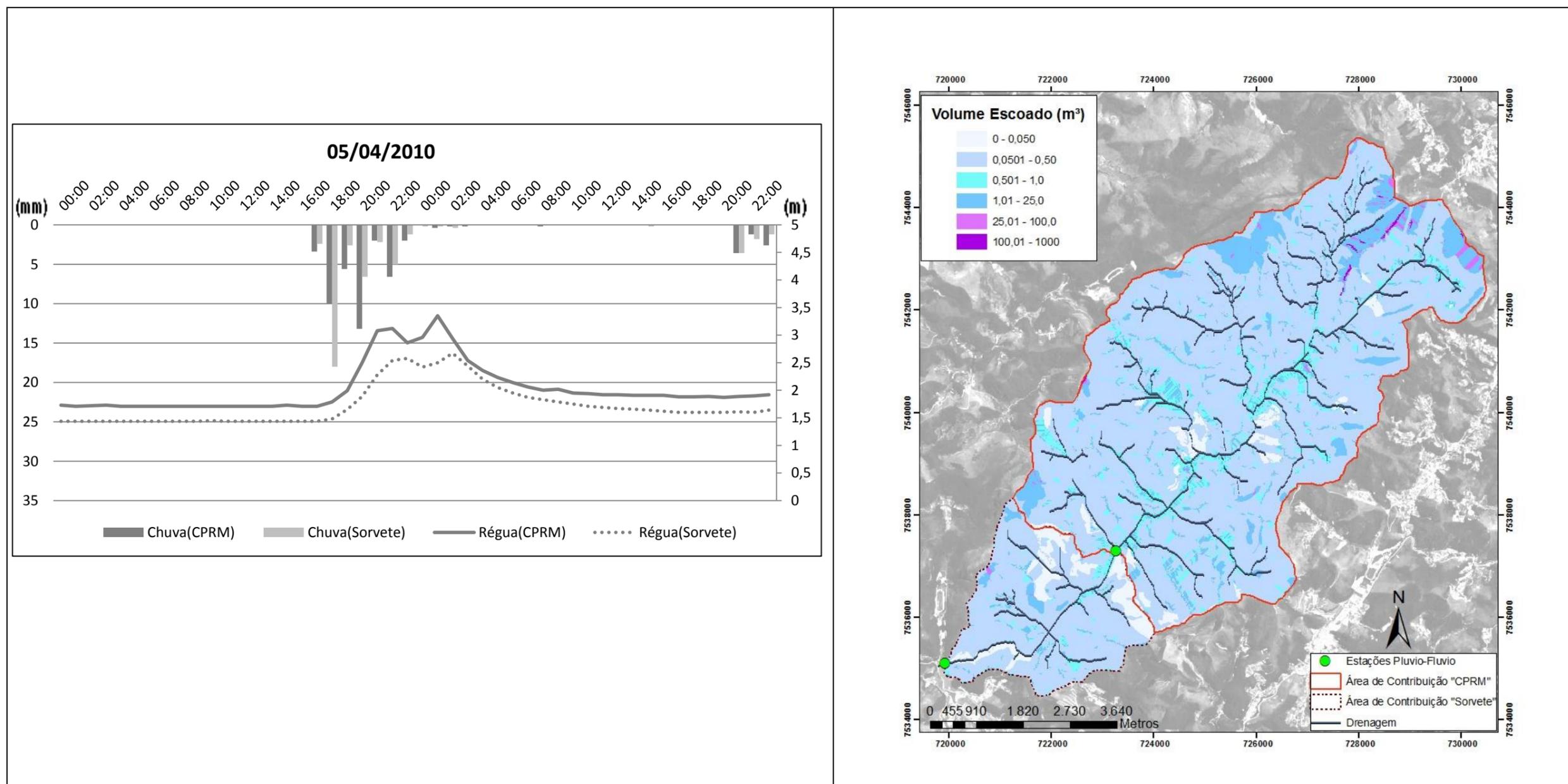


Figura 6.22 – Análise da Hidrógrafa 1 – Modelagem do volume escoado na chuva de 30/03/2010 para a área da bacia do Córrego Sujo.



MODELAGEM																		
Data	P (mm)	Duração evento (h)	Tempo Chuva (min)	Tempo Chuva (s)	Tempo Hidrog (h)	Tempo Hidrog (min)	Tempo Hidrog (s)	A _m total (m ²)	h (m) - nível antec.	h (m) - pico	variação h medida (m)	Vesc_uso_a_m ³	m ³ /s (chuva)	m ³ /s (hidrog)	variação h modelo (m)	variação h modelo hidrog (m)	% desvio	% desvioHidrog
ESTAÇÃO CPRM																		
05/04/2010	42,8	6	360	21600	7	420	25200	14,1503	1,71	3,35	1,64	193673,37	8,97	7,69	0,63	0,54	-158,82	-201,95
ESTAÇÃO SORVETE																		
05/04/2010	38,8	7	420	25200	8	480	28800	6,2822	1,44	2,67	1,23	211415,00	8,39	7,34	1,34	1,17	7,90	-5,26

Figura 6.23 – Análise da Hidrógrafa 2 – Modelagem do volume escoado na chuva de 05/04/2010 para a área da bacia do Córrego Sujo.

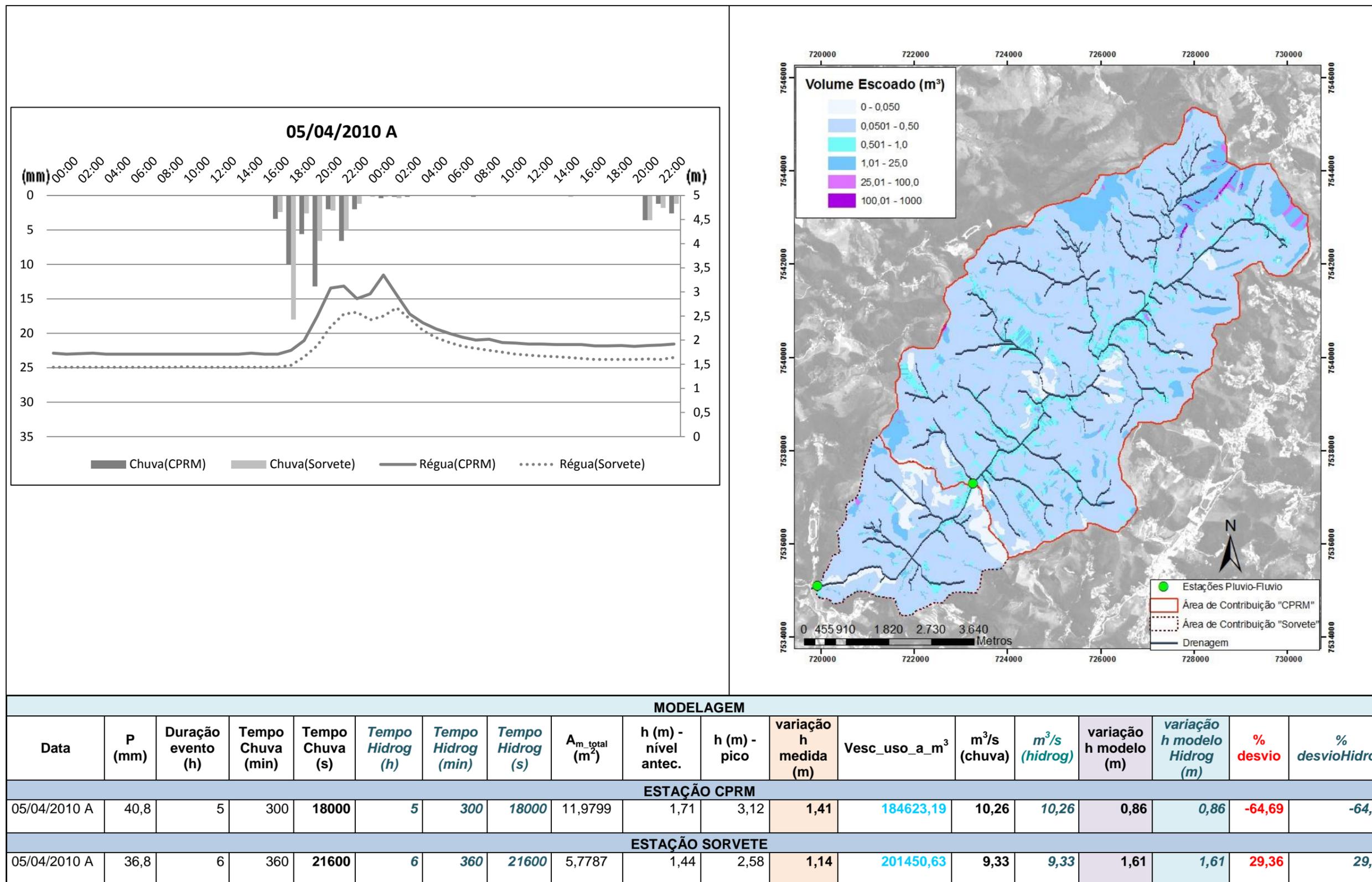


Figura 6.24 – Análise da Hidrógrafa 2 A – Modelagem do volume escoado na chuva de 05/04/2010 (a) para a área da bacia do Córrego Sujo.

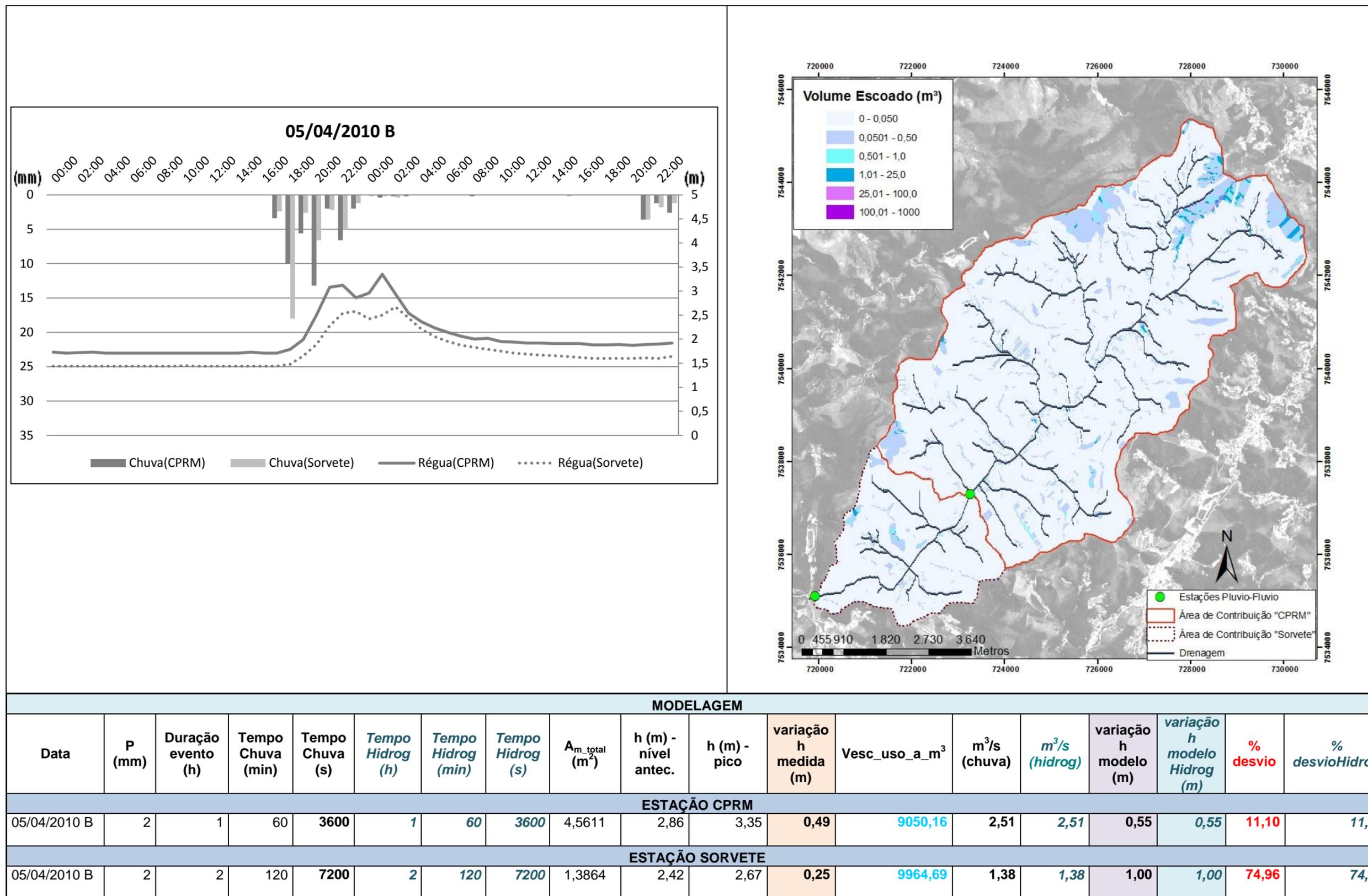


Figura 6.25 – Análise da Hidrógrafa 2 B – Modelagem do volume escoado na chuva de 05/04/2010 (b) para a área da bacia do Córrego Sujo.

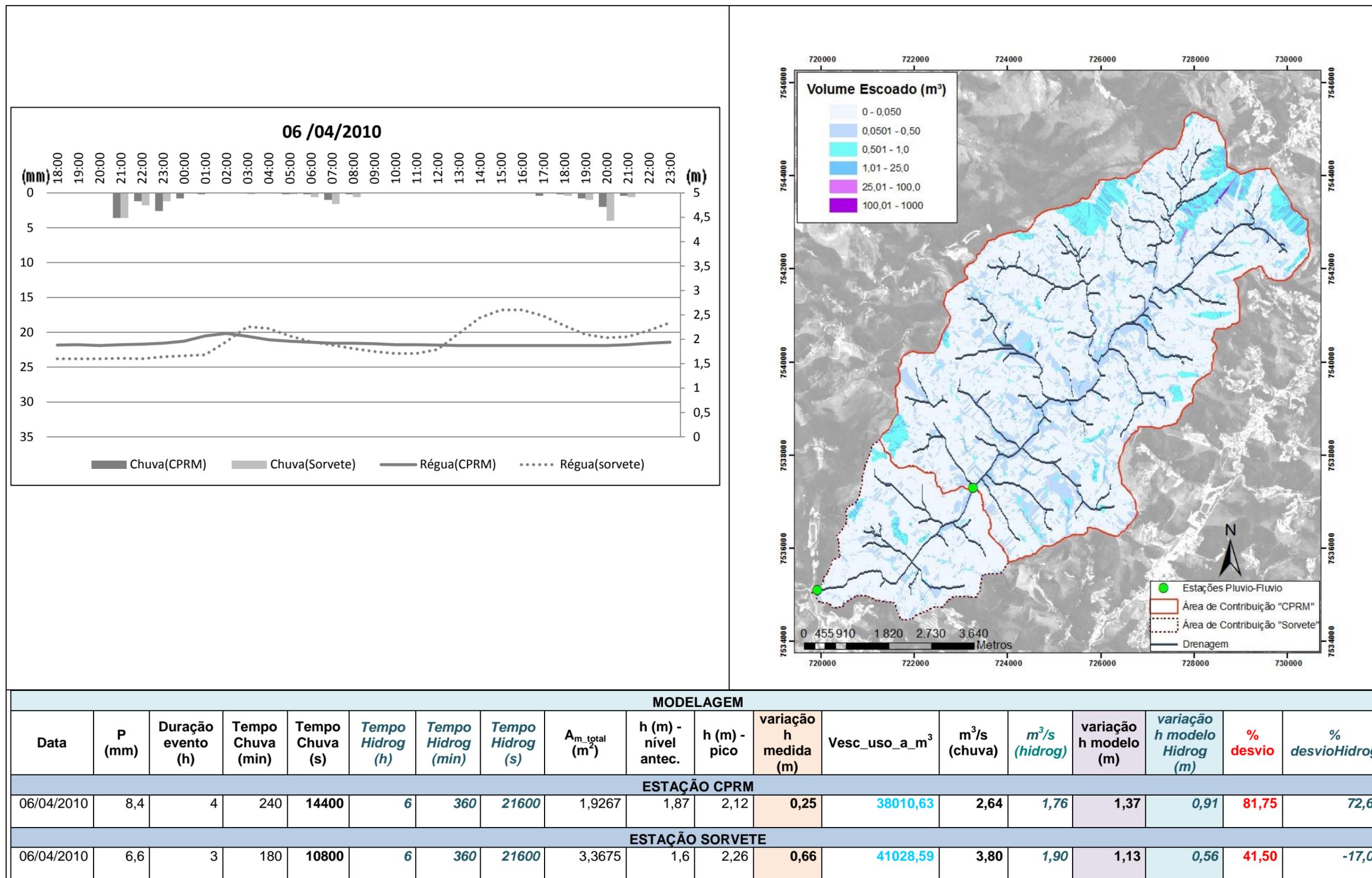


Figura 6.26 – Análise da Hidrógrafa 3 – Modelagem do volume escoado na chuva de 06/04/2010 para a área da bacia do Córrego Sujo.

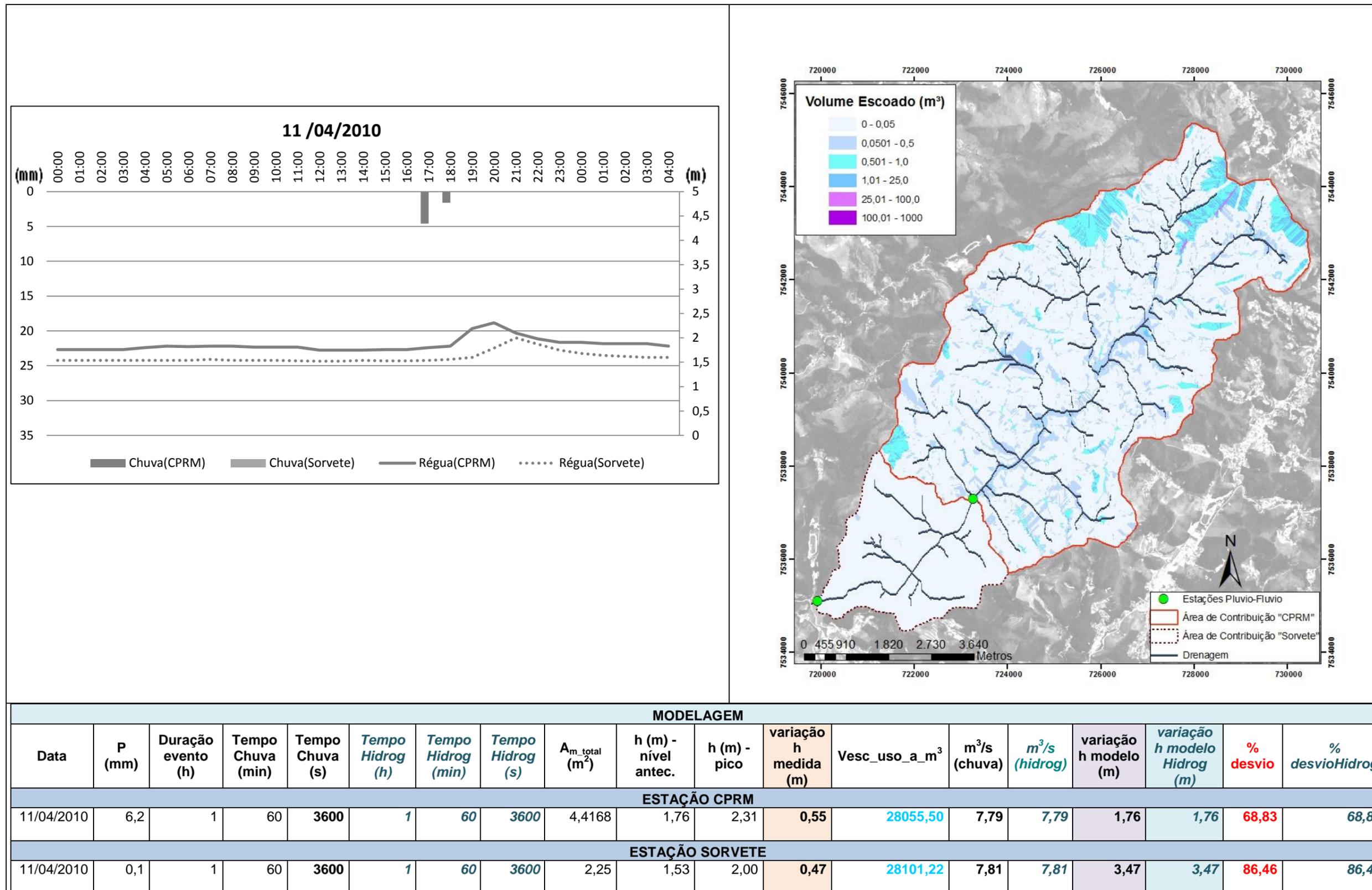


Figura 6.27 – Análise da Hidrógrafa 4 – Modelagem do volume escoado na chuva de 11/04/2010 para a área da bacia do Córrego Sujo.

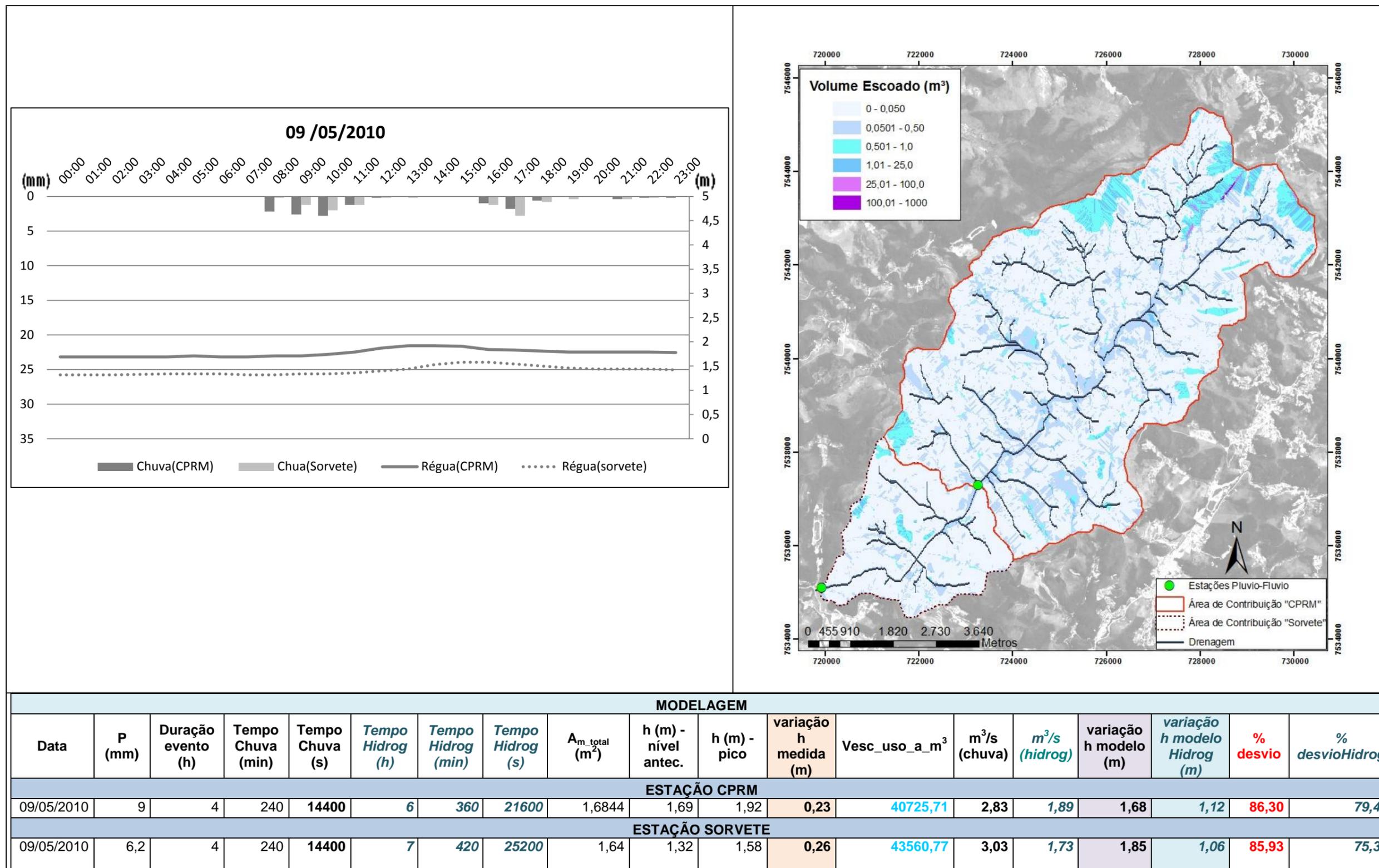


Figura 6.28 – Análise da Hidrógrafa 5 – Modelagem do volume escoado na chuva de 09/05/2010 para a área da bacia do Córrego Sujo.

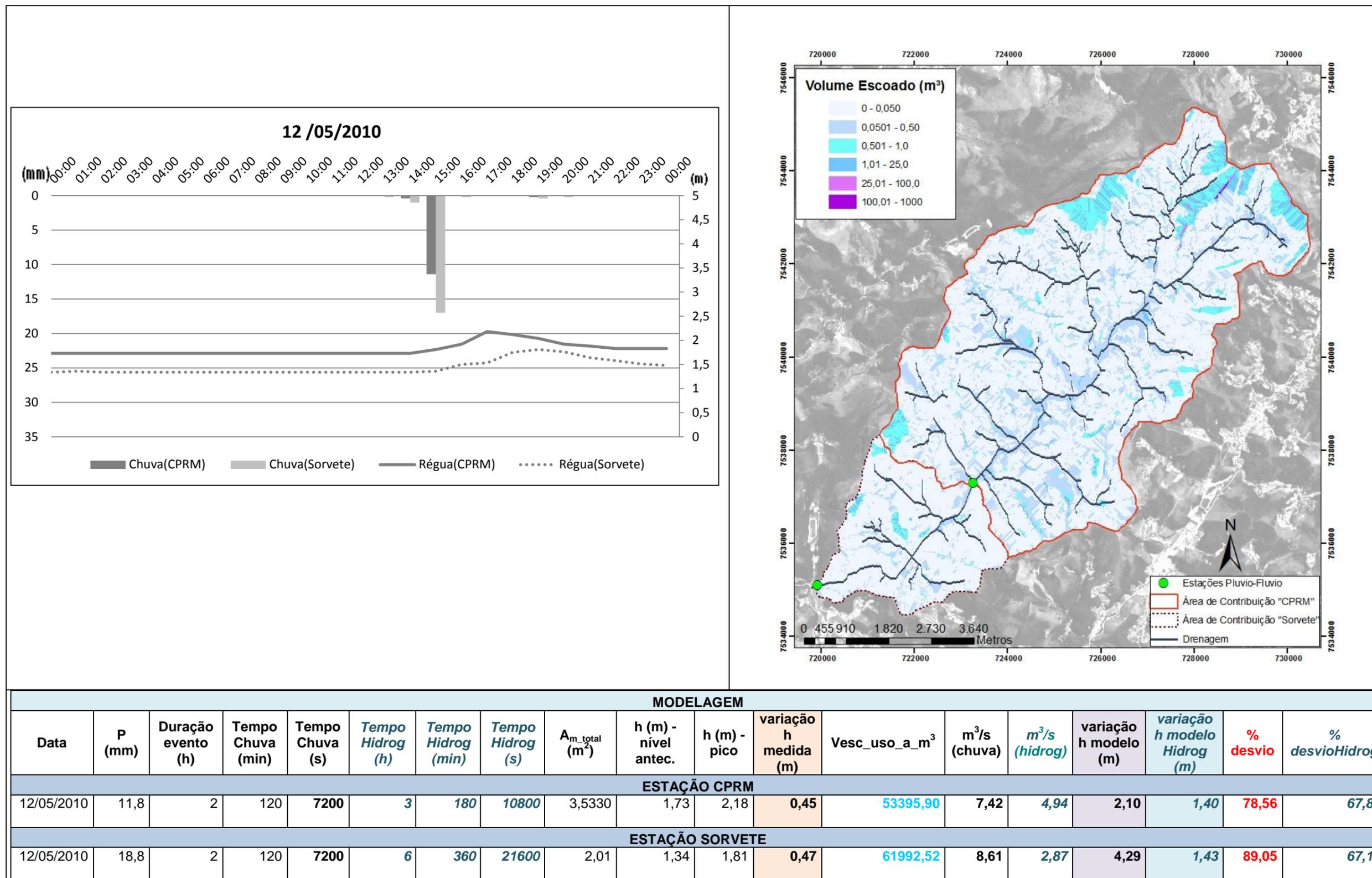


Figura 6.29 – Análise da Hidrógrafa 6 – Modelagem do volume escoado na chuva de 12/04/2010 para a área da bacia do Córrego Sujo.

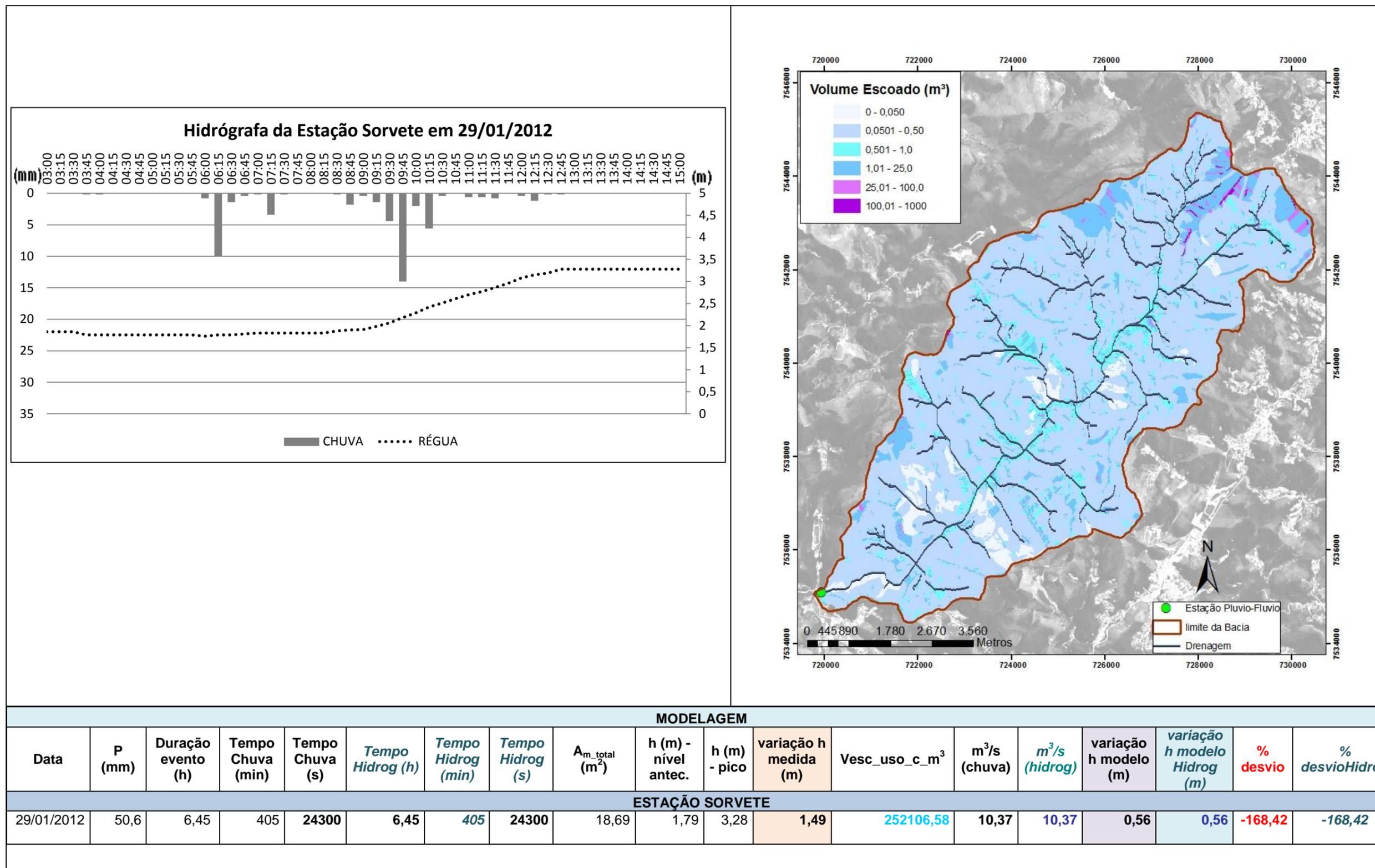


Figura 6.30 – Análise da Hidrógrafa 7– Modelagem do volume escoado na chuva de 29/01/2012 para a área da bacia do Córrego Sujo.

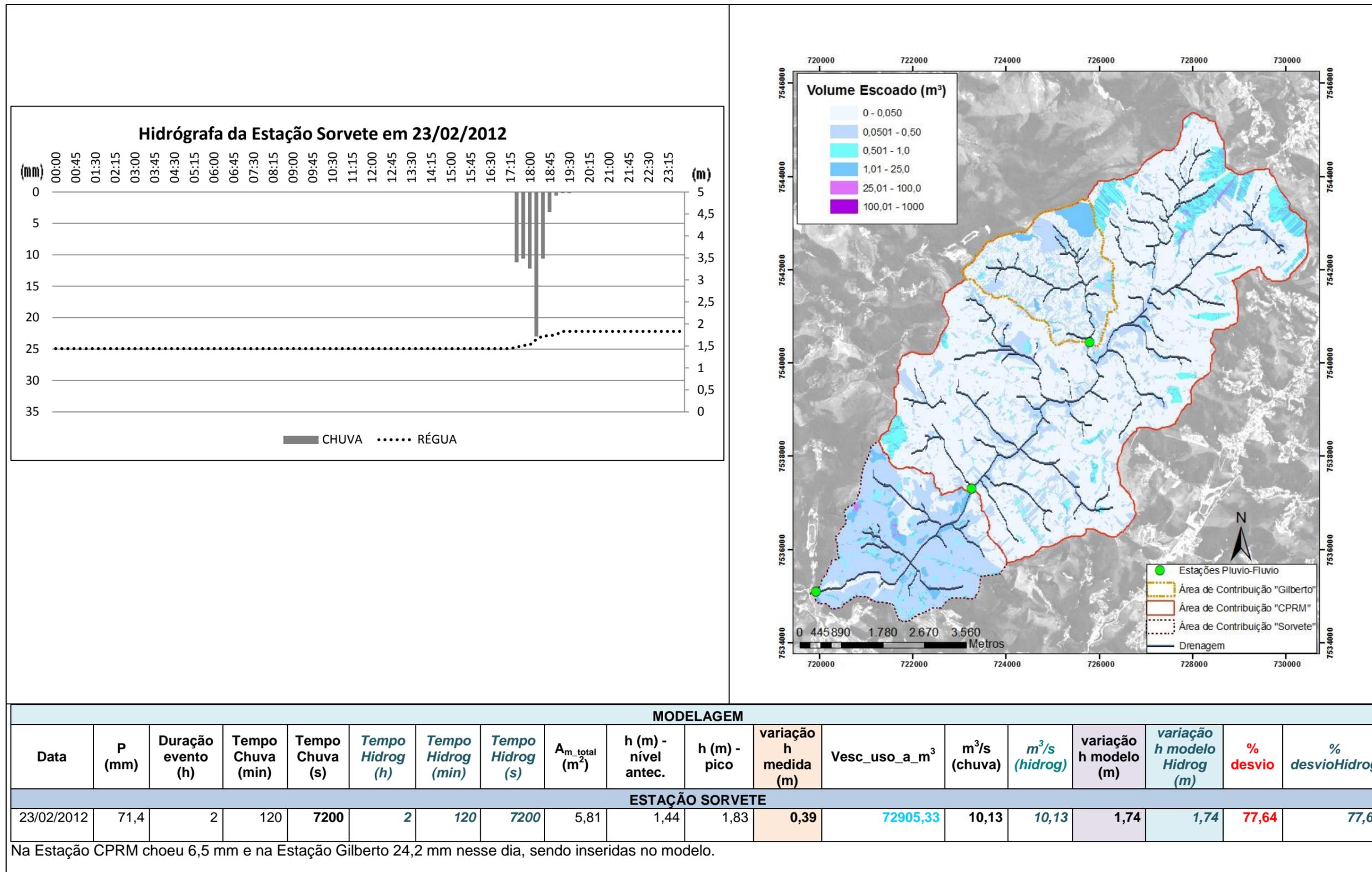


Figura 6.31 – Análise da Hidrógrafa 8 – Modelagem do volume escoado na chuva de 23/02/2012 para a área da bacia do Córrego Sujo.

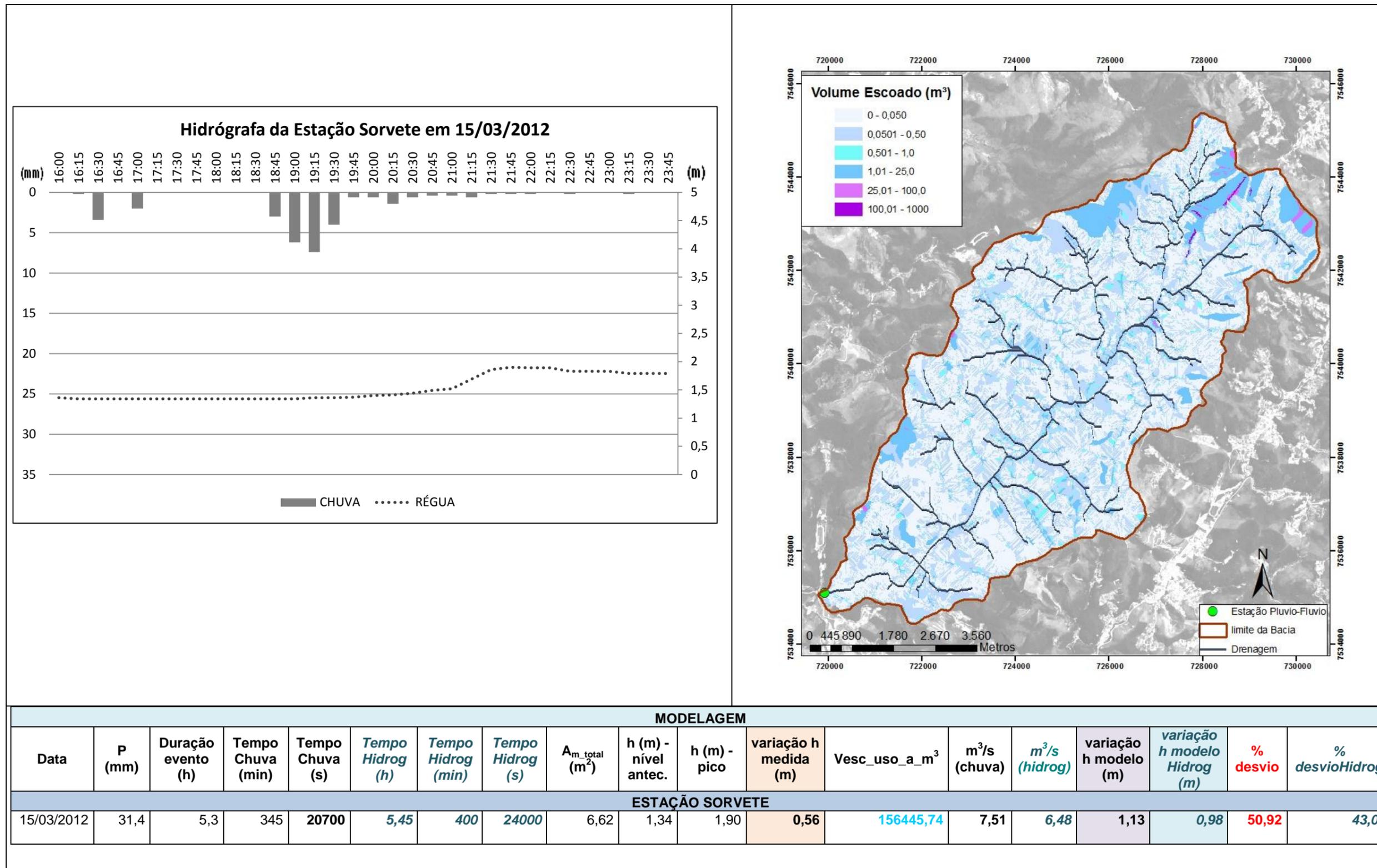


Figura 6.32 – Análise da Hidrógrafa 8 – Modelagem do volume escoado na chuva de 15/03/2012 para a área da bacia do Córrego Sujo.

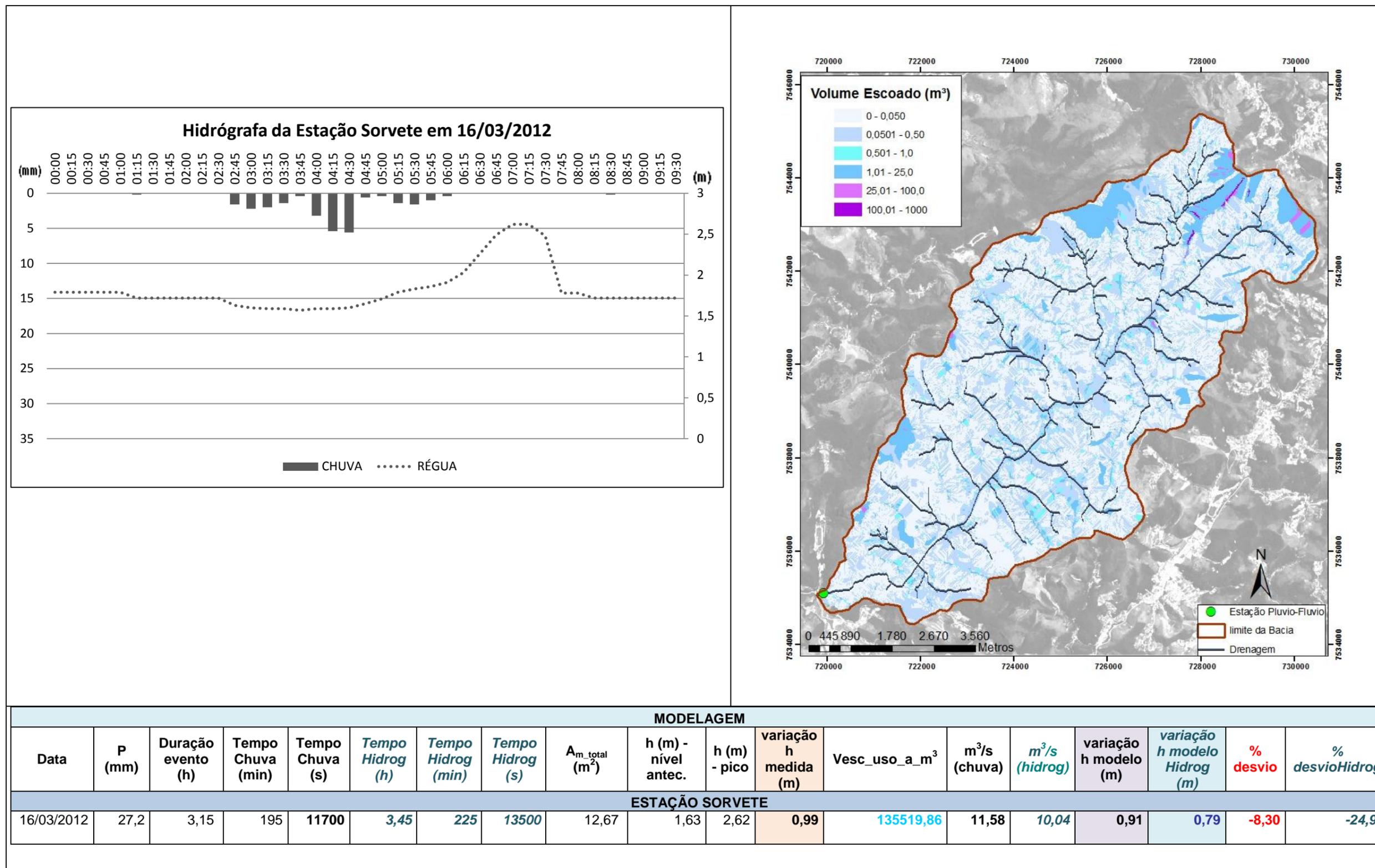


Figura 6.33 – Análise da Hidrógrafa 9 – Modelagem do volume escoado na chuva de 16/03/2012 para a área da bacia do Córrego Sujo.

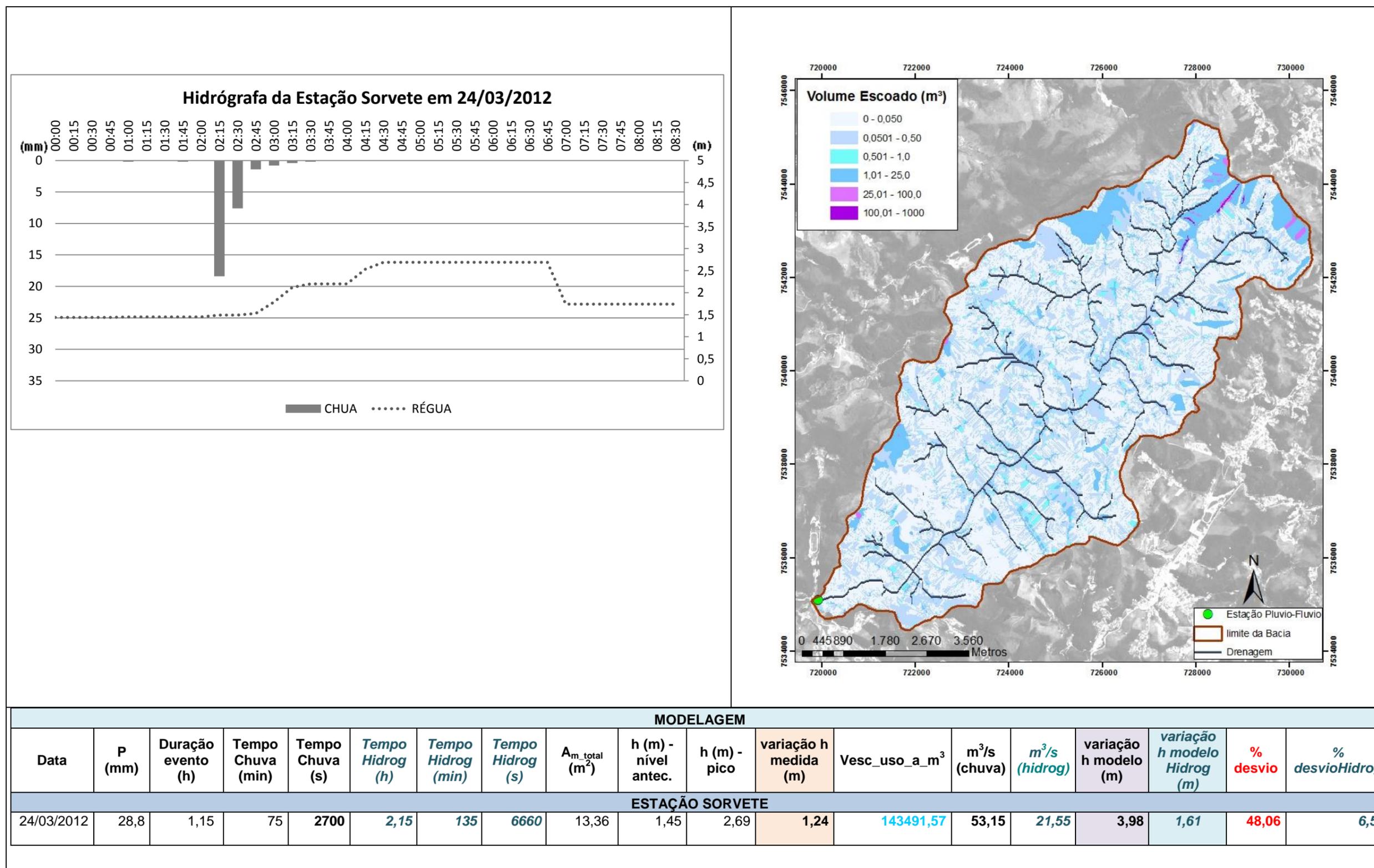


Figura 6.34 – Análise da Hidrógrafa 10 – Modelagem do volume escoado na chuva de 24/03/2012 para a área da bacia do Córrego Sujo.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou que a modelagem hidrológica em Arc Hydro para a bacia do Córrego Sujo com a metodologia proposta pode ser viável, ficando limitada principalmente pela falta de dados topográficos e hidrométricos mais precisos. Isto demonstra a necessidade da melhoria e continuação das mensurações para uma calibração do modelo.

É possível considerar que os objetivos da pesquisa foram atingidos, uma vez que há similaridade de comportamento do modelo frente às mensurações de vazão. Além disso, foi verificado ao longo da discussão de resultados que a escala topográfica de 1:10.000 não foi uma limitação muito expressiva, podendo ser considerada como satisfatória até o momento. Ficou evidente que a série temporal dos dados automáticos poderia abarcar uma variedade maior de meses do ano, já que as análises ficaram limitadas a apenas alguns meses de 2010 e 2012. Parece ser satisfatório o estabelecimento da relação entre a infiltração e o escoamento superficial para os diversos usos e coberturas vegetais encontradas no mapeamento, o que possibilitou a geração de mapas de volume escoado em cada hidrógrafa analisada. Apesar disso, há ainda a necessidade de saber a relação da infiltração e escoamento frente à declividade do terreno.

Diante dessas adversidades e das possibilidades de avanço mediante os resultados apresentados, fica uma lacuna para respostas que venham dar maior precisão à avaliação da metodologia utilizada. Por isso, a seguir serão apresentadas algumas sugestões de estudos que serão importantes para o maior conhecimento da dinâmica hidrológica da bacia e para o avanço do modelo hidrológico.

O modelo atual não considera a diferença na resposta do canal quando já ocorreu uma precipitação anterior ao evento modelado, fato que limita o resultado, pois é esperado que a variação de nível seja diferente quando a velocidade do fluxo do canal já foi alterada por alguma entrada de umidade antecedente.

Outro avanço a ser pesquisado é ter o conhecimento do tempo e quantidade de chuva necessária para a taxa de interceptação ser neutralizada com a vegetação já saturada. Saber em quanto tempo de estiagem vai ser necessário para ocorrer o retorno da capacidade máxima da interceptação também seria importante.

Efetuar medições de vazão não apenas em dias esporádicos, isto é, uma vez ao mês, mas principalmente em dias chuvosos e após um evento chuvoso, a fim de se obter uma curva-chave mais ajustada às condições de picos de vazão.

A complexidade na distribuição das chuvas ao longo da bacia revela a importância da instalação de novos pluviômetros manuais e automáticos em mais pontos bacia.

Por fim, um avanço ainda mais ousado seria incluir a contribuição da água subsuperficial na modelagem com Arc Hydro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALPINO RODRIGUES, S.O.; BRUM, L. B.; COELHO, P.A.; SANTOS, V. S. C.; AVELAR, A. S. – 2012 – “Efeito da Dragagem na Secção e na vazão do Canal Fluvial: Bacia do Córrego Sujo, Teresópolis (RJ)”. Nº 556 dos Anais do IX Simpósio Nacional de Geomorfologia, de 21 a 24 de outubro de 2012. UFRJ, Rio de Janeiro.
- ARAUJO, I. S. – 2009 – “Análise das Mudanças da Cobertura Vegetal, Uso do Solo e da Água na Agricultura Irrigada - Bacia do Córrego Sujo, Teresópolis (RJ)”. Monografia de Graduação. Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, IGEO. Rio de Janeiro, 40 p.
- ARONOFF, S. – 1989 – “Geographic Information Systems. A Management Perspective”. Ottawa, WDL Publications”.
- BARRETO, A.C.M. – 2005 – “Caracterização Hidrológica e dos Diferentes Usos do Solo da Bacia do Córrego Sujo – Município de Teresópolis – RJ”. Monografia de Graduação. Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, IGEO. 41p.
- BARROS, R. S de. “Avaliação da Altimetria de Modelos Digitais de Elevação Obtidos a Partir de Sensores Orbitais”. Tese - Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, IGEO. Rio de Janeiro, 2006.
- BARTH, F. T.; POMPEU, C.T.; FILL, H.D.; TUCCI, C.E.M.; KELMAN, J. & BRAGA Jr., B.P.F – 1987 – “Modelo para Gerenciamento de Recursos Hídricos”. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 21. São Paulo: NOBEL/ABRH.
- BERTHELOT, R. Hidrológica Sintética – 1970 - Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- BERTHELOT, R.; MUÑOS, R.H.; SEMMELMANN, F. & TUCCI, C. – 1972 – “Inventário dos Recursos hídricos Superficiais na Região de Imbituba”. Relatório técnico. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- BEVEN, M.; KIRKBY, M.J. – 1979 – “A physically based, variable contributing and model of basin hydrology”. Hydrological Sciences Bulletin, 24: 43-69.
- BRUM, L.B. – 2010 – “O Uso da Água pela Agricultura Irrigada na Região Serrana do Rio de Janeiro: Bacia do Córrego Sujo – Teresópolis”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Geografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, IGEO. 91p
- CAMARA, G. & DAVIS, C. – 2003 – “Fundamentos de geoprocessamento”. In: Introdução à Ciência da Geoinformação. Disponível em: www.inpe.br/gilberto/livro.2003. Último acesso em 21 de fevereiro de 2012.

- CAMARA, G. & MONTEIRO, A.M.V. – 2001 – Conceitos Básicos em Ciência da Geoinformação. In: Introdução à Ciência da Geoinformação. INPE-10506-RPQ/249.
- CARDOSO, C.A.; DIAS, H.C.T.; SOARES, C.P.B.; MARTINS, S.B – 2006 – Caracterização Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. Revista *Árvore*, v.30, n.2, p.241-248.
- CASSETI, V. – 1991 – “Geomorfologia”. Livro *online*. Disponível em: <http://www.funape.org.br/geomorfologia/cap1/index.php>, último acesso em 20 de fevereiro de 2012.
- COELHO, G B. – 2006 – “Análise e simulação do processo de transformação de chuva em vazão com suporte de Sistema de Informações Geográficas (SIG)”. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife.
- COELHO NETTO, A. L. – 1994 – “Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia”. In Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. Guerra, A. J. T. & Cunha, & S. B. (org). Ed. Bertrand Brasil, São Paulo, 1994.
- COELHO NETTO, A.L.; AVELAR, A.S.; FERNANDES, M.C.; LACERDA, W.A. – 2007 – “Landslide Susceptibility in a Mountainous Geoecosystem, Tijuca Massif, Rio de Janeiro: The Role of Morphometric Subdivision of the Terrain”. *Geomorphology*. Amsterdam, 87(3): 120-131.
- CHIROL, A. D. – 2003 – “Relações solo-fauna durante sucessão florestal em cicatrizes de movimento de massa”. Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, IGEO. Rio de Janeiro.
- CHRISTOFOLETTI, A. – 1980 – “Geomorfologia”. 2a ed. São Paulo, Edgard Blücher.
- CHRISTOFOLETTI, A. – 1999 – “Modelagem de Sistemas Ambientais”. Edgard Blücher.
- CORREIA, E. F. G. – 2011 – “Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco de inundação”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Computação. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 297 p.
- CPRM e DRM-RJ – 2000 – “Mapa Geológico do Estado do Rio de Janeiro”. Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro.
- DANTAS, M.E., SHINZATO, E. ; MEDINA, A. I. M. ; PIMENTEL, J. ; SILVA, C. R. da; LUMBREAS, J. F. ; CALDERANO, S. B. ; CARVALHO JR, A. de ; MANSUR, K.; FERREIRA, C. E. O – 2000 – “Diagnóstico Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro”. CPRM.
- DANTAS, M. E. – 2000 – “Mapa Geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro”. Brasília: CPRM.

- DIAKAKIS, M. – 2011 – “A GIS method for rapid flood hazard assessment in ungauged basins using the ArcHydro model and the Time-Area method”. *Environmental Earth Sciences*, pp 129-136.
- FERNANDES, M. C. – 2004 – “Desenvolvimento de Rotina de Obtenção de Observações em superfície Real: Uma Aplicação em Análises Geoecológicas”. Tese – Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, IGEO. Rio de Janeiro.
- FERRAZ, F.F. de B., MILDE L. C. & MORTATTI, J. – 1999 – “Modelos Hidrológicos Acoplados a Sistemas de Informações Geográficas: um Estudo de Caso”. *Revista de Ciência & Tecnologia* • 14 – pp. 45-56.
- FIGUEIRÓ, A. S. – 2005 – “Mudanças ambientais na interface floresta-cidade e propagação de efeito de borda no Maciço da Tijuca- Rio de Janeiro, RJ”. Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós Graduação em Geografia, Rio de Janeiro.
- FRANCISCO, C. N. – 1995 – “O Uso de Sistemas Geográficos de Informação SGI na Elaboração de Planos Diretores de Unidades de Conservação – Uma Aplicação no Parque Nacional da Tijuca – RJ”. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo.
- GUERRA, A.J.T. – 1994 – “Processos Erosivos nas Encostas”. In *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Guerra, A. J. T. & Cunha, & S. B. (org). Ed. Bertrand Brasil, São Paulo, 1994.
- HAGGETT, P. & CHORLEY, R. J. – 1975 – “Modelos, paradigmas e a Nova Geografia”. In *Modelos físicos e de informação em Geografia*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1975, p. 1-19.
- KARMANN, I. – 2003 – “Ciclo da água, água subterrânea e sua ação geológica”. In: TEIXEIRA, W. et al. (Orgs.). *Decifrando a Terra*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, cap. 7, p. 113-138
- KONADU, D.D., FOSU, C. – 2009 – “Digital Elevation Models and GIS for Watershed Modelling and Flood Prediction – A Case Study of Accra Ghana”, *Earth and Environmental Science*, VI, 325-332.
- LENCASTRE, A. & FRANCO, F. M. – 1984 – “Lições de Hidrologia”. Universidade Nova de Lisboa (Ed.), 451 p.
- LORANDI, R.; CANÇADO, C.J. – 2002 – “Parâmetros Físicos para o gerenciamento de bacias hidrográficas”. In: *Conceito de bacia hidrográfica; teorias e aplicações*. Orgs: A. Schiavetti e A.F.M. Camargo. Ilhéus, Ba: Editus.
- MAIDMENT, D.R. – 2002 – “Arc Hydro: GIS for Water Resources”, ESRI, p. 203.

- MAKSOUH, H. – 1957 – “Características Funcionais e Físicas das Bacias Fluviais”. Rio de Janeiro, Centro Panamericano de Aperfeiçoamento para Pesquisas de Recursos Naturais.
- MARTINS, J. A – 1976 – “Escoamento Superficial”. In: Hidrologia Básica. São Paulo, Edgard Blücher, Rio de Janeiro.
- MEIS, M.R.M; MIRANDA, L.G.H.; FERNANDES, N.F. – 1982 – “Desnívelamento de Altitude como Parâmetro para a Compartimentação do Relevo: bacia do Médio Vale do rio Paraíba do Sul.” Anais do XXXII Congresso Brasileiro de Geologia. Salvador 4: 1489-1509.
- MENEZES, C. E. E. – 2009 – “Parâmetros Hidrológicos e Erosivos Obtidos em Parcelas Experimentais, Bacia do Córrego Sujo, Teresópolis (RJ)”. Trabalho de conclusão de curso graduação em Geografia. Rio de Janeiro: UFRJ. 42p.
- MIRANDA J. C. de – 1992 – “Interceptação das Chuvas pela Vertente Florestal e Serrapilheira nas Encostas do Maciço da Tijuca: Parque Nacional da Tijuca, RJ”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, IGEO. Rio de Janeiro
- MUÑOS, R.H. & TUCCI, C. – 1974 – “Modelo Matemático do Arroio Chasqueiro”. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- NACINOVIC, M. G. G. – 2009 – “Estudo de Erosão pela Análise de Sucção e Escoamento Superficial na Bacia do Córrego Sujo (Teresópolis, RJ)”. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 167 p.
- _____ Normais Climatológicas: 1961-1990. Brasília: MARA/ SNI/ INMET, 2009. 84 p.
- OLIVEIRA, E.S.– 2007 – “Indicadores Geoambientais de Qualidade das Águas da Bacia do Córrego Sujo, Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, Teresópolis (RJ)”, Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geociências – Geoquímica, UFF, 150 p.
- PEDROSA, B.M., CAMARA, G – 2000 – “Modelagem Dinâmica: Conceitos Básicos e Exemplos de Sistemas”, Ministério da Ciência e Tecnologia INPE, Relatório Técnico, 2000, cap. 1.
- PEDROSA, B.M., CAMARA, G. – 2000 – “Modelagem Dinâmica e Geoprocessamento”, Ministério da Ciência e Tecnologia INPE, Relatório Técnico, cap. 8.
- PINTO, N. L. S – 1976 – “Introdução”. In: Hidrologia Básica. São Paulo, Edgard Blücher, Rio de Janeiro.
- _____ Plano Diretor de Desenvolvimento Sustentável de Teresópolis – 2000 – Teresópolis: Prefeitura Municipal de Teresópolis, 2006. 299 p.

- RENNÓ, C.D., Soares, J.V. – 2000 – “Conceitos Básicos de Modelagem Hidrológica”, Ministério da Ciência e Tecnologia INPE, Relatório Técnico, cap. 2
- RENNÓ, C.D., Soares, J.V. – 2000 – “Modelos Hidrológicos para Gestão Ambiental”, Ministério da Ciência e Tecnologia INPE, Relatório Técnico, 60p.
- ROCHA LEÃO, O. M. – 1997 – Potencialidades e Limitações da Revegetação no Controle da Hidrologia e Erosão de Solos. Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, IGEO. Rio de Janeiro.
- RODRIGUES, C; ADAMI, S. – 2005 – “Técnicas Fundamentais para o Estudo de Bacias Hidrográficas”. In: VENTURI, L. A. B. (org). *Praticando Geografia: técnicas de campo e laboratório em geografia e análise ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2005, p. 147 a 166.
- SANCHEZ, J. – 1972 – “Prevision de Crecidas En El Rio Cuaca Atraves de Un Modelo Determinístico”. Porto Alegre. Dissertação de mestrado – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- SANTOS, C.S.M. dos – 2005 – “Balanço Hídrico Utilizando Geoprocessamento e Modelagem Matemática na Bacia do Rio dos Macacos – Maciço da Tijuca”. Rio de Janeiro, 44p.
- SANTOS, I. [et.al] – 2001 – “Hidrometria Aplicada”, Ed. LACTEC, Curitiba, 372p.
- SCHULER, A.E. – 1998 – “Aplicação do TOPMODEL em uma bacia de mesoescala localizada na cabeceira do rio Corumbataí”. (Dissertação de mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo.
- SILVA, L.C.da, VIEIRA, C.S., GUIMARÃES, M.T., SOUZA, E.C.de. – 2001 – “Neoproterozóico/Cambriano”. In: *Geologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro / organizado por Luiz Carlos da Silva {e} Hélio Canejo da Silva Cunha – Brasília: CPRM. 2ª edição revista em 2001.*
- SILVEIRA, A.L.L. – 2001 – “Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica”. In: TUCCI, C.E.M. (Org.).
- SOUZA, G. M; SOUZA, L.G; COURA, P.H.F; FERNANDES, M.C; MENEZES, P.M.L. – 2008 – “Métodos de Elevação para Modelos Digitais de Elevação para o Maciço da Pedra Branca, RJ: um estudo comparativo”. II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife-PE, 8-11 de setembro de 2008.
- SPACE IMAGING DO BRASIL. Especificações GeoEye-1. Disponível em: <<http://www.spaceimaging.com.br/novosite11/geoeeye.php>>. Acesso em: 14 dez. 2012.
- SPENCE, C, HOSLER, J.,- 2007 – “Representation of Stores Along Drainage Networks in Heterogenous Landscapes for Runoff Modelling”, *Journal of Hydrology*, n. 347, p. 474-486.

- STRAHLER, A.N. – 1952 – “Equilibrium Theory of Erosional Slopes Approaches by Frequency Distribution Analysis.” Amer. J. Sci. 248: 673 – 696.
- TUCCI, C. E. M. – 1998 – “Modelos hidrológicos”. Porto Alegre: Ed. da Universidade/UFRGS, Associação Brasileira de Recursos Hídricos.
- TUCCI, C. E. M. (org) – 1993 – “Hidrologia Ciência e Aplicação”. 40 edição. Ed. UFRGS/ABRH. Porto Alegre, 943 p.
- VILLELA, S. M. & MATTOS, A. – 1975 - ‘Hidrologia Aplicada’. Editora Mc Graw Hill, São Paulo 245p.
- XAVIER - DA - SILVA, J. – 2001 – “Geoprocessamento para Análise Ambiental”. Rio de Janeiro. p.228.
- YEVJEVICH, V. – 1974 – “Determinism and stochasticity in Hydrology”, Journal of Hydrology,n. 22, p. 225-238.
- ZAÚ, A. S. – 1994 – “Cobertura Vegetal: Transformações e Resultantes Microclimáticas e Hidrológicas Superficiais na Vertente Norte do Morro do Sumaré, Parque Nacional da Tijuca-RJ”. Dissertação de mestrado. PPGG / CCMN / UFRJ. 197 p.

Link Acessado:

Tutorial do Arc Hydro

<http://www.crwr.utexas.edu/gis/gishydro06/ArcHydro/ArcHydroTools/Doc/Arc%20Hydro%20Tools%201.1%20-%20Tutorial.pdf>, último acesso em 31/07/2013